

대청호의 시공간적 수질 변화 특성 및 호수내 유입지천의 영향

김 경 현 · 이 재 훈 · 안 광 국*

(충남대학교 생명시스템과학대학 생물학과)

Spatio-temporal Fluctuations with Influences of Inflowing Tributary Streams on Water Quality in Daechong Reservoir. Kim, Gyung-Hyun, Jae Hoon Lee and Kwang-Guk An* (Department of Biological Sciences, College of Biosciences and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objectives of this study were to analyze the longitudinal gradient and temporal variations of water quality in Daechong Reservoir in relation to the major inflowing streams from the watershed, during 2001~2010. For the study, we selected 7 main-stream sites of the reservoir along the main axis of the reservoir, from the headwater to the dam and 8 tributary streams. In-reservoir nutrients of TN and TP showed longitudinal declines from the headwater to the dam, which results in a distinct zonation of the riverine (R_z , M1~M3), transition (T_z , M4~M6), and lacustrine zone (L_z , M7) in water quality, as shown in other foreign reservoirs. Chlorophyll-*a* (CHL) and BOD as an indicator of organic matter, were maximum in the T_z . Concentration of total phosphorus (TP) was the highest (8.52 mg L^{-1}) on March in the R_z , and was the highest ($165 \mu\text{g L}^{-1}$) in the L_z on July. Values of TN was the maximum ($377 \mu\text{g L}^{-1}$) on August in the R_z , and was the highest (3.76 mg L^{-1}) in the L_z on August. Ionic dilution was evident during September~October, after the monsoon rain. The mean ratios of TN:TP, as an indicator of limiting factor, were 88, which indicates that nitrogen is a surplus for phytoplankton growth in this system. Nutrient analysis of inflowing streams showed that major nutrient sources were headwater streams of T1~T2 and Ockcheon-Stream of T5, and the most influential inflowing stream to the reservoir was T5, which is located in the mid-reservoir, and is directly influenced by the wastewater treatment plants. The key parameters, influenced by the monsoon rain, were TP and suspended solids (SS). Empirical models of trophic variables indicated that variations of CHL in the R_z ($R^2=0.044$, $p=0.264$) and T_z ($R^2=0.126$, $p=0.054$) were not accounted by TN, but were significant ($p=0.032$) in the L_z . The variation of the log-transformed I_r -CHL was not accounted ($R^2=0.258$, $p=0.110$) by I_w -TN of inflowing streams, but was determined ($R^2=0.567$, $p=0.005$) by I_w -TP of inflowing streams. In other words, TP inputs from the inflowing streams were the major determinants on the in-reservoir phytoplankton growth. Regression analysis of TN:TP suggested that the ratio was determined by P, rather than N. Overall, our data suggest that TP and

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

suspended solids, during the summer flood period, should be reduced from the eutrophication control and P-input from Ockcheon-Stream should be controlled for water quality improvement.

Key words : water quality, reservoir, tributary stream, nutrients, phytoplankton growth

서 론

우리나라에서는 집약적 농업에 의한 농업용수 및 단 위면적당 높은 인구밀도에 의한 식수의 요구를 충족시키기 위해 농업용 저수지 및 대형 인공댐과 같은 인공호 건설이 1970~1980년대에 가속화 되었다. 특히 우리나라는 가뭄시에 발생하는 가용 수자원 부족 및 계절적 집중 강우에 따른 편차현상으로 인해 생기는 수자원의 불균형적 분포를 인공호 설치를 통해서 해결해왔다. 국토의 65%가 산악지형이며 자연호가 거의 없는 우리나라의 경우 연 총 강수량 1,267억 m³ 중 평균 수자원으로의 이용량은 301억 m³으로서 26%만을 이용하는 실정으로 (MCT, 2001) 보다 원활한 수자원 공급 및 유량확보를 위해 최근에도 4대강 유역에 대형 인공호를 건설하고 있는 실정이다.

최근 호수 연구에 따르면, 인공호는 인위적인 과정을 거쳐 형성되었기 때문에 유량, 수체류시간 (Water residence time), 수온과 같은 수리·수문학적 요인 (Macan, 1961)이 자연호와 매우 다른 것으로 보고되고 있으며 (Macan, 1974), 또한 이런 특성들은 인 (P)과 질소(N)와 같은 화학적 특성, 부착조류, 수서무척추동물, 어류 등의 인공호 내 서식하는 생물학적 특성 등의 다양한 요인에 직간접적으로 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Moss, 1980; Thornton, 1990). 국내 및 외국의 많은 인공호는 강의 중하류부에 건설된 댐의 건설로 인해 물의 흐름이 느려지고, 수체류시간이 증가하므로 영양염류 증가를 가져오고, 이는 인공호 부영양화 및 조류 대발생 (Algal bloom)을 가져오며, 심층내의 산소고갈을 일으켜 수생태계에 막대한 영향을 미칠 수 있다. 또한 정수처리장 여과지 폐색을 유발해 수질문제를 일으키는 것으로 알려져 이를 해결하기 위한 연구가 요구되고 있다 (Harper, 1992; Welch and Lindell, 1992; Lee et al., 2005). 인공호 부영양화의 주범으로 널리 알려진 호수내의 질소(N), 인(P)의 농도 및 호수내 조류에 의한 생체량 혹은 엽록소와의 관계는 호수내 영양염류가 1차 생산력에 어떻게 영향을 미치는지를 잘 보여주고 있다 (Sakamoto, 1966;

Borchardt, 1996). 이러한 호수의 효과적인 수질관리 및 유지를 위해서 다양한 방법들이 적용되고 있는데, 호수내 질소 및 인 농도의 비를 나타내는 TN:TP의 비율은 수체에서 인/질소 결핍 (P- 혹은 N-limitation) 현상을 설명하여 수체의 수질관리에 효율적으로 이용되고 있으며 (Hecky and Kilham, 1988; Wetzel, 2001), 최근에는 영양염류 조작실험 (Nutrient enrichment experiment)을 통해 제한 영양염류 인자를 감별해 내어 호수의 부영양화 현상을 설명하고 있다. 또한, 부영양화 변수의 핵심 자료인 총인 (TP), 투명도 (Secchi depth), 엽록소 등의 2차적인 자료를 이용하는 TSI 지수 (Trophic State Index) 산정법도 호수관리 목적으로 이용하고 있다 (Carlson and Simpson, 1996).

본 연구대상 호수인 대청호는 한강, 낙동강에 이어 우리나라에서 3번째로 큰 강인 금강 수계에 놓여있으며, 저수면적 72.8 km², 호수길이 80 km, 저수량 15억 톤의 우리나라에서 3번째 규모의 호수이다. 유역 내 연평균 강수량 1,230 mm, 총 유입량 95.6 m³ s⁻¹을 갖는 대청호는 상류에 봉황천 (금산군), 영동천과 초강천 (영동군), 보청천 (옥천군) 등의 크고 작은 지천의 물이 유입되며, 저수지 수역의 70% 이상이 산림, 20% 정도가 농지로 구성된 토지이용도를 보이고 있다 (Lee et al., 2010). 대청호는 저수 이래로 4년 만에 바로 식물성 플랑크톤에 의한 수화 현상이 보고된 바 있으며, 대청호 조류 생장은 다른 수계의 주암호와 동북호와 마찬가지로 인 (P)이 가장 중요한 핵심 제한요인 (Limiting factor)으로 (Lee and Lee, 1987; Lee et al., 2006; Kong et al., 2009; Lee et al., 2010) 보고된 바 있다. 대청호에서는 대형 호수내 수질의 상하류 간의 공간 이질성 평가 (Lee et al., 2002), 식물성 플랑크톤의 군집 특성 평가 (Joung et al., 2005) 및 영양염류 및 투명도 등의 변수에 의거한 경험적 모델 (Empirical model) 평가 (An et al., 2008)와 더불어 호수의 크기에 따른 부영양화 변수들의 트로픽 상태 평가 (Han et al., 2010) 등의 연구가 활발히 진행되어 왔다.

대청호의 수질평가 방법에 관한 연구 동향에 따르면, 위치한 수계의 지리적 특징에 따른 수질 개선 수생태계 보호를 위한 연구는 아주 다각적으로 활발히 진행되어

왔으나 (Lee *et al.*, 2002; Oh and Koh, 2003; Shin *et al.*, 2003; An and Yang, 2007; Kim and An, 2010), 이런 연구의 대부분은 인공호 내의 호수 지점에 국한된 수질 조사가 주류를 이루고 있어 호수 녹조현상이나 수질 변화에 막대한 영향을 미치는 유입하천에 의한 호수 수질영향에 관한 연구는 이에 비해 연구가 극히 미미한 실정이다 (Cheon *et al.*, 2006). 본 호수 부영양화에 주로 영향을 주는 수계의 주요 외부 요인으로서는 축산폐수 유출 (Lee, 1999; Kwon *et al.*, 2002), 강우시 비점오염원에 의한 탁수 유출 (Chung and Park, 2005; Joung *et al.*, 2005) 등이 제시된 바 있다. 특히 대청호는 호소수의 호수내 체류기간이 6개월 정도에 지나지 않아 봄철마다 전도현상에 의한 수질 악화보다 호수내 유역으로 직접 유입되는 오염물과 지천을 통한 유입이 수질 악화의 주원인으로 조사되어 (Kim, 1996), 이에 따른 유입 지류의 영향에 관한 연구가 필요한 것으로 지적되어 왔다.

