

합천호의 장기간 (2002~2017) 부영양화 특성, 경험적 모델 분석 및 몬순강도에 따른 시공간적 이화학적 수질 변이^{1a}

강유진² · 이상재³ · 안광국^{4*}

Long-term (2002~2017) Eutrophication Characteristics, Empirical Model Analysis in Hapcheon Reservoir, and the Spatio-temporal Variabilities Depending on the Intensity of the Monsoon^{1a}

Yu-Jin Kang², Sang-Jae Lee³, Kwang-Guk An^{4*}

요약

본 연구는 합천호에서 2002~2017년까지 16년간의 장기간 동안 수질변수를 이용하여 부영양화 특성, 경험적 모델분석 및 몬순강도에 따른 수질변이 특성을 분석하였다. 장기간의 연별 수질 분석에서 합천호는 중영양 ~부영양 상태로 분석되었고, 계절별 수질분석에서 부영양화 현상은 하절기 이후 심화되는 것으로 나타났다. 장기간의 수질변이 특성은 유역의 점오염원 및 비점 오염원이 크게 변하지 않는 상황 하에서 매년 강우 사상 (집중 강우 vs. 약한 강우) 및 계절적인 강우강도에 의해 조절되는 것으로 분석되었다. 총인(TP), 총질소(TN), 생물학적 산소요구량(BOD) 및 이온 농도변화는 건기해(Dry year)와 홍수해 (Wet year)의 비교분석에서 뚜렷한 차이를 보여 영양염류, 유기물 농도 및 이온농도 변동에 가장 중요한 역할을 하는 것으로 분석되었다. 특히, 수질 변수 중 매년 영양염 지표(TP, TN), 유기물 지표(BOD, COD), 총 부유물질 농도 및 1차생산력의 지표 (Chl-a)는 강수량과 정 상관관계를 보였다. 녹조의 지표인 Chl-a 농도는 총인, 총질소, 및 BOD와 높은 상관관계를 보여, 타 호수처럼 영양염의 과도한 증가시기에 Chl-a농도가 낮아지는 특성과는 차이를 보였다. Log-전환된 총질소, 총인 및 Chl-a에 대한 경험적 모델(Empirical model) 분석에 따르면, Chl-a 농도는 인(phosphorus) 농도에 의해 1차적으로 조절되며, 질소(N)농도는 유의한 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 Log₁₀TN, Log₁₀TP, Log₁₀CHL의 상류, 중류, 하류구간에 대한 공간적 회귀분석에서 총인과 Chl-a는 p < 0.005의 유의적인 상관관계를 나타내었으나 총질소와 Chl-a는 p > 0.005의 결과를 보여, 녹조변성에 대해 인(P)이 핵심역할을 하는 것으로 분석 되었다. 또한, 총질소와 총인 모두 Chl-a와 댐에 가까운 하류구간(Lacustrine zone)에 비해 상류구간(Riverine zone)에서 더 유의적인 결과를 보여, 상류역에서 무기성 부유물의 농도의 영향에 의한 광제한 효과(Light limitation)가 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

주요어 : 인(P), 수질, 부영양화, 경험적 모델, 엽록소-a

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze eutrophication characteristics, empirical model analysis, and variation of water quality according to monsoon intensity in Hapcheon Reservoir for 16 years from 2002 to

1 접수 2018년 12월 26일, 수정 (1차: 2019년 9월 2일), 게재확정 2019년 9월 2일

Received 26 December 2018; Revised (1st: 2 September 2019); Accepted 2 September 2019

2 충남대학교 생명시스템과학대학 생물과학과 학생 Dept. of Biological Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

3 전북지방환경청 화학안전관리단 Chemical Safety Division, Jeonbuk Regional Environmental Office, Jeonju 54872, Korea.