본 연구에서는 대청호 내의 본류 수역에서 장기간의 연별 수질 변이 특성을 분석하고, 호수내에서의 상하류에 따른 유수대 (Riverine zone), 전이대 (Transition zone), 정수대 (Lacustrine zone)의 공간 이질성 및 몬순강우의 특성에 따른 계절적 변이 특성을 평가하였다. 또한, 대청호로 유입되는 주요 지천을 선정하고 각각의 유입지점에 대한 영양염류 (TN, TP) 농도를 평가하여 이에 따른 지천에 의한 호수 수질영향 특성을 평가해 대청호의 수질개선 방안을 마련을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

조사 및 방법

1. 조사지 개요 및 조사지점 선정

본 연구에서 분석된 자료의 조사지점은 본류수계 7개 지점 (M1~M7) 및 대청호로 유입되는 금강의 지천 8개 (T1~T8)를 대상으로 하였으며, 세부 지점은 다음과 같다 (Fig. 1). M1은 대청호의 댐을 기점으로 하여 최상류의 영동군에 위치한 호수내 지점을 선정하였으며, M2~M5은 전부 충청북도 옥천군에 위치하고 있으며, M6는 충청북도 보은군 회남면에, M7은 충청북도 청원군 문의면에 위치한 대청호의 대청댐 바로 앞 지점을 선정하였다. 한편, 호수로 유입하는 지천은 T1에서 T8으로, T1은 대청호 최상류에 위치한 봉황천 유입지점에 위치하며, T2 영동천은 상류부에 논공단지가 설치되어 있으며 T3 초강천은 주변이 대부분 숲으로 둘러 싸여 있는 지점으로 인근에 군부대가 위치하고 있는 지점이다. T5 옥천천은 옥천

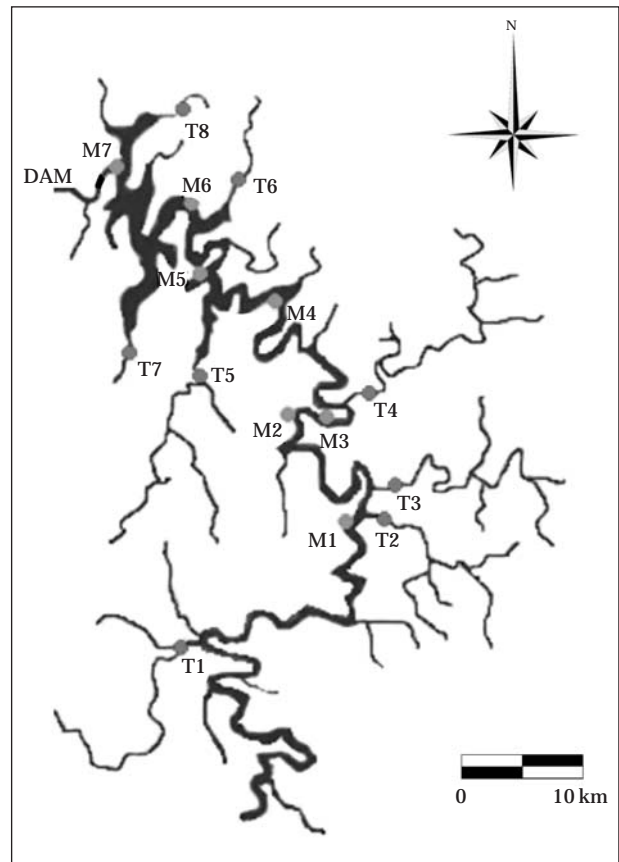


Fig. 1. The study sites of Daecheong Reservoir (M1 to M7) and its tributaries (T1 to T8).

하수종말처리장이 인근에 위치하고 있다. 최하류인 T8은 품곡천으로서 댐에서 가장 가까운 유입하천 중 하나를 지점으로 선정하여 유입지천의 영향을 평가 하였다.

2. 자료분석 및 방법

대청호의 이화학적 수질 자료를 분석하기 위하여 2001년 1월부터 2010년 12월까지 10년간의 본류 및 유입지천에 설정된 총 15개 지점에서 측정된 환경부의 물환경정보시스템 자료를 이용하였다. 자료 분석에 이용된 수질 변수는 생물학적 산소요구량 (Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량 (Chemical oxygen demand, COD), 총인 (Total phosphorus, TP), 총질소 (Total nitrogen, TN), 부유물 (Suspended solids, SS), 전기전도도 (Electric conductivity, EC) 및 엽록소 (Chlorophyll-*a*, CHL)이며, 영양염류의 자료를 이용해 TN:TP 비를 산정하여 제한 영양염류 특성 및 각 수질 변수 수치의 시·공간적 변화양상을 분석하였다. 대청호 연 강우량의 2/3

이상이 장마기(집중강우기)에 집중된다는 보고(Bae *et al.*, 2007; Park and An, 2007)와 강우에 따라 유출되는 오염물질 부하가 증가함을 설명한 선행 연구 결과(Sartor and Buchberger, 1997; Kim and Kim, 2004)를 고려하여 수질 자료는 집중강우전기(Premonsoon, P_i: 5~6월), 집중강우기(Monsoon, M_o: 7~8월), 집중강우후기(Postmonsoon, P_o: 9~10월)로 구분하여 계절에 따른 수질특성을 분석하였다.

또한, 대청호 및 금강본류 7개 지점을 댐으로부터 거리에 가장 멀고 수심 5m 이내의 비교적 상류지역에 위치하는 유수대(Riverine zone, R_i: M1~M3), 호수 중류지역에 위치하며 수심 5~30m의 전이대(Transition zone, T_i: M4~M6), 댐에서 가장 가깝고 수심도 30m 이상 되는 하류지역에 해당하는 정수대(Lacustrine zone, L_i: M7)로 구분하여 공간적 수질특성을 분석하였다(Bae *et al.*, 2007). 또한, 지천이 유입되는 만입 수역 하천(Tributary Streams, T: T1~T8)의 연·월별 수질특성을 분석해 지류의 유입에 의한 대청호의 수질 변화양상을 분석하였다. 유입 지천에서 측정된 총질소(TN), 총인(TP)이 호수 내의 엽록소(CHL) 및 TN:TP비에 미치는 영향 분석하기 위해 로그 전환(Log-transformation)하여 선형화한 후, SPSS 통계 패키지(Windows version 18.0; SPSS, 2009)를 이용해 Park and An (2007) 및 An *et al.* (2008)에 따른 회귀분석 및 부영양화지수의 경험적 모델(Empirical model)을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 호수내 수역의 시·공간적 수질 역동성

본류 수역의 연평균 수질 자료 분석결과에 따르면, 질소(N) 및 인(P)의 농도는 호수내 내에서 상류(M4)에서 댐(M7)으로 갈수록 점진적으로 거리에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 이런 특성은 Han *et al.* (2010)이 제시한 바와 같이 영양염류 중 총인(TP)의 경우 상부로부터 유입되는 과정 중 침전효과(Sedimentation)에 의한 감소가 나타나는 것으로 보이며, 질소(N)의 수치 감소 역시 오염부하의 감소에 따른 것으로 사료된다. 엽록소(CHL)의 경우, 식물성 플랑크톤의 생장은 영양염류(TN, TP)가 높은 상류역(유수대, M1~M3)보다는 중류역(전이대, M4)에서 최고치를 보였다. 이는 상대적으로 중류역이 유수대(상류역)에 비해 유속이 느려 식물성 플랑크톤의 생장에 더 적합하고, 상류역으로부터 유입되어 풍부한 용존성 인(Dissolved phosphorus)을 조류가 이용 가능하며,

또한 Kim *et al.* (2003) 및 Kimmel and Groeger (1984)이 제시한 바와 같이 조류의 1차 생산력에 직접적 영향을 미치는 광 조건(Available light)의 향상으로 기인된 것으로 사료된다. TN:TP 비를 제외한 모든 변수는 금강상류역(M1~M3)에 비해 하류역으로 갈수록 감소하는 경향을 보여 Kimmel and Groeger (1984)가 제시한 인공호의 상하류 간의 공간이질성(Longitudinal gradient) 가설과 일치하였으나, 상류역(M1~M3)에서는 상대적으로 불규칙한 수치 변이를 보였다. 이는 호소성 특징을 뚜렷하게 보이는 M4~M7지점과는 달리 상류역(M1~M3)는 하천 성향을 보이고 있는 것으로 사료되어 중하류역과는 수리·수문학적 특성 차이가 뚜렷하게 나타났다.

본류를 종적 구배로 구분한 수질 분석 결과는 Fig. 3과 같다. 3개의 각각 다른 Zone 별 TN과 TP는 외국 인공호들과 마찬가지로 뚜렷한 Zonation 특성을 보였다(Kimmel and Groeger, 1984). 영양염류(TN, TP)는 종적 구배에 따라 유수대에서 정수대로 가면서 뚜렷하게 감소하고 있는 것으로 나타났다. 한편, 수체내 유기물 지표인 CHL 및 BOD는 정수대에서 가장 높게 나타나고 있었다(Fig. 3). CHL은 유수대에서 최저치를 보이고 있는데 이는 영양염류 농도는 높으나, 유속이 상대적으로 빨라서 Shin *et al.* (2003)이 제시한 바와 같이 조류가 이용 가능한 용존인이 상대적으로 적은 것으로 판단된다. 또한 무기성 부유물(Inorganic suspended solids)의 높은 농도가 투명도 감소에 영향을 주고 있어, 수체내 광조건 악화로 인해 조류 감소가 유발되고 있는 것으로 사료된다. 이와 반대로 전이대에서는 유속이 느려지고, 무기성 부유물 농도가 감소하면서 광조건이 회복되고 이에 따라 조류 생체량도 최대값을 보였다. 또한 사멸된 조류 및 유기물에 대한 미생물의 활동도 전이대에서 활발해져 BOD가 상승하는 것으로 사료된다. 대청호 부근의 정수대에서는 투명도는 증가하였으나 TP가 가장 낮게 나타났는데, 이로 인한 인 결핍현상(P-limitation)에 따라 식물성 플랑크톤 생장이 감소하여 엽록소 농도가 낮아진 것으로 판단된다(Bae *et al.*, 2007; Han *et al.*, 2010). 대청호의 지점들에서 CHL 농도 수치에 의거한 영양도(Trophic state)평가에 따르면, US EPA (1976) 및 OECD (1982)의 CHL 부영양(Eutrophic)호의 분류 기준인 25 µg L⁻¹ 및 10 µg L⁻¹보다 낮게 나타나 중영양호(Mesotrophy)로 판정되었다. 유기물의 지표인 COD는 상하류 간의 공간적 측면에서 TN, TP와 유사한 경향을 보였는데, 이는 부유물의 침강효과에 의한 결과로 사료되었다. 호수내의 모든 지점에 대한 TN:TP 비에 대한 분석에 따르면, 모든 값들은 평균 60을 상회하여 인(P)에 의해 1차 생산력이 조절되는 것으로 나타나

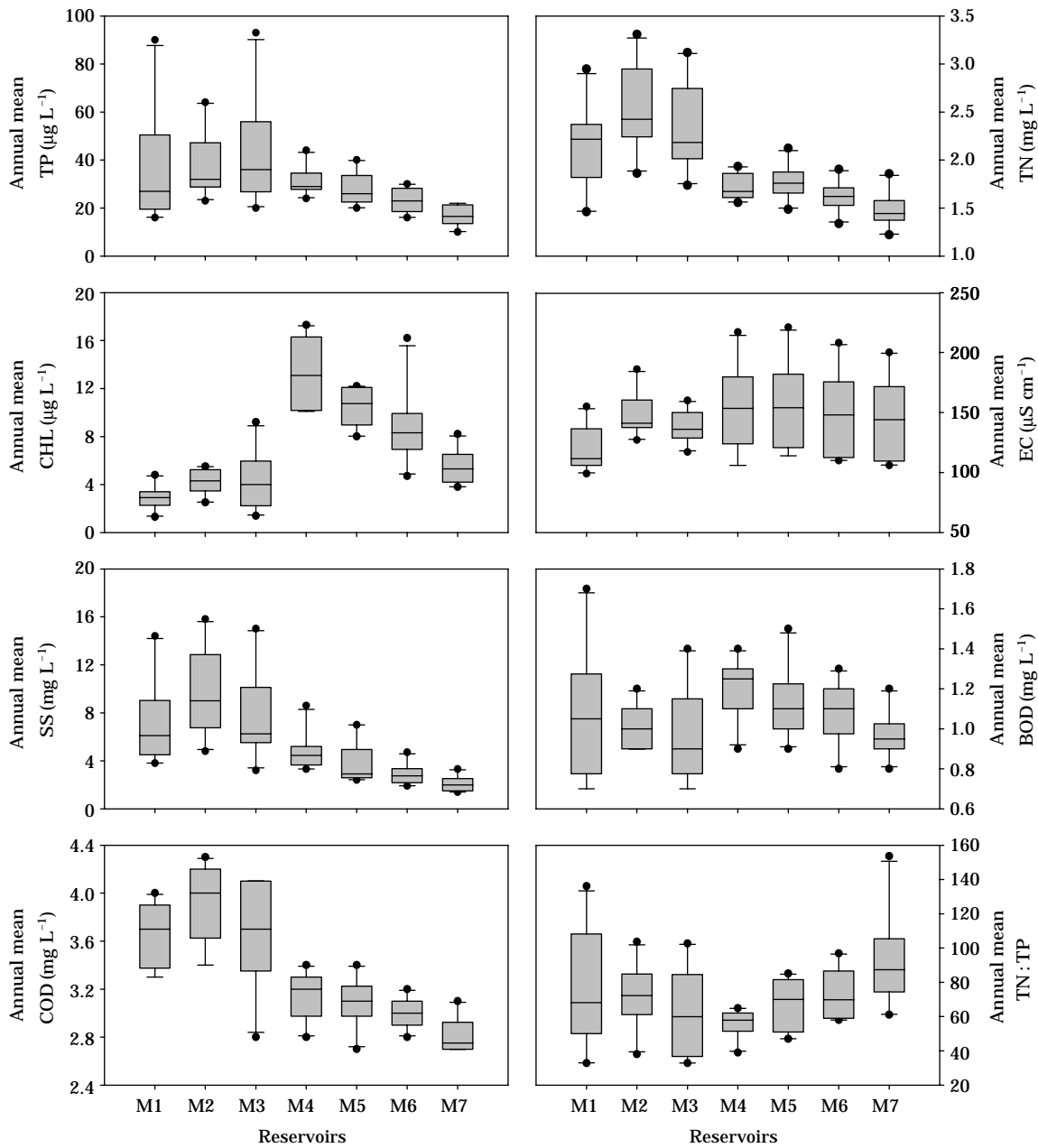


Fig. 2. Spatial variations of annual mean water quality of in seven in-reservoirs within the watershed of Daechung Reservoir.

Forsberg and Ryding (1980)의 인 결핍 호수에서의 가설을 지지하였으며, 정수대에서는 TN : TP 비가 최대치를 보여 인 농도가 가장 심하게 제한요인으로 작용하는 것으로 평가되었다.

조사지점 중 전이대 및 정수대에 위치한 호소성향지점들 (In-reservoir sites, M4~M7)과 댐으로부터 더 먼 거리에 위치한 하천성향지점들 (Inflowing river sites, M1~

M3)에서 월별 수질변이 특성은 Fig. 4와 같다. 하천성향지점에서는 집중강우기인 8월에 TP가 $377 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으나, 호소성향지점에서는 7월에 $165 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 최대치를 보였다. 한편, 하천성향지점들의 TN은 3월 최대치 (8.52 mg L^{-1})를 보였으며, 호소성향지점들의 TN은 본류에 비해 상대적으로 낮은 수치를 보였고, 최대치는 8월 (3.76 mg L^{-1})로 관측되었다. 이러한 결과는 지

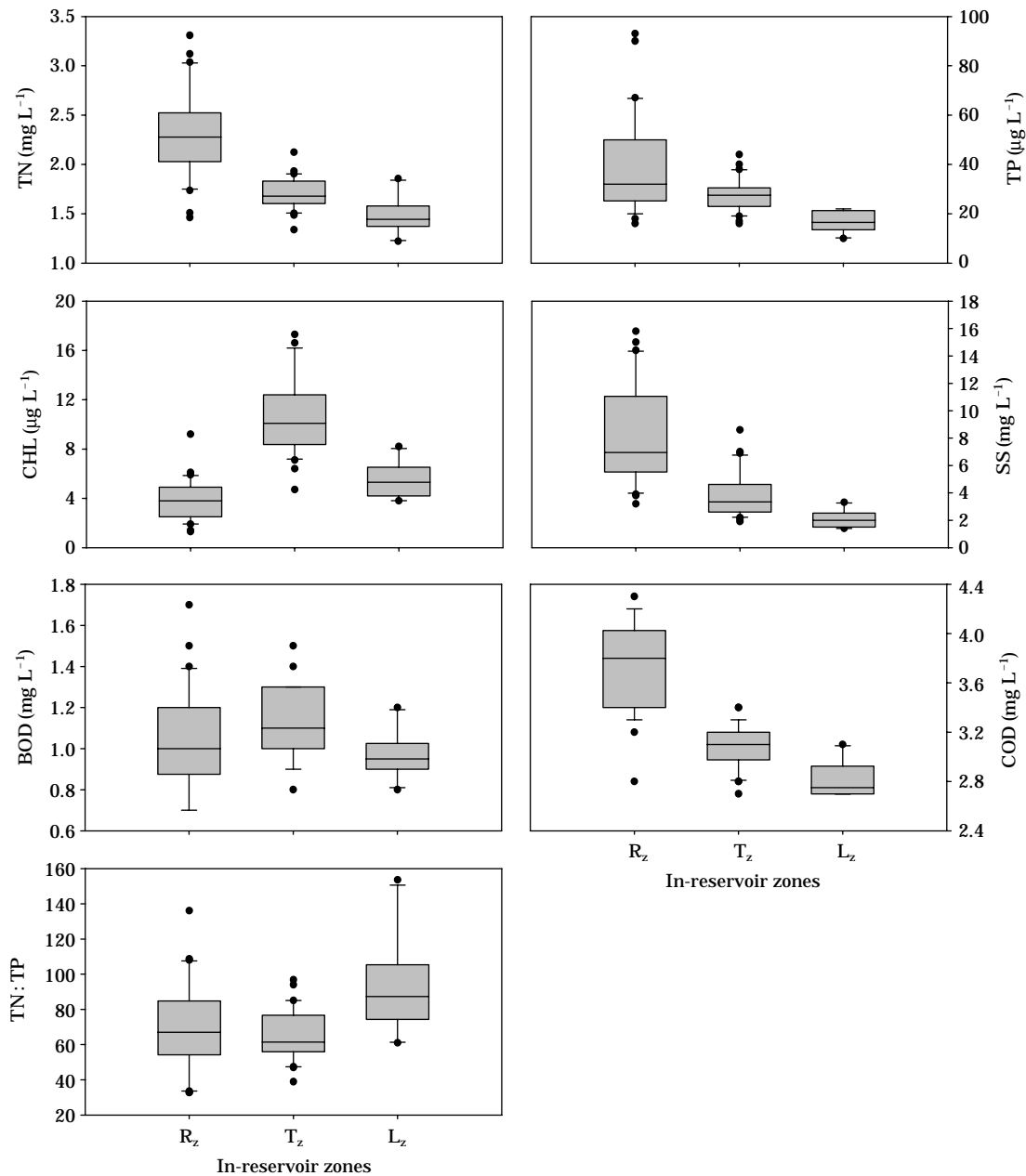


Fig. 3. Spatial variations of water chemistry in the riverine zone (R_z), transition zone (T_z), and lacustrine zone (L_z).

천과 비점오염원 등의 영양염류 외부 유입에 의해 하천 성향지점이 영향을 많이 받고, 호소성향지점들은 하천성향지점에서 유입되어온 호수내부의 영양염류에 영향을 받는 것으로 보고한 Kim and An (2010)의 연구 결과와 유사하게 나타났다.