4 충남대학교 생명시스템과학대학 생물과학과 교수 Dept. of Biological Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

a 이 논문은 대전녹색환경지원센터의 2017년도 연구개발사업 지원에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: Tel. +82-42-821-6408, Fax: +82-42-822-9690, Email: kgan@cnu.ac.kr

2017. Long-term annual water quality analysis showed that Hapcheon Reservoir was in a meso-nutrition to eutrophic condition, and the eutrophic state intensified after the summer monsoon. Annual rainfall volume (high vs. low rainfall) and the seasonal intensity in each year were the key factors that regulate the long-term water quality variation provided that there is no significant change of the point- and non-point source in the watershed. Dry years and wet years showed significant differences in the concentrations of TP, TN, BOD, and conductivity, indicating that precipitation had the most direct influence on nutrients and organic matter dynamics. Nutrient indicators (TP, TN), organic pollution indicators (BOD, COD), total suspended solids, and chlorophyll-a (Chl-a), which was an estimator of primary productivity, had significant positive relations ($p < 0.05$) with precipitation. The Chl-a concentration, which is an indicator of green algae, was highly correlated with TP, TN, and BOD, which differed from other lakes that showed the lower Chl-a concentration when nutrients increased excessively. Empirical model analysis of log-transformed TN, TP, and Chl-a indicated that the Chl-a concentration was linearly regulated by phosphorus concentration, but not by nitrogen concentration. Spatial regression analysis of the riverine, transition, and lacustrine zones of $\log_{10}TN$, $\log_{10}TP$, and $\log_{10}CHL$ showed that TN and Chl-a had significant relations ($p < 0.005$) while TN and Chl-a had $p > 0.05$, indicating that phosphorus had a key role in the algal growth. Moreover, the higher correlation of both $\log_{10}TP$ and $\log_{10}TN$ to $\log_{10}CHL$ in the riverine zone than the lacustrine zone indicated that there was little impact of inorganic suspended solids on the light limitation in the riverine zone.

KEY WORDS: PHOSPHORUS, WATER QUALITY, EUTROPHICATION, EMPRICAL MODEL, CHLOROPHYLL-A

서론

우리나라는 북미 및 유럽의 비 몬순지역과는 달리, 하절기 몬순 집중강우 및 산간 지형적 특성은 수자원 공급 측면에서 불균형을 가져오는 것으로 알려져 있다. 이런 계절적, 지역적 특성을 보완하기 위해 우리나라에서는 많은 인공댐들을 건설하여 홍수피해를 경감하고 수자원 확보 및 이용 효율성을 높여왔다. 우리나라와 같이 인위적으로 하천 및 강의 중하류부에 건설되는 인공호는 자연호와의 형성과정이 근본적으로 달라 수질측면에서 자연호에 비해 부영양화 현상이 빠르게 진정되는 것으로 알려져 있다 (Lee & An, 2010). 따라서 안정적인 수자원이 용을 위한 효율적인 수질관리를 위해서는 유역 내의 비점 및 점오염원에 대한 파악도 중요하지만, 수계내의 큰 변이가 없는 상황하에서는 좀 더 연별 수질특성 및 수질에 대한 강수량 및 강우 빈도변이 분석이 부영양화의 특성파악에 중요하다.

우리나라와 같은 지리적 인 상황에서 인공호의 수질 변동에 영향을 끼치는 요인으로는 비점·점오염원 뿐만 아니라 계절에 따른 강수량과 같은 기상학적 작용과 댐으로의 유입·방류량에 의한 수위 증감 등 수문학적 특성이 중요한 요인으로 제안되고 있다(Hwang *et al.*, 2017). 즉, 인공댐 건설은 강수량과 유입량의 상관관계를 보다 낮게 나타나게 하며, 영양염류(Nutrient) 유입 특성, 유속, 호수내의 수체류 시간에 중요한

영향을 미친다. 이는 상류로부터의 유입량 감소에 따른 총인과 총질소의 감소를 나타내지만, 호수 내 수체류 시간을 증가시켜 1차생산력을 상대적으로 증가시킨다는 연구가 보고된 바 있다 (Lee *et al.*, 2008). 이 중 특히 우리나라의 계절적 몬순 강우가 오염원으로부터의 유기물, 영양염류 유입 등을 유도하며 이화학적 수질 특성에 직접적인 영향을 준다고 보고되고 있다 (Park & An, 2007; Lee & An, 2010). 강과 하천 및 인공호에서의 이화학적 수질 변동성에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있으며 본 연구에 이용된 댐 저수지의 경우 매년 7~8월의 강우 집중 현상에 의해 저수지 유역의 용존성, 입자성 물질을 호수 내로 운반하고, 수층혼합(Turnover)을 발생시키는 등 유입되는 수량과 수질의 편차가 매우 크며 강우가 적은 겨울부터 이듬해 봄까지 또한 계절에 따른 변이가 크게 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Park *et al.*, 2005). 또한 선행연구에 따르면, 강우에 의해 변화한 수질 변수는 동시에 관련된 다른 수질변수에 영향을 미친다. 대형 인공호에서의 암모니아성 질소는 강수량과 양적 상관관계를 나타내며 극심한 가뭄이 지속 될 경우에도 증가하고, 수체류 시간 및 전기전도도는 음의 상관관계를 나타낸다고 보고한 바 있다(An, 2000; Hwang *et al.*, 2017).