호소성향지점에서 전기전도도는 집중강우전인 1~6월에서 높은 값을 보이고 집중강우기와 집중강우 후인 9, 10월에 최저치를 보여 강우로 인한 이온의 희석현상에

의한 것으로 사료된다 (Kong *et al.*, 2009). 호수내 제한요인의 평가지표로서 TN:TP 비는 대부분 88 이상의 수치를 보여 이미 질소가 과잉공급 상태인 것으로 나타났다 (Park and An, 2007). 하천성향지점은 TP 월별 변화와 유사하게 겨울인 12월과 1월에서는 수치가 높게 나타났으나, TP가 7, 8월이 증가한 반면, TN:TP 비는 동일시기에 감소해 TP에 영향을 받는 겨울과는 달리 여름은 강우에 의한 희석효과가 TN:TP 비에 더 큰 영향을 미치는 것

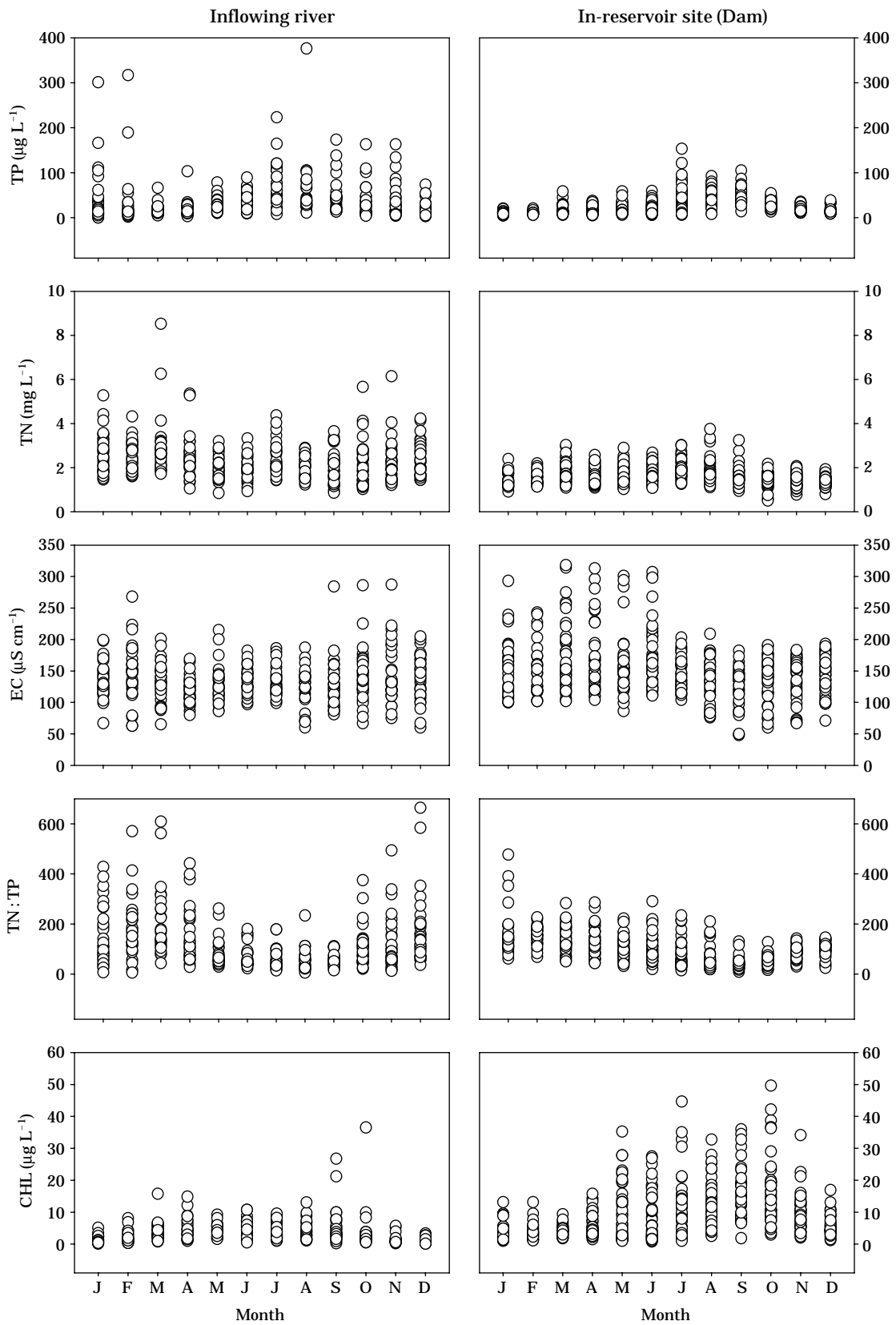


Fig. 4. Monthly patterns of water chemistry in the inflowing up-river vs. in-reservoir site (Dam).

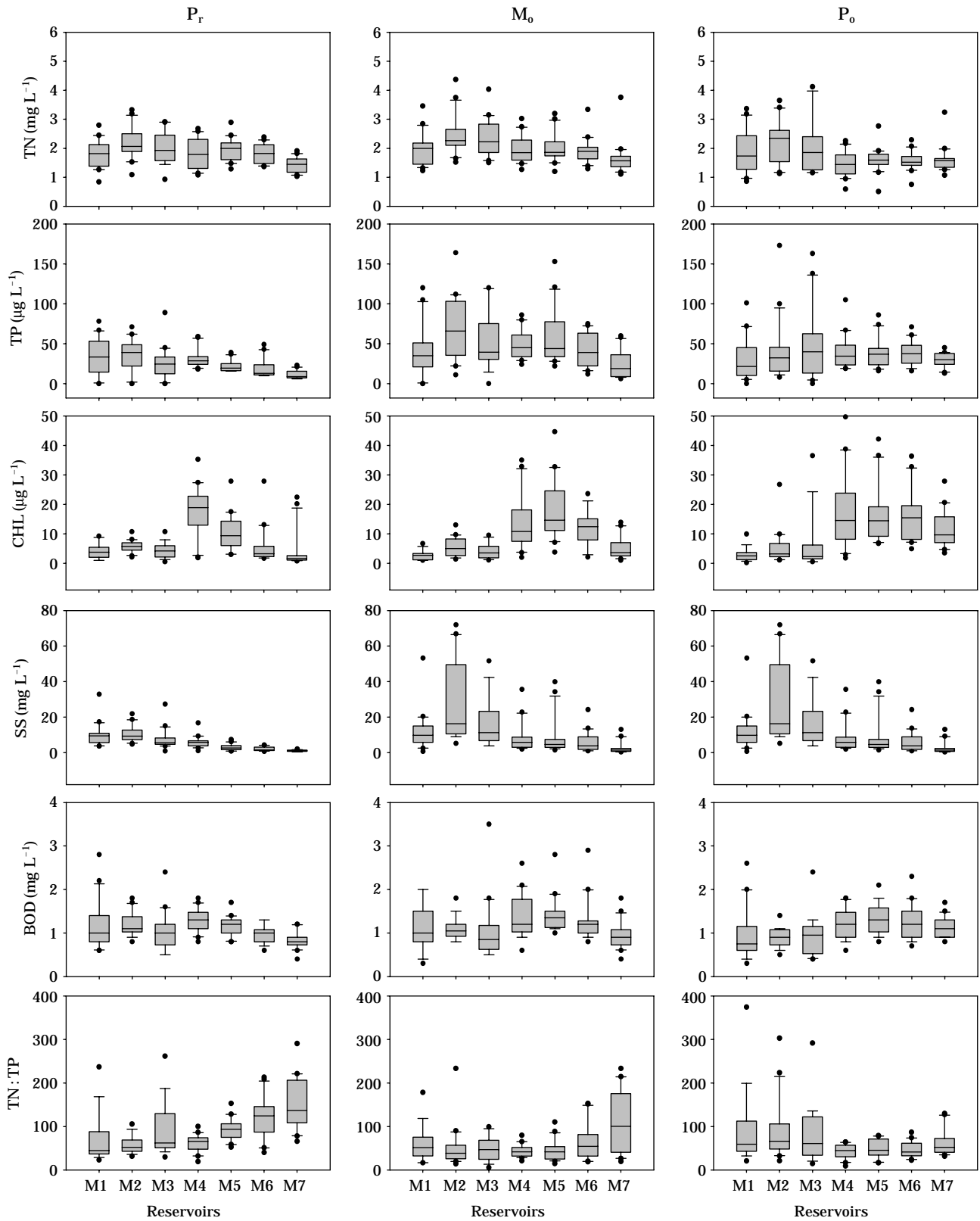


Fig. 5. Seasonal variations of water quality during the premonsoon (P_r), monsoon (M_o), and postmonsoon (P_o) in seven in-reservoir sites of Daechong Reservoir.

으로 나타났다. 호수성향지점들의 경우 하절기 하천성향 지점의 TN:TP 비와 마찬가지로 TP의 월별 변이와 관련성이 낮은 것으로 나타나 1월에 최저치를 보인 뒤, 점차 감소해 가을인 9, 10월에 최저치를 보이고 있었다. 정수대의 TN:TP 비는 유입된 유량에 의해 결정되는 것으로 사료된다. CHL은 전반적으로 유수대에 비해 정수대의 수치가 높고(Yeon *et al.*, 2010), 계절적으로 여름에 높은 수치를 보여, 여러 연구 결과에서 우려한 여름철 조류 대발생이 이와 연관되어 있는 것으로 사료된다(Kim *et al.*, 2003; Jung *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2005; Park and An, 2007). 이와 더불어 정수대의 CHL 변화양상은 TP의 변화양상과 유사한 것으로 나타나 정수대의 CHL의 수치는 TP의 영향을 받는 것으로 사료되며, 이는 Kong *et al.* (2009)의 연구결과에서와 같이 여름철 대청호의 조류 발생 예방에 TP 관리가 중요한 인자로 작용할 것으로 사료된다.

하절기 집중강우 영향을 분석하기 위해 본류유역의 수질을 분석한 결과에 따르면, TN은 집중강우 후에 최저치를 보인 An and Yang (2007)의 연구 결과와 유사하게 소폭 감소하는 경향을 보였으나, 댐에서 가까운 지점일수록(M6~M7) 변화폭은 미미하게 나타났다(Fig. 5). 강우에 의한 TN의 감소 현상은 Kim and An (2010)의 연구결과에서 제시한 바와 같이 강우에 의한 질소농도의 희석효과로 인한 현상으로 추정되지만 본 연구에서는 명확하게 나타나지는 않았다. TP는 대청호 상류에서 하류로 갈수록 농도구배(Longitudinal gradient) 현상이 뚜렷하고, 집중강우기인 7, 8월에 TP 유입이 최고치에 달하며, 집중강우 후 강우량 감소에 따라 인의 농도도 함께 감소하는 모습을 보여, 인 농도는 질소에 비해서 강우에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 전반적으로 TP와 TN과 같은 영양염류의 수치가 상대적으로 높았던 상류, M1~M3에 비해 중류, M4~M6에서 수치가 높은 것으로 나타났고, 이는 앞에서 제시한 바와 같이 상류에서 빠른 유속 때문에 인의 수체류시간이 감소하여 용존성 인(Dissolved phosphorus)가 감소하고, 조류가 이용 불가능한 입자성 인(Particle phosphorus)의 농도가 높아졌기 때문에 상대적으로 중류에 비해 엽록소의 양이 적게 나타난 것으로 판단된다(Park *et al.*, 2005). 더불어 M5 이후로 하류로 갈수록 CHL이 감소하는 경향은 유량 증가에 따른 희석효과에 의한 영향으로 사료된다.

호수의 본류 수역에서 하절기 집중강우에 따른 부유물의 농도는 집중강우 전 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보이거나(Fig. 5), 집중강우기간인 7~8월에 SS의 농도는 급격히 높아지는 것으로 나타났다. 이는 다른

인공호(중주호, 소양호, 안동호, 용담호, 주암호, 합천호, 황성호, 부안호)에서의 SS 역동성 경향과 아주 유사하게 나타났다(Han *et al.*, 2010). 특히, M2 지점에서 SS의 변화폭이 상대적으로 높게 나타난 것은 집중강우기에 인근 상류의 비점오염원이 산재된 수계로부터 부유물의 유입이 증가된 것으로 나타났으며, 하절기 집중강우 동안 상류로부터의 유기물 유입과 토양의 무기성 부유물의 대량 유입으로 인한 탁류 때문으로 사료되었다(Kang and An, 2006). 한편, M2 지점과 함께 상류로 분류된 M1의 SS의 변화폭은 적은데, 이는 M1 주변이 산림으로 이루어져 토양 유출이 상대적으로 적어 SS 농도가 낮은 것으로 나타났다(Kim and An, 2010). BOD는 강우에 따른 변동은 적은 것으로 나타나 An and Yang (2007)의 연구와 유사한 결과를 보였다. TN:TP 비는 집중강우 전기 및 집중강우 기간에는 상류에서 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 집중강우 후 하류의 수치가 하락하는 경향을 보였다. 집중강우 이후 상류에서는 TN:TP 비가 증가 하였는데, 이는 기존의 타 연구들처럼 강우 감소에 따라 유입인 농도가 감소한 결과로 나타났다(Downing and McCauley, 1992).

2. 유입 지천의 호수수질 영향

호수로 유입되는 8개 유입지천에서의 연평균 수질분석에 따르면, 총질소(TN)와 총인(TP)은 최상류에 위치한 유입지천, T1과 T2에서 뚜렷하게 높은 수치를 보였다(Fig. 6). 최상류의 2개 유입지천에서 영양염류(TN, TP)뿐만 아니라 COD 및 CHL에서 높은 값을 보였으며, 특히 T1의 경우 유기성 부유물(Organic matter)의 지표인 BOD와 COD뿐만 아니라 TN 및 TP도 상대적으로 높은 수치를 보였다. 이는 충남 금산군의 도심을 관통하면서 오염부하가 가중된 상태로 봉황천에 합류하는 금산천의 영향 때문으로 판단된다. T2에서는 상류의 농공단지과 같은 점오염원 외에 해당 지점으로 합류하는 지천의 폭이 넓고 유속이 느려 물이 정체하는 현상을 보여 실트와 같은 퇴적물을 많이 함유하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 호수내 수질 변화와 비교해 볼 때, 이들 하천수의 호수내 유입이 호수 수질에 직접적으로 크게 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 하지만, 호수내 수질에 직접적으로 영향을 주는 유입지천은 옥천천인 T5로서, 이 지천에서는 TN, TP 외에도 EC, BOD, COD 등 모든 수질변수들에서 수치가 높게 나타나(Fig. 6) 대청호의 주요 오염원일 가능성이 높은 것으로 사료되었으며, 본 옥천천은 옥천 하수처리장에 의한 영향을 직접적으로 받

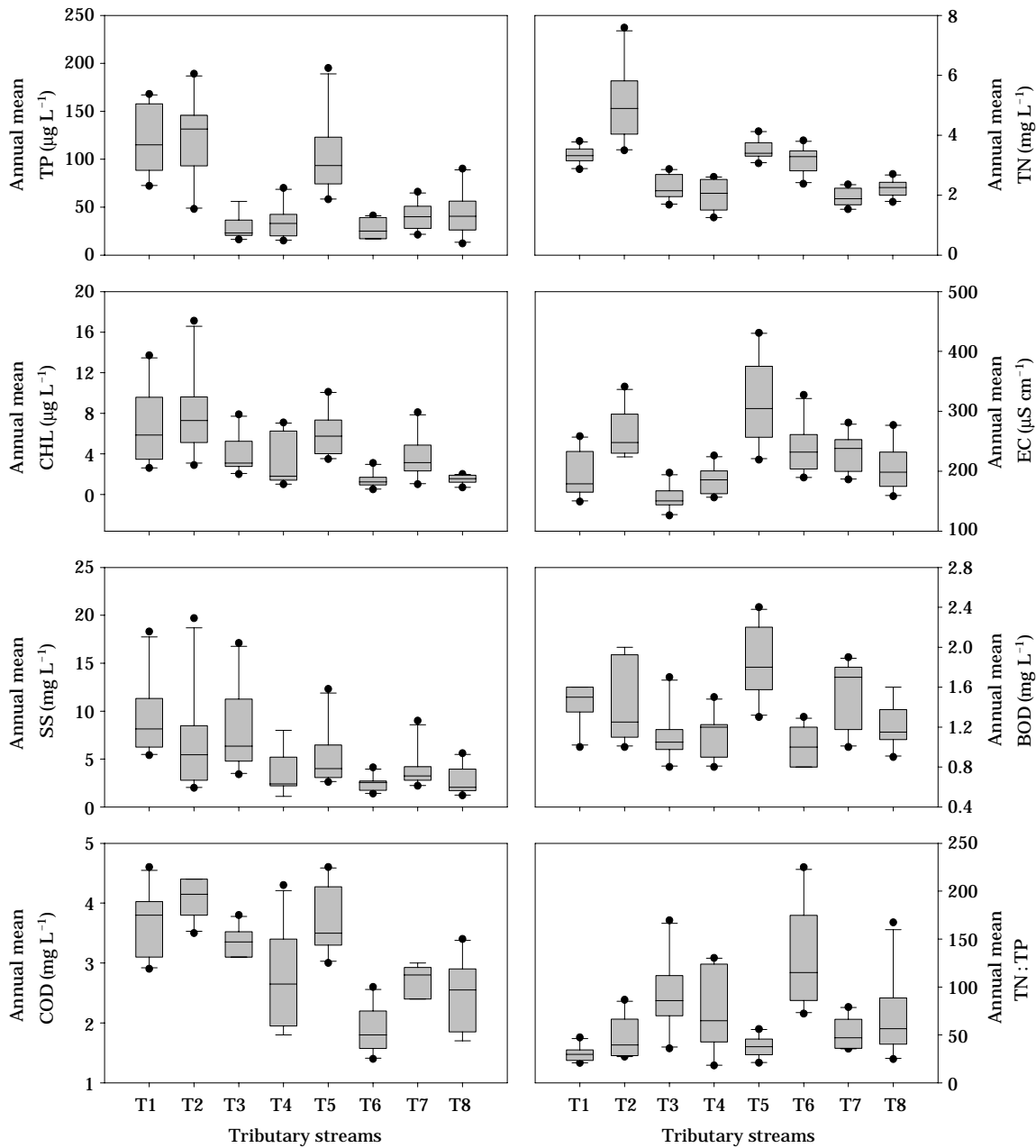


Fig. 6. Spatial variations of the annual mean water quality of in eight tributary streams within the watershed of Daecheong Reservoir.

아 이들 배출수(Effluents)에 의한 호수영향이 있을 것으로 사료되었다(Oh *et al.*, 2004). 상류부의 유입하천인 T3, T4에서는 TN, TP가 낮게 나타나 호수에 직접적인 영양염류 부하(Load)는 낮은 것으로 나타났는데, 이런 특성은 본 유입하천의 토지이용도 측면에서 산림(Forest) 지역에 해당하기 때문에 상대적으로 점/비점오염원이 부재하기 때문으로 판단된다. 또한, 본 유입 하천들 중 T3는

군부대에서 흘러나오는 유입수 외에 뚜렷한 오염원으로 추정될 만한 것은 없는 것으로 보고되어있고(An and Choi, 2006), 군부대에서 흘러나오는 유입수도 유량이 적어 영향은 미미한 것으로 사료된다.

집중강우에 의한 유입지천의 수질 특성을 분석한 결과, T2는 다른 지천에 비해 대부분의 수질변수에서 비교적 높게 나타나, 상류에 위치한 영동농공단지의 영향이 있을