우리나라 인공호의 수질문제는 1980년대 후반 이후 부영양화 현상으로 나타났고 (Kim *et al.*, 1988), 이를 분석하기 위해 영양상태(Trophic state) 분석은 다양하게 진행되어 왔으며, 판

정 기준으로는 크게 정성적 평가, 정량적 평가, 부영양화 지수에 의한 평가법들을 이용해 왔다 (Jeon, 2016). 본 연구에서 적용된 부영양화지수(TSI)에 의한 평가 방법은 투명도(Transparency), 엽록소-a, 총인 등 밀접한 관련을 보이는 부영양화 변수를 이용하여 2차적 지수를 이용하는 것으로 Carlson(1977)에 의해 제안되었다. 이는 전 세계적으로 호수 관리 목적을 위해 사용되고 있으며 우리나라 인공호의 수질 평가에도 이용되고 있다(Bac et al, 2007). 우리나라에서도 인공 호수들은 대개 십여 년 경과 후 비점오염원, 점오염원에 의해 부영양화가 가속화 되며, 수질을 악화하는 것으로 알려져 있다(Choi et al. 2003). 이런 부영양화 현상에 대한 호수 수질 평가는 단기간의 자료로는 판단의 오류가 커서 장기적인 자료가 필요하며, 시공간적 이질성에 대한 자료 분석이 부영양화도 평가에 중요한 것으로 지적되었다 (Kim et al. 1988). 다변수 수질 평가모델, 오염 부하량 현황 분석, 오염총량관리제 등과 같이 인공호를 관리하기 위한 방안이 기술적·제도적 측면에서 다양하게 연구되고 있다 (Yeom, 2008; Lee and An, 2009). 수처리 공법을 이용한 수질관리 방법 이외에도 수 처리 시설이 없는 인공호수에서는 가을철에 방류한 후 수질이 양호한 시기인 봄철에 담수하는 방식으로 수질관리를 진행하기도 한다. 합천댐의 경우 댐 유역의 탁수발생 대비를 위해 홍수기 전 우려지역 현장조사가 시행되고 있으며, 2008년 자동탁도측정기 시스템이 구축되어 수질관리를 효율적으로 해 오고 있으나 여전히 녹조의 문제 등이 제기되며 장기모니터링 자료 분석의 중요성이 강조되고 있다.

합천호에 대한 종합적인 자료 분석에 따르면, 호수 내 시공간적 수질 및 영양단계(Trophic state)에 대한 평가(Choi et al., 2003), 합천호 상류역의 수질 변화 및 영양염류의 상관성 분석(Cha, 2011), 유기물 거동에 관한 분석(Seong et al., 2011; Lee, 2011), 부영양화의 핵심지표로서 녹조의 초기 발생에 대한 연구(Park and Kwon, 1998) 및 식물플랑크톤의 종 구성에 관한 연구(Kim et al., 1994)까지 다각적으로 진행되어왔다. Choi et al. (2003)의 연구에 따르면, 합천호의 경우 식물성 플랑크톤의 발생은 총질소와 총인에 의한 영양염 인자보다는 수온 및 강수량과 더 밀접한 관계가 있는 것으로 제시하였고, 합천호 내 질소 중 용존성 질소가 전체 질소의 대부분을 차지하는 것으로 보고하였다(Lee et al. 2010). 하절기 강우시에 급격히 증가하는 총인의 농도와 이에 따른 부영양화 발생으로 수질이 해마다 악화되고 있으며, '03년 합천호의 영양단계는 중영양~부영양 상태를 보였다 (Choi et al., 2003). 또한 합천호 상류수계에서의 수질 변수들 간의 상관관계를 분석한 Park and Cha (2013)의 선행연구에 따르면, 합천호 상류수계에서는 생물학적 산소요구량은 총인과 유의한 상관관계를 나타냈으며, 총 부유물질(SS) 또한 높은 상관성을 나타내는 것으로 보여, 강우기의 총 부유물질 농도 증가는 인의 농도 증가에 기여하는 것으로 보고 한 바 있다. 그러나 여전히 합천호의

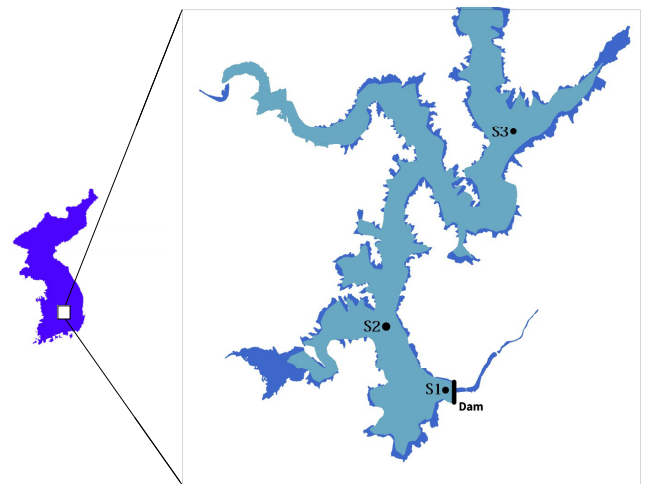
시공간적 수질 특성 및 강우 패턴에 따른 수질 변이 및 이에 대한 경험적 모델 등의 원인 분석에 대한 연구는 극히 미비한 상태이다.

본 연구에서는 합천호에서 장기간의 수질자료를 이용하여 연별·계절별 수질변동 및 부영양화도 변이 특성을 평가하였고, 수질에 영향을 미치는 계절 강우의 영향을 분석하였다. 또한, 부영양화 지수(Trophic State Index, TSI)와 질소, 인, 엽록소의 부영양화 핵심변수를 이용하여 경험적 모델(Empirical model)을 분석하였고, 합천호의 종합적인 영양상태를 진단하고 예측하여 효과적인 수질관리에 기초자료로 활용하고자 하였다.

연구방법

1. 조사 시기 및 조사지점 선정

본 연구는 경상남도에 위치한 합천호로서 인근 시민에게 음용수, 농업용수 등을 공급하는 수체를 대상으로 하였다. 호수 지점은 아래와 같이 환경부(<http://water.nier.go.kr>) 수질 측정망 지점에서 수질변동 특성 자료를 분석하였다(Figure 1.).



S1 경상남도 합천군 대병면 상천리 (댐 앞, 하류역)
 S2 경상남도 합천군 대병면 회양리 (죽죽리 취수구 앞, 중류역)
 S3 경상남도 합천군 봉산면 봉계리 (상류역)

Figure 1. The map showing the sampling stations (S1, S2, S3) in Hapcheon Reservoir.

본 연구 대상인 합천댐은 낙동강 전체의 2.92%로 총 면적이 928.9 km²이고 각각 거창군이 85%, 합천군이 14%를 차지하고 있다. 토지이용의 경우에는 산림지역이 710km²로 점유율이 가

장 높고, 농업지역이 207.5km², 시가지/건조지역이 2.56km²를 포함하고 있다. 합천댐의 수자원은 농업용수로서 약 88.7%가 이용되고 있고, 그 다음으로 생활용수가 7.6%, 공업용수가 3.8%를 차지하고 있다. 2007년 말 기준 합천댐 중권역내 환경기초 시설은 공공하수 처리 시설이 2개소, 소규모 하수처리시설이 10개소, 분뇨 처리시설이 1개소, 매립 시설이 2개소 설치되어 있다. 합천댐 상류 수계 지역을 6개의 오염원 그룹별로 구분했을 때 가장 많은 오염원 총 발생 부하량은 축산계가 차지하며, 그 다음으로 생활계와 토지계 부하량이 영향을 주는 것으로 분석되었다.