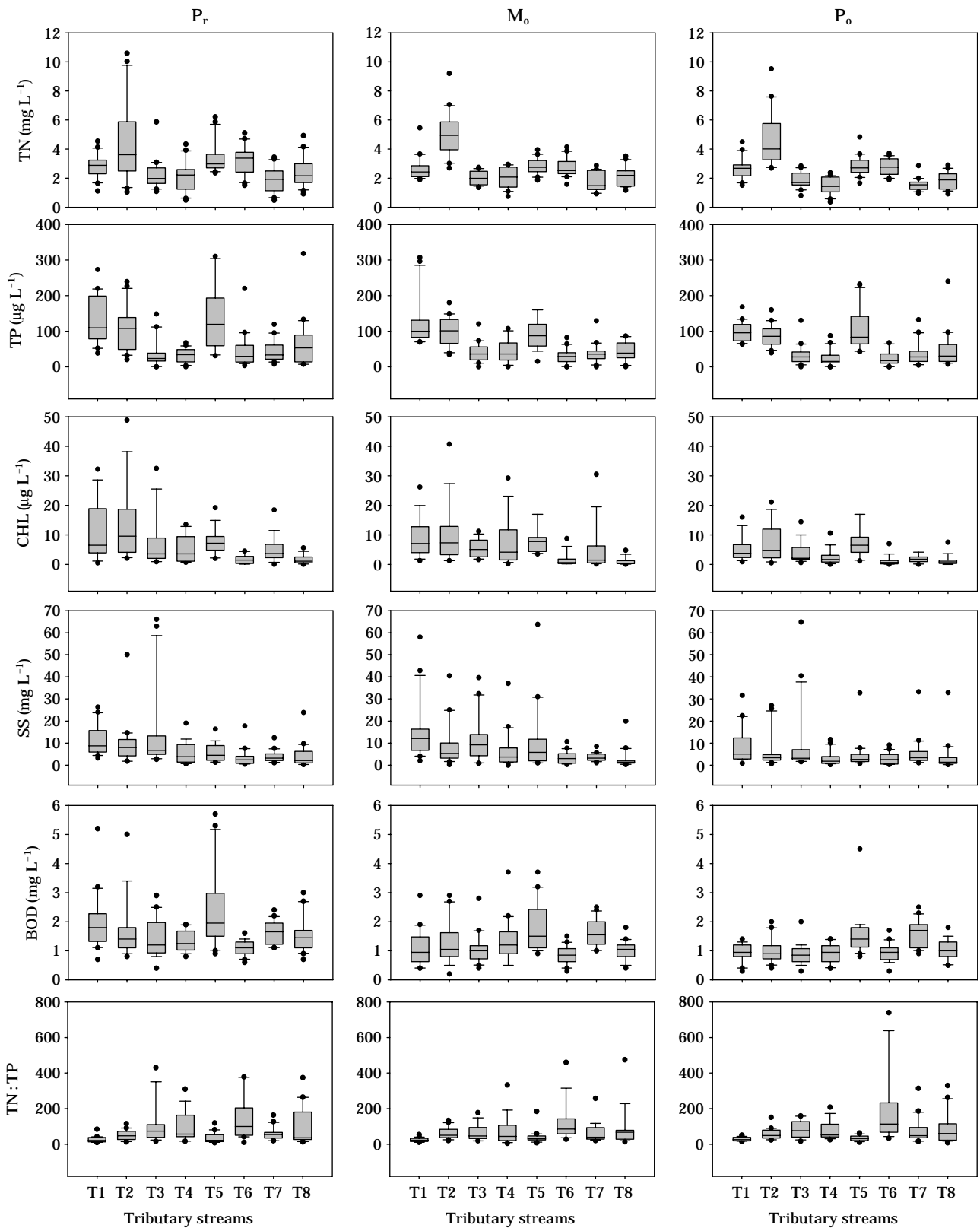


Fig. 7. Seasonal variations of water quality during the premonsoon (P_r), monsoon (M_o), and postmonsoon (P_o) in eight tributary inflowing streams within the watershed of Daechong Reservoir.

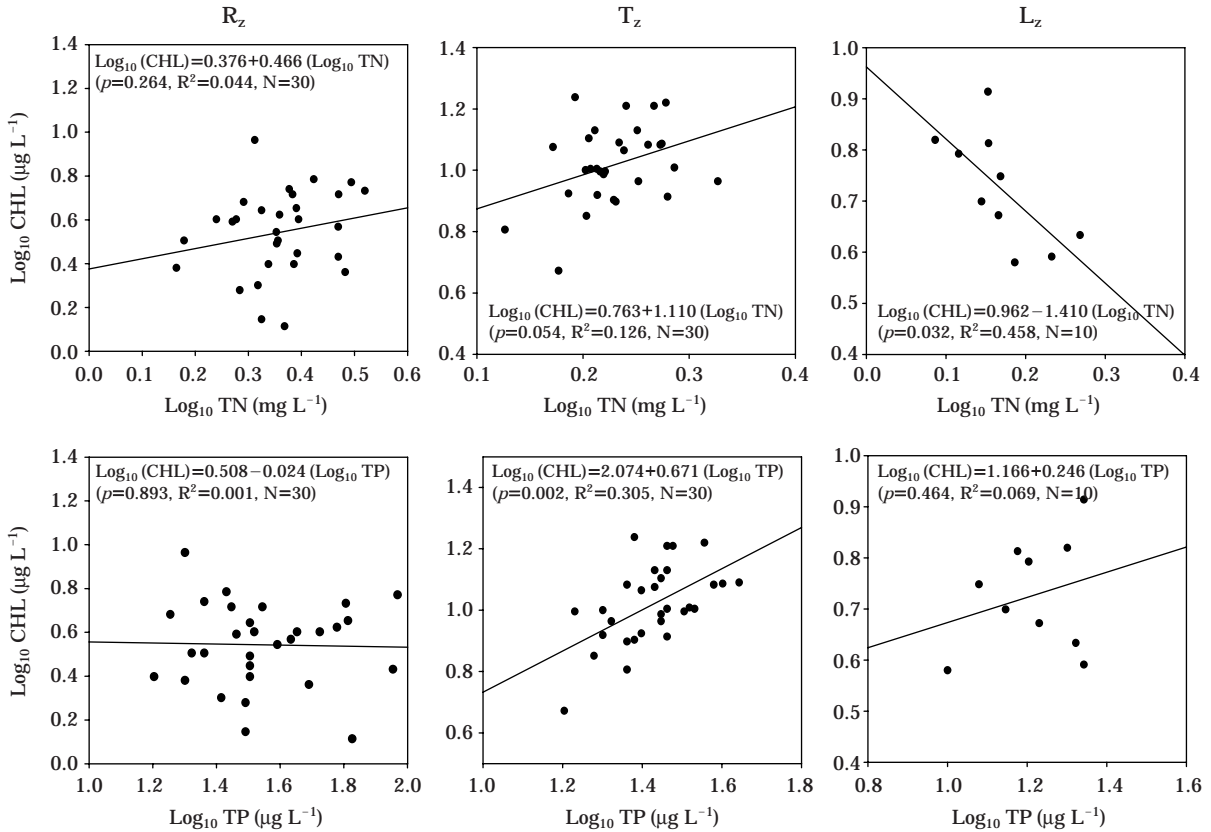


Fig. 8. Empirical relations of chlorophyll-a (CHL) to nutrients of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the longitudinal zonation of riverine (R_z), transition (T_z), and lacustrine zone (L_z).

것으로 사료된다. 반면, T1은 T5보다 비교적 낮은 수치를 보여 선형 연구 (Lee, 1999)와 비교했을 때 T5의 수질이 악화된 것으로 보였다. TP는 문순강우에 따라 유입 하천 부에서 일시적인 희석효과 (Dilution effect)를 보이는 것으로 판단된다 (Lee *et al.*, 2009). 최상류 지역에 위치한 T1과 T2에서는 집중강우 전에 상대적으로 높은 값을 보였다. 이는 농공단지와 축산폐수 처리시설로부터 나오는 배출수의 영향으로 판단된다 (Lee, 1999). 집중강우 후기에는 강우에 의한 희석효과로 인해 상대적으로 상류지역이 영향을 받고 있는 것으로 사료된다. 한편, 모든 지점에서의 질소 농도가 인 농도보다 상대적으로 높게 나타난 현상은 수계 내 오염원의 영향 때문이라기보다 우리나라 토양 특유의 지질학적 특성과 대기의 질소강하, 비료의 과잉 사용 등으로 인해 발생한 것으로 사료되었다 (Kim, 1998; Lee *et al.*, 2002; An and Shin, 2005). 집중강우 전, 중, 후에 CHL 농도는 상류 유입 지천에서 호수의 하류 지천으로 갈수록 소폭 감소하는 경향을 보였고, 집중강우 전과 후에 호수 중류 유입 지천인 T5에서 상대적으로 높

은 값을 보였는데, 이는 지천 내의 수화현상을 야기하는 특정 조류종 (남조류)이 높은 출현빈도로 나타난 것에 따른 결과로 사료된다 (Kim and Lee, 2011). 지천의 부유물질은 집중강우 전과 후에 비해 집중강우 기간 중의 수치가 소폭 증가한 것으로 나타났는데, 이는 강우에 의한 무기성 부유물이 빗물에 씻겨 수계에 유입되었기 때문으로 추정된다 (Kang and An, 2006). 이런 무기성 부유물의 증가는 하천에서의 탁도 증가를 유발하고, 이는 1차 생산자의 주요 역할을 담당하는 조류 및 식물성 플랑크톤에 광제한효과 (Light limitation)를 가져올 수 있어 (Dodds *et al.*, 1998), 강우에 의한 TP의 일시적 희석효과와 함께 집중강우 중 수계 내 CHL의 농도가 감소하는 원인으로 작용한 것으로 사료된다. 반면, 유기물 오염 지표로 알려진 BOD의 경우, 강우에 의해 소폭 감소하는 경향을 보였는데, 이는 Han and An (2008)의 연구결과와는 다르게 나타났다으며, 유량이 증가함에 따라 일시적인 희석효과를 보인 것으로 판단되며 (Lee *et al.*, 2009), TN:TP 비는 모든 지점에서 17 이상을 보여 인이 제한 요인 (Limiting fac-