2. 수질 자료 및 데이터 분석

본 연구에서는 수질 데이터분석을 위해 2002년 1월부터 2017년 12월까지 16년 기간 동안 합천호의 3개 지점(S1, S2, S3)에서 측정된 월별자료를 이용하였다. 합천호의 유입량과 방류량 또한 같은 기간의 월별 자료를 분석하였다. 합천호 유역의 강수량은 합천댐의 2002년 1월부터 2017년 12월까지의 국가수자원관리종합 시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)의 강수량 데이터를 이용하여 연별, 월별 특성을 분석하였다. 수질 변수는 총인(Total phosphorus, TP), 총질소(Total nitrogen, TN), 생물학적 산소 요구량(Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소 요구량(Chemical oxygen demand, COD), 전기전도도(Conductivity), 용존 산소량(Dissolved oxygen, DO), 총 부유물질(Total suspended solids, TSS), 엽록소-a(Chlorophyll-a, Chl-a)의 8개 항목의 상·하류간의 공간 이질성, 장기간의 연간변이 및 계절적 변이 특성을 분석하였다. 또한, 장마철(Monsoon)과 장마철의 전(Premonsoon)과 후(Postmonsoon)의 특성과 함께, 본 조사기간 동안 강수량이 가장 적었던 갈수기 3개해와 강수량이 가장 많았던 풍수기 3개해를 각각 강우집중 해(Wet year), 가뭄의 해(Dry year)로 정하고 비교·분석했다.

3. 부영양화지수(Trophic State Index, TSI)

호소의 영양상태지수를 산정하기 위해 2002 - 2107년 동안 총인, 투명도, 엽록소-a, 총질소를 이용하여 Carlson(1977)에 의해 제시된 계산식을 통해 진단했다. 부영양화 지수(Trophic State Index, TSI)는 20 이하일 때 극빈영양, 30-40 일 때 빈영양, 45-50일 때 중영양, 53-60을 부영양, 70 이상을 과영양 상태로 진단하였다. 부영양화 지수(TSI) 산정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{TSI (TP)} &= 14.42 \ln \text{TP} (\mu\text{gL}^{-1}) + 4.15 \\ \text{TSI (CHL)} &= 9.81 \ln \text{CHL} (\mu\text{gL}^{-1}) + 30.6 \\ \text{TSI (SD)} &= 14.41 \ln \text{SD} (\text{m}) + 60 \\ \text{TSI (TN)} &= 54.45 + 14.43 \ln \text{TN} (\text{mgL}^{-1}) \end{aligned}$$

4. 부영양화 핵심변수를 이용한 경험적 모델 (Empirical Model) 분석

호소에서 질소·인의 농도와 조류 생산의 상관관계 분석과 수질 변수 간의 상관관계 분석을 위해 log-전환된 TN-CHL, TP-CHL간의 경험적 모델(Empirical Model)을 구축하였고, Pearson의 상관도 분석법을 이용했다. 수질 자료를 공간별로 나누어 측정값을 Log로 전환한 Log₁₀(TN), Log₁₀(TP), Log₁₀(CHL)을 취하여 선형회귀분석(Linear regression analysis)을 실시하였다. Pearson 상관도 분석은 SPSS를 이용하였다

결과 및 고찰

1. 장기간 강우 및 수질변이 특성

합천호에서 지난 2002 - 2017년 동안 장기간 수질변이 분석에 따르면, 수체내의 용존 이온물질 농도의 지표로서 전기전도도 값은 강우량에 의해 직접적으로 조절되는 것으로 나타났다. 강수량이 많은 2003년과 2012 등에는 세 지점 모두에서 낮은 전기전도도를 보였는데, 이는 이온이 적게 포함된 빗물이 호수 수체 내로 유입되어 이온을 희석하는 효과에 의한 것으로 나타났다. 이런 현상은 우리나라의 다른 인공호들, 대청호 (An *et al.*, 2001), 팔당호 (Kim *et al.*, 2005), 안동호 (Han *et al.*, 2010)등의 호수들과도 동일한 일반론적 패턴을 보였다. 그러나 강우 증가가 항상 전기전도도의 감소를 가져오는 것은 아닌 것으로 사료되었다. 즉, 2010년의 경우 2008년과 2009년 보다 많은 강수량을 나타내면서도 불구하고 전기전도도는 높게 나타났다. 이런 경우 주변 지역에서 용존물질을 포함한 화학물질이 강우와 함께 유출 되어 호수에 유입될 경우 전기전도도 값이 상승 될 수 도 있기 때문이다.

수체에서 영양염류의 지표인 총인과 총질소의 농도는 전기전도도 값과는 반대로 강우에 의해 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 강우량이 높은 해에는 증가하고, 강우량이 적은 해에는 영양염류가 같이 감소하는 경향을 보였는데 (Figure 2) 이곳은 유역에서의 강우는 점오염원 및 비점 오염원의 토양에 존재하는 영양염을 끌고 들어와 상승하는 것으로 분석되었다. 지난 16년 동안 일부 기간을 제외 하고 (2007, 2012, 2017년) 합천호의 상류역인 유수대 지역(S3, Riverine zone)이 정수대 지역(S1, Lacustrine zone)에 비해 총인의 농도가 높게 나타났다. 전형적으로 상-하류간의 종적구배(Longitudinal gradient)를 보였고 (Lee *et al.*, 2010; Kong *et al.*, 2016), 이는 유입되는 인은 하류로 흘러가며 침전되는 침적형 순환(Sedimentary cycle)에 의한 것으로 나타났다 (Lee *et al.*, 2015). 반면에 총질소는 상류와 하류사이의 구간별 차이가 거의 없었으며, 또

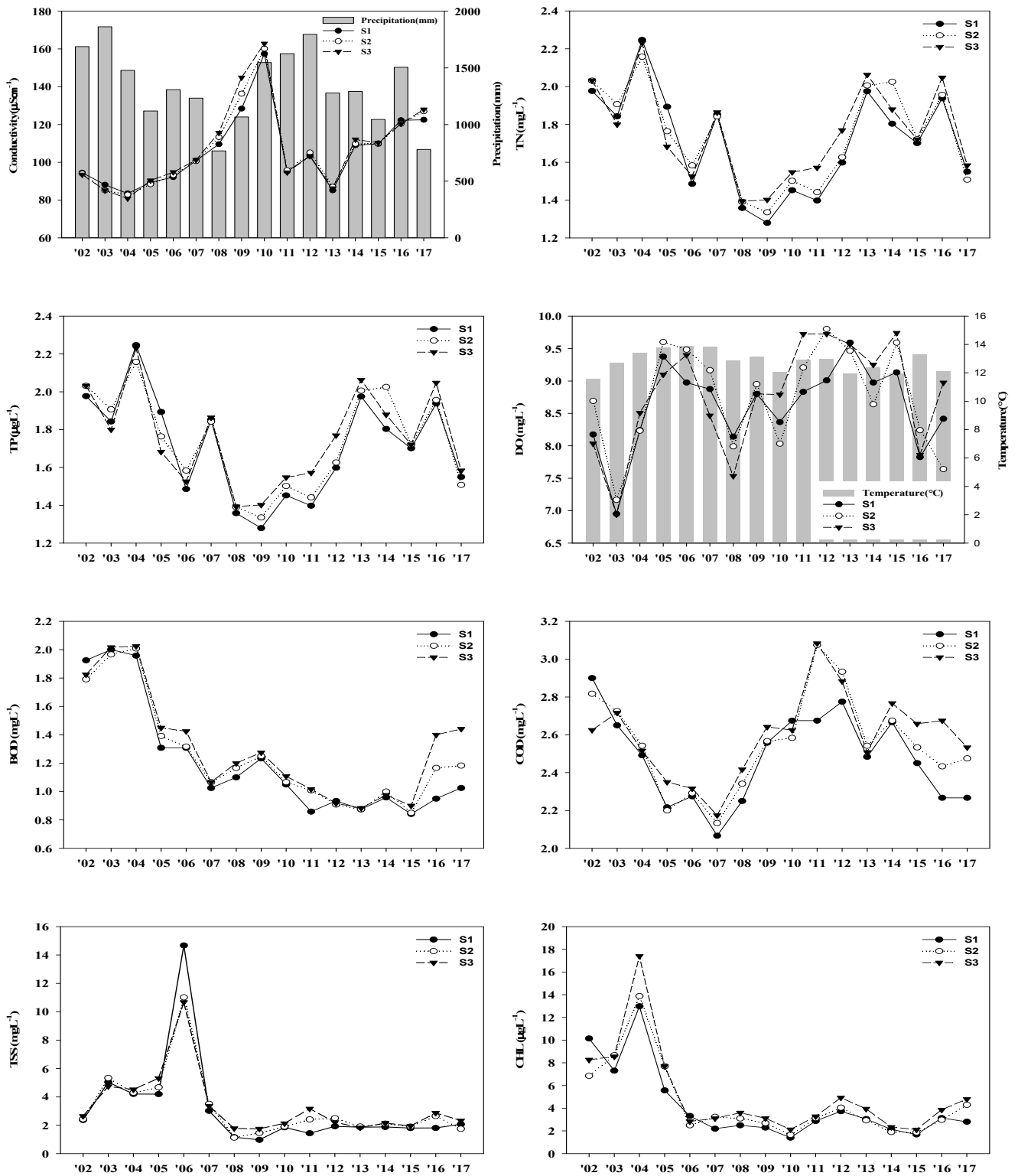


Figure 2. Long-term annual fluctuations of water quality parameters such as precipitation (Pre), conductivity (Cond), total nitrogen (TN), total phosphorous (TP), biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), chlorophyll-a (Chl-a), dissolved oxygen(DO), and water temperature (Temp).

한 강우에 의한 증가도 높지 않았다. 따라서 합천호에서 장기간 질소의 변동패턴 역동성은 인의 변동패턴 역동성 보다 작은 것으로 나타났다.