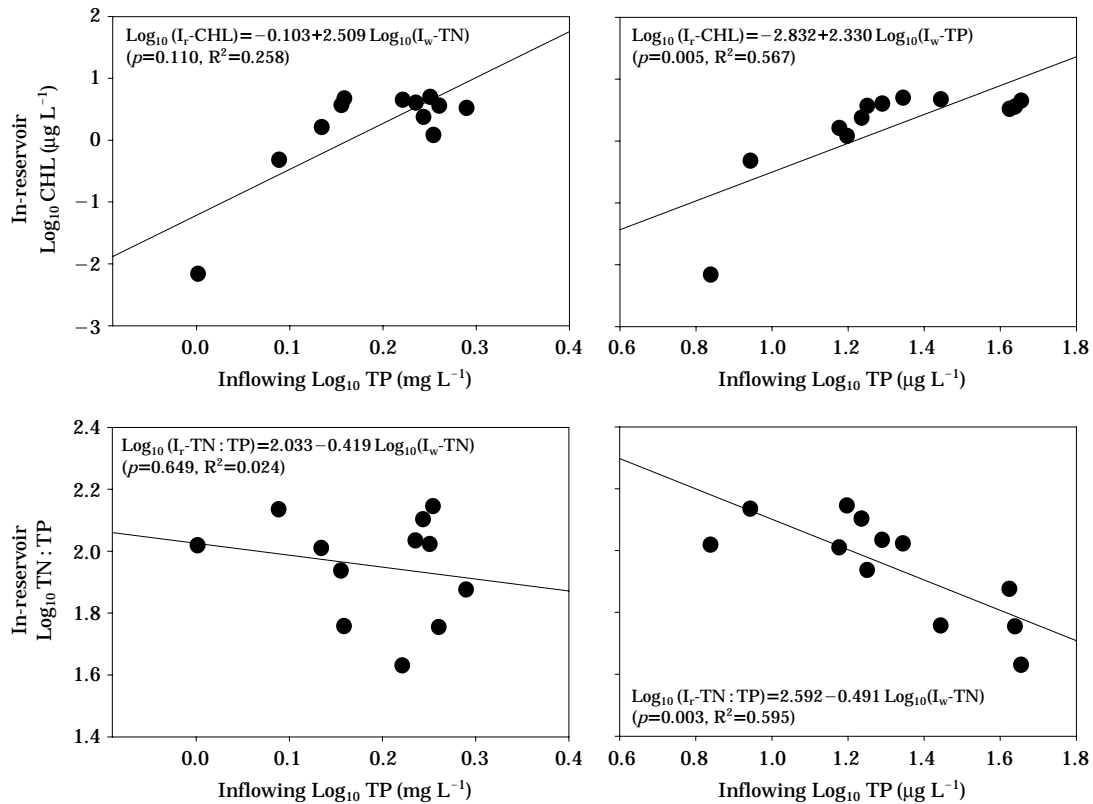


Fig. 9. Regression analysis of in-reservoir chlorophyll-a (CHL) to the inflowing stream nutrients (TN, TP), along with TN: TP ratios against TN and TP.

tor)인 것으로 나타났다 (Forsberg and Ryding, 1980).

3. 총질소 (TN), 총인 (TP) 및 엽록소 (CHL)의 경험적 모델

대청호 내의 TN, TP와 CHL의 관계를 분석하기 위해 Log-변환한 자료인 유수대 (R_z), 전이대 (T_z) 및 정수대 (L_z)의 경험적 모델 1차 회귀식은 다음과 같다 (Fig. 8).

$$R_z: \text{Log}_{10}(\text{CHL}) = 0.376 + 0.466 (\text{Log}_{10} \text{TN})$$

$$T_z: \text{Log}_{10}(\text{CHL}) = 0.763 + 1.110 (\text{Log}_{10} \text{TN})$$

$$L_z: \text{Log}_{10}(\text{CHL}) = 0.962 - 1.410 (\text{Log}_{10} \text{TN})$$

$$R_z: \text{Log}_{10}(\text{CHL}) = 0.508 - 0.024 (\text{Log}_{10} \text{TP})$$

$$T_z: \text{Log}_{10}(\text{CHL}) = 2.074 + 0.671 (\text{Log}_{10} \text{TP})$$

$$L_z: \text{Log}_{10}(\text{CHL}) = 1.166 + 0.246 (\text{Log}_{10} \text{TP})$$

호수내에서 CHL의 변이는 유수대 (R_z : $R^2=0.044$, $p=0.264$)와 전이대 (T_z : $R^2=0.126$, $p=0.054$)에서 TN에 의해 통계학적 유의성을 보이지 않았다. 이런 결과는 이전의 다른 선행 연구인 Kim *et al.* (2003), Park and An (2007)

및 Bae *et al.* (2007)의 연구에서도 이와 유사한 결과를 보고하고 있다. 반면, 정수대 (L_z)에서 Pearson 상관계수는 -0.677 로 역상관 관계를 보여, 선행 연구들에서 밝혔듯이 호수내 질소는 조류 생장에 억제효과 ($R^2=0.458$, $p=0.032$)를 가질 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 이러한 결과는 유수대와 전이대의 조사지점 수 ($n=30$)에 비해 조사 구간이 적어 ($n=10$) 나타난 오류일 수도 있어 이에 대한 향후 좀 더 심도 있는 연구가 필요하다. 기존의 연구 결과에 따르면, CHL의 수치는 TP가 가장 큰 영향을 주는 것과 상이한 결과를 보였는데 (Heo *et al.*, 1998; Wetzel, 2001; Lee *et al.*, 2006; Lee and An, 2010), 유수대의 경우 특히 몬순하절기에는 유속이 상승해 식물성 플랑크톤의 세척현상 (Wash-out)이 발생할 수 있고, 영양 염류인 인 (P)보다 광 제한 효과의 영향이 더 클 것으로 사료되었다. 반면, TP는 유수대 ($R^2=0.001$, $p=0.893$)와 정수대 ($R^2=0.069$, $p=0.464$)에서 CHL의 변이를 통계학적으로 유의하게 설명하지 못하는 것으로 나타났으나, 전이대 CHL의 변이는 TP에 의해 31% 설명 ($p=0.002$, $n=30$) 되는 것으로 나타났다 (Kang and An, 2006; Bae *et*

al., 2007).

4. 유입 지천의 영양염류에 대한 호수 반응성

호수내부 (In-reservoir, I_r)로 유입되는 유입지천 (Inflowing water, I_w)의 총인 (TP), 총질소 (TN)에 대한 CHL과 TN:TP 비의 호수 반응성 분석은 다음과 같다 (Fig. 9).

$$\text{Log}_{10}(I_r - \text{CHL}) = -0.103 + 2.509 \text{Log}_{10}(I_w - \text{TN})$$

$$\text{Log}_{10}(I_r - \text{CHL}) = -2.832 + 2.330 \text{Log}_{10}(I_w - \text{TP})$$

$$\text{Log}_{10}(I_r - \text{TN} : \text{TP}) = 2.033 - 0.419 \text{Log}_{10}(I_w - \text{TN})$$

$$\text{Log}_{10}(I_r - \text{TN} : \text{TP}) = 2.592 - 0.491 \text{Log}_{10}(I_w - \text{TN})$$

유입 지천 (I_w)의 TN은 호수내 (I_r)의 CHL의 변이에 통계학적으로 유의성이 없는 것으로 나타났고 ($R^2=0.258$, $p=0.110$), 유입 지천 (I_w)의 TP는 호수내 (I_r)의 CHL의 변이에 통계학적으로 유의성이 있는 것으로 나타났고 ($R^2=0.567$, $p=0.005$). 즉, 지천의 TP 유입은 대청호의 조류 생장에 직접적으로 영향을 주는 것을 의미하였다. 한편, 대청호의 TN:TP비는 지천의 TN과는 Pearson 상관계수 -0.155 로 유의성이 없는 것 ($R^2=0.024$, $p=0.649$)으로 나타난 반면, TP는 Pearson 상관계수 -0.772 로 역상관관계를 보였으며, 호수내의 TN:TP 비는 TN보다는 TP에 의한 영향을 받는 것으로 나타나 결국 TN:TP비는 직접적으로 인 (P)의 농도에 의해 조절되는 것으로 나타났다 (Kim et al., 2003).

적 요

본 연구는 대청호 본류유역 7개 지점과 대청호 유입 지류 8개 지점을 선정하여 2001년부터 2010년까지 측정된 환경부 수질자료를 분석해 시·공간적 변이를 파악하고, 더불어 대청호 유입 지류에 의한 대청호 수질의 영향을 분석하였다. 본류 수역의 연평균 수질 자료 분석결과에 따르면, 질소(N) 및 인(P)의 농도는 호수내 내에서 상류역에서 댐 (M7)으로 갈수록 거리에 따라 1차 함수적으로 감소하는 경향을 보였다. 호수내 유수대 (M1~M3), 전이대 (M4~M6) 및 정수대 (M7)의 TN과 TP는 외국 인공 호들과 마찬가지로 뚜렷한 Zonation 패턴을 보였다. 반면, 호수내 유기물 지표로서 엽록소(CHL)와 BOD는 TN과 TP의 구간별 연속적 감소 패턴과는 달리 전이대에서 최고치를 보였다. 유수대에서는 몬순 집중강우기인 8월에 TP가 $377 \mu\text{gL}^{-1}$ 로서 최대치를 보였으나, 정수대에서는 7월에 $165 \mu\text{gL}^{-1}$ 로서 최대치를 보였다. 한편, 유수대의 TN은 3월 최대치 (8.52mg L^{-1})를 보였으며, 정수대의 TN

은 본류에 비해 상대적으로 낮은 수치를 보였고, 최대치는 8월 (3.76mg L^{-1})에 관측되었다. 집중강우에 의한 이온희석현상은 9~10월에 극명하게 나타났다. 호수내 제한요인의 평가지표로서 이용되는 TN:TP 비는 88 이상으로서 이미 대청호는 질소가 과잉공급 상태인 것으로 사료되었다. 몬순강우에 따라 호수의 수질은 악화되는 경향을 보였으며, TP와 SS가 강우에 가장 민감하게 반응하였고, CHL은 정수대의 변이 폭이 높게 나타났다. 호수내로 유입되는 지천의 영향평가에 따르면, 도심형 하천이자 농공단지와 하수처리장의 영향을 받고 있는 T1, T2 및 호수내에 가장 큰 영향을 줄 것으로 사료되는 옥천천 (T5)의 오염도가 가장 높게 나타났다. 호수의 경험적 모델 분석에 따르면, 호수내에서 CHL의 변이는 유수대 (R_c : $R^2=0.044$, $p=0.264$)와 전이대 (T_c : $R^2=0.126$, $p=0.054$)에서 TN에 의해 통계학적 유의성을 보이지 않았으나, 정수대 (L_c)에서 질소는 조류 생장에 억제효과 ($R^2=0.458$, $p=0.032$)를 가질 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 유입 지천 (I_w)의 TN은 호수내 (I_r)의 CHL의 변이에 통계학적으로 유의성이 없는 것으로 나타났고 ($R^2=0.258$, $p=0.110$), 유입 지천 (I_w)의 TP는 호수내 (I_r)의 CHL의 변이에 통계학적으로 유의성이 있는 것으로 나타났고 ($R^2=0.567$, $p=0.005$). 즉, 지천의 TP 유입은 대청호의 조류 생장에 직접적으로 영향을 주는 것을 의미하였다. 한편, 대청호의 TN:TP 비는 지천의 TN보다는 TP에 의한 영향을 받는 것으로 나타나 결국 TN:TP 비는 직접적으로 인 (P)의 농도에 의해 조절되는 것으로 나타났다. 따라서 호수내의 여름철 TP와 SS 유입을 최소화 시키고, 높은 인이 유입되는 도심형 하천(옥천천)의 수질 개선이 대청호의 수질 개선에 큰 도움을 줄 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR project [과제명: 호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발 (EW42-08-10)]의 지원으로 수행되었기에 이에 감사합니다.

인 용 문 헌

- An, K.G. and I.C. Shin. 2005. Influence of the asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream. *Korean Journal of Limnology* **38**(1): 54-62.
- An, K.G. and J.W. Choi. 2006. Integrated ecological health

- assessments in Cho River. *Korean Journal of Limnology* **39**(3): 320-330.
- An, K.G. and W.M. Yang. 2007. Water quality characteristics in Keum River watershed. *Korean Journal of Limnology* **40**(1): 110-120.
- An, K.G., J.K. Kim and S.J. Lee. 2008. Reservoir trophic state and empirical model analysis, based on nutrients, transparency, and chlorophyll-*a* along with their relations among the parameters. *Korean Journal of Environmental Biology* **26**(3): 252-263.
- Bae, D.Y., E.C. Yang, S.H. Jung, J.H. Lee and K.G. An. 2007. Nutrients and chlorophyll dynamics along the longitudinal gradients of Daechung Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **40**(2): 285-293.
- Borchardt, M.A. 1996. Nutrients. p. 184-227. *In: Algal Ecology* (Stevenson, R.J., M.L. Bothwell and R.L. Low, eds.). Academic Press, NewYork.
- Carlson, R.E. and J. Simpson. 1996. A Coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods. *North American Lake Management Society* pp. 96.
- Cheon, S.U., J.A. Lee, J.J. Lee, Y.B. Yoo, K.C. Bang and Y.J. Lee. 2006. Relationship among inflow volume, water quality and algal growth in the Daecheong Lake. *Korean Journal on Water Quality* **22**: 342-349.
- Chung, S.W. and J.H. Park. 2005. Application of Korea water quality index for the assessment of river water quality in the basin of Daecheong Lake. *Korean Journal of Limnology* **21**(5): 470-476.
- 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. *Water Research* **32**(5): 1455-1462.
- Downing, J.A. and E. McCauley. 1992. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Limnology and Oceanography* **37**(5): 936-945.
- Forsberg, G. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 waste receiving Swedish lakes. *Archives of Hydrobiologia* **89**: 189-207.
- Han, J.H. and K.G. An. 2008. Water quality variation dynamics between artificial reservoir and effected downstream watershed: The case study. *Korean Journal of Limnology* **41**(3): 382-394.
- Han, J.H., J.Y. Lee and K.G. An. 2010. Interannual and seasonal variations of water quality in terms of size dimension on multi-purpose Korean Dam Reservoirs along with the characteristics of longitudinal gradients. *Korean Journal of Limnology* **43**(2): 319-337.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwater; principles, problems and restoration, Chapman and Hall, London. p. 329.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichments. *Limnology and Oceanography* **33**: 796-822.
- Heo, W.M., B.C. Kim, Y. Kim and K.S. Choi. 1998. Storm runoff of phosphorus from nonpoint sources into Lake Soyang and transportation of turbid watermass within the lake. *Korean Journal of Limnology* **31**(1): 1-8.
- Joung, S.H., C.Y. Ahn, A.R. Choi, K.Y. Jang and H.M. Oh. 2005. Relation between rainfall and phytoplankton community in Daechung Reservoir. *Korean Journal of Environmental Biology* **23**: 57-63.
- Kang, S.A. and K.G. An. 2006. Spatio-temporal variation analysis of physico-chemical water quality in the Yeongsan-River watershed. *Korean Journal of Limnology* **39**(1): 73-84.
- Kim, B.C. and Y.H. Kim. 2004. Phosphorus cycle in a deep reservoir in asian monsoon area (Lake Soyang, Korea) and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model [CE-QUAL-W2]. *Korean Journal of Limnology* **37**(2): 205-212.
- Kim, J.M., S.N. Heo, H.R. Noh, H.J. Yang and M.S. Han. 2003. Relationship between limnological characteristics and algal bloom in lake-type and river-type reservoirs, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**(2): 124-138.
- Kim, J.Y. 1996. A study on variation characteristics and correlations of water quality in Daecheong Lake basin. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **5**(6): 763-770.
- Kim, J.Y. 1998. A study on the evaluation and prediction of the eutrophication for the lakes in Korea. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **7**(4): 441-449.
- Kim, O.J. and O.M. Lee. 2011. Phytoplankton community and the evaluation of water quality status in So-ok Stream, the inflowing stream to Daechung Lake. *Korean Journal of Limnology* **44**(2): 113-128.
- Kim, Y.P. and K.G. An. 2010. Characteristics of water quality in Hyeongsan River watershed. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 150-160.
- 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.
- Kong, K.H., J.H. Lee and K.G. An. 2009. The analysis of water quality and suspended solids effects against transparency of major artificial reservoirs in Korea. *Korean Journal of Limnology* **42**(2): 221-231.
- Kwon, Y.H., S.I. Han and J.B. Lee. 2002. Pollution loading in DaeChungHo watershed. *Journal of the Korean So-*

- ciety of Water and Watershed* **16**(5): 581-595.
- Lee H.J. and H.K. Lee. 1987. A study on simple phosphorus budget model for Dae Chung Reservoir. *Journal of Korean Water Pollution Research Control* **3**: 17-29.
- Lee, H.W., K.G. An and S.S. Park. 2002. Long-term annual trend analysis of epilimnetic water quality and their longitudinal heterogeneities in Lake Soyang. *Korean Journal of Limnology* **35**(1): 36-44.
- Lee, J.H. 1999. Management of nonpoint sources in watershed-with reference to Daecheong Reservoir in Korea. *Korean Society of Environmental Impact Assessment* **9**(3): 163-176.
- Lee, J.M., J.J. Lee, J.G. Park, J.H. Lee, C.Y. Chang and S.M. Yoon. 2005. Zooplankton fauna and the interrelationship among cladoceran populations and *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae) during the cyanobacterial blooming season at Daecheong Lake, South Korea. *Korean Journal of Limnology* **38**(2): 146-159.
- Lee, J.W., J.Y. Kim and K.S. Hyun. 2010. Characteristics and correlation of influence factors for eutrophication in Daecheong Lake. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology* **18**(4): 39-46.
- Lee, M.J., J.W. Choi, H.M. Kim and K.G. An. 2009. Analysis of physical, chemical and biological parameters, based on long-term monitoring (2004 ~ 2007), in Daejeon Stream. *Korean Journal of Limnology* **42**(3): 364-373.
- Lee, S.H., Y.S. Sin, N.I. Jang, J.M. Kim, H.K. Kim, Y.G. Cho and J. Jeong. 2006. Trophic state and water quality in major lakes of the Sumjin and Youngsan River systems. *Korean Journal of Limnology* **39**(3): 296-309.
- Lee, S.J. and K.G. An. 2010. Short-term nutrient enrichment bioassays and nutrient limitation in Daechung Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 136-141.
- Macan, T.T. 1961. Factors that limit the range of freshwater animals. *Biological Reviews* **36**: 151-198.
- Macan, T.T. 1974. *Freshwater Ecology*. John Wiley, NY.
- MCT (Ministry of Construction and Transportation). 2001. Long-term plan for water resources. pp. 64-65.
- Moss, B. 1980. *Ecology of fresh waters*, Blackwell Scientific Publications, London.
- OECD. 1982. *Eutrophication of waters: Monitoring assessment and control* OECD. p. 154. Paris.
- Oh, K.H. and Y.K. Koh. 2003. Water quality and pollutions of river waters in Gwangju City. *Journal of the Environmental Sciences* **12**(3): 287-297.
- Oh, Y.T., J.C. Park, D.S. Kim and J.K. Ryu. 2004. Nonpoint pollutants runoff characteristics in Okcheon stream. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(6): 657-663.
- Park, H.J. and K.G. An. 2007. Trophic State Index (TSI) and empirical models, based on water quality parameters, in Korean Reservoirs. *Korean Journal of Limnology* **40**(1): 14-30.
- Park, J.C., J.W. Park, D.H. Kim, J.K. Shin and M.H. Lee. 2005. A comparative study of trophic state in Lake Andong, Korea. *Korean Journal of Limnology* **38**(1): 95-104.
- Sakamoto, M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Archives of Hydrobiologia* **62**: 1-28.
- Sartor, J.D. and S.G. Buchberger. 1997. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering, ASCE* **123**(2): 134-143.
- Shin, J.K., S.J. Hwang and K.J. Cho. 2003. Assessment of water quality in Pyeongtaek Reservoir and its main tributaries. *Korean Journal of Limnology* **36**(1): 38-47.
- SPSS. 2009. SPSS 18.0 KOR for windows. Atlanta: Apache Software Foundation.
- Thornton, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. p. 1-4. *In: Reservoir Limnology; ecological perspectives* (Thornton, K.W. et al. eds.). John Wiley & Sons, New York.
- US EPA. 1976. Water quality criteria research of the U.S. Environmental protection agency. Proceeding of an EPA sponsored symposium, EPA-600 (3-76-079): 185.
- Welch, E.B. and T. Lindell. 1992. Nutrient limitation. p. 34-135. *In: Ecological effects of wastewater*, 2nd. Chapman and Hall Press, London.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and river ecosystem* (3rd. ed.) Academic Press.
- Yeon, I.S., J.Y. Hong, E.Y. Hong and B.J. Lim. 2010. The characteristics and correlation analysis of chlorophyll-*a* data monitored continuously in Daecheong Reservoir. *Journal of Korean Society on Water Quality* **26**(6): 994-999.

(Manuscript received 5 January 2012,

Revised 17 April 2012

Revision accepted 31 May 2012)