그 외의 타 이화학적 수질 지표특성은 조사지점에 따라 크게 다르지 않았으나, 대부분 상류역인 우수대(S3)에서 BOD와 COD는 높게 나타나, 유기물 오염도를 잘 반영하였다. 호수 수체내의 BOD 농도는 강우량의 증가/감소에 의해 인과 질소처럼 직접적으로 변동하지 않는 것으로 나타났고 COD 농도는 강수량의 증감 추세와 비슷한 형태를 보였다. 따라서 많은 강우로 인해 외부기원 유기 오염물질들이 호수 내로 유입은 되었지만, 미생물에 의해 분해와 이용이 가능한 유기물의 양은 2015년까지 꾸준히 감소되었다가, 2016년부터 다시 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 2016 - 2017년 사이에 우수대 (S3)에서 급격한 BOD의 증가를 보였고, 2010 - 2013년 사이 BOD의 값은 낮는데 비해 COD의 값은 크게 증가한 것으로 나타나 COD:BOD 값이 커져 미생물이 분해하기 어려운 난분해성 유기물 유입이 일어난 것으로 사료되었다. 총 부유물질의 농도는 강수량이 가장 많았던 2003년과 2006년을 제외하고 큰 변이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 총 부유물질 농도는 크게 유기성 부유물(Organic suspended solid)과 무기성 부유물(Inorganic suspended solid)의 합으로 나타나는데 (Kong *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2012), 장마에 의한 무기성 부유물의 증가 및 조류 번성에 의해 증가되는 유기성 부유물의 증가는 크지 않아 나타난 결과로 사료되었다.

2. 계절별 수질변이 특성

합천호에서 1 ~ 12월 기간 동안 수질변이 특성은 강우의 증감에 의해 직접적으로 조절되는 것으로 나타났다. 문순강우기인 7월과 8월의 집중강우는 호수 전역에서 (S1, S2, S3) 전기전도도의 값을 급격하게 감소시키는 것으로 나타났고, 특히 초기강우는 상류역인 우수대에서 급격한 속도로 감소되는 현상을 보였다. 이는 합천호 상류역에서 7 - 8월의 내린 이온농도가 낮은 빗물이 합천호의 댐 근처에 도달하여 이온을 희석시키는 Time-lag 현상에 의해 9월 전기전도도가 감소한 것으로 나타났다. 9월 이후에는 강우량이 점점 감소함에 따라 전기전도도가 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 합천호에서 갈수기에는 이온농도가 가장 높고, 강우와 함께 감소하다가, 강우가 멈춘 후에는 다시 이온농도가 회복되는 보존성 이온특성 (Conservative ion)을 보였다(Kim *et al.*, 2000).

지점별 이온 농도 비교분석 (전기전도도)에 따르면, 댐근처의 정수대보다는 전이대(Transition zone)에서, 그리고 전이대보다는 최상류역인 우수대(Riverine zone)에서 전기전도도가 높게 나타났다. 거창군과 합천군에 걸쳐있는 합천호 위치를 고려했을 때, 새터 1마을 하수도 등의 점오염원 및 인근 비점오염

원으로부터의 이온을 포함한 물질이 상류역에 영향을 미친 것으로 사료되었다. 한편, 전기전도도 값의 연별 비교결과에 따르면, 2002년부터 2017년까지 전기전도도는 연평균 $106.8\mu\text{S cm}^{-1}$ 로, 7월 S3에서의 최고치인 $113.7\mu\text{S cm}^{-1}$ 를 고려해보았을 때 연별 차이는 크지 않은 것으로 나타났다(Figure 3). 따라서 유역으로부터의 유입에 의한 이온농도의 변화는 크지 않은 것으로 사료된다.

일반적으로 우리나라 호수에서 식물성 플랑크톤의 1차적인 제한 영양염류로 알려진 인의 농도는 장마 이후 호수에서 9월에 증가하여 최고점에 도달하는 것으로 나타났는데, 이는 점오염원, 비점오염원에서 강우로 인해 유입된 것으로써 이전의 인공호의 연구들과 유사한 계절 패턴을 보였다 (Kim *et al.*, 2005; Kong *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2010; Lee and An, 2010). 총인의 최저치인 3월 평균 $14.42\mu\text{g L}^{-1}$ 와 최고치인 9월 평균 $26.65\mu\text{g L}^{-1}$ 를 비교하면 약 1.8배 정도 계절변이 차이를 보였다. 같은 시기에 지점별 인의 양을 비교해 보면 S3, S2, S1 순서로 높은 총인 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 토양과의 흡착, 인 침적 순환(P-sedimentation process), 생물의 이용을 통해 점차적으로 인이 침전되었기 때문이라 사료된다. 총인/용존총인(TP/TDP)는 계절적 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 총인/용존총인의 비율이 크다는 것은 용존성 인에 비해 상대적으로 입자성 인(Particulate phosphorus)이 증가했음을 의미하므로, 상대적으로 합천호에서는 강우강도 크기는 총인/용존총인에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 용존총인 측정자료가 없는 2002년 1월부터 7월까지의 세 지점 분석은 제외되었다. 4월에는 총인의 양이 S1에서 가장 높게 측정되었고 총인/용존총인의 값 또한 S1에서 가장 높게 측정되었다. 이는 S1에서 용존총인의 농도가 낮았다고 할 수 있고, 동시에 식물성 플랑크톤에 의해 이용될 수 없는 입자성 인의 양이 높다는 것을 의미한다. 한편, 7월에는 S3가 총인 그래프와 총인/용존총인 그래프에서 동시에 가장 높은 값을 보였으나 장마시기에 유역으로부터 입자성 인(PP)의 증가에 의한 결과임을 알 수 있다. 한편, 총질소의 농도는 7-8월의 강우기 때 최대치를 보인 후 9월부터 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 즉, 질소는 이온현상과 마찬가지로 강우에 의해 질소희석현상을 보였다. 인의 역동성과는 다르게 하절기 (8월)에 전이대 (S2)에서의 질소 농도는 증가했는데, 이는 하금지구마을 하수도과 이어진 유전리 방향의 합천호에서 S2 방향인 물의 흐름에 따라 질소가 유입되어 높은 질소 농도가 나타난 것이라 생각된다.

생물학적 산소요구량(BOD)은 4~ 6월까지 낮은 상태를 유지했고, 강수량이 많은 7 - 8월 이후 9월에 호수전역 모두 최고치를 보였다. 장마 이후 많은 유기물질과 염류 등이 유입되며 산소 요구량이 증가했을 것이라 추측된다. S1과 S2에 비해 S3에서 높은 값이 관찰 되었다. COD는 BOD와 마찬가지로 유기물 오염도를 나타내나, 난분해성 유기물이 높을 때 COD 농도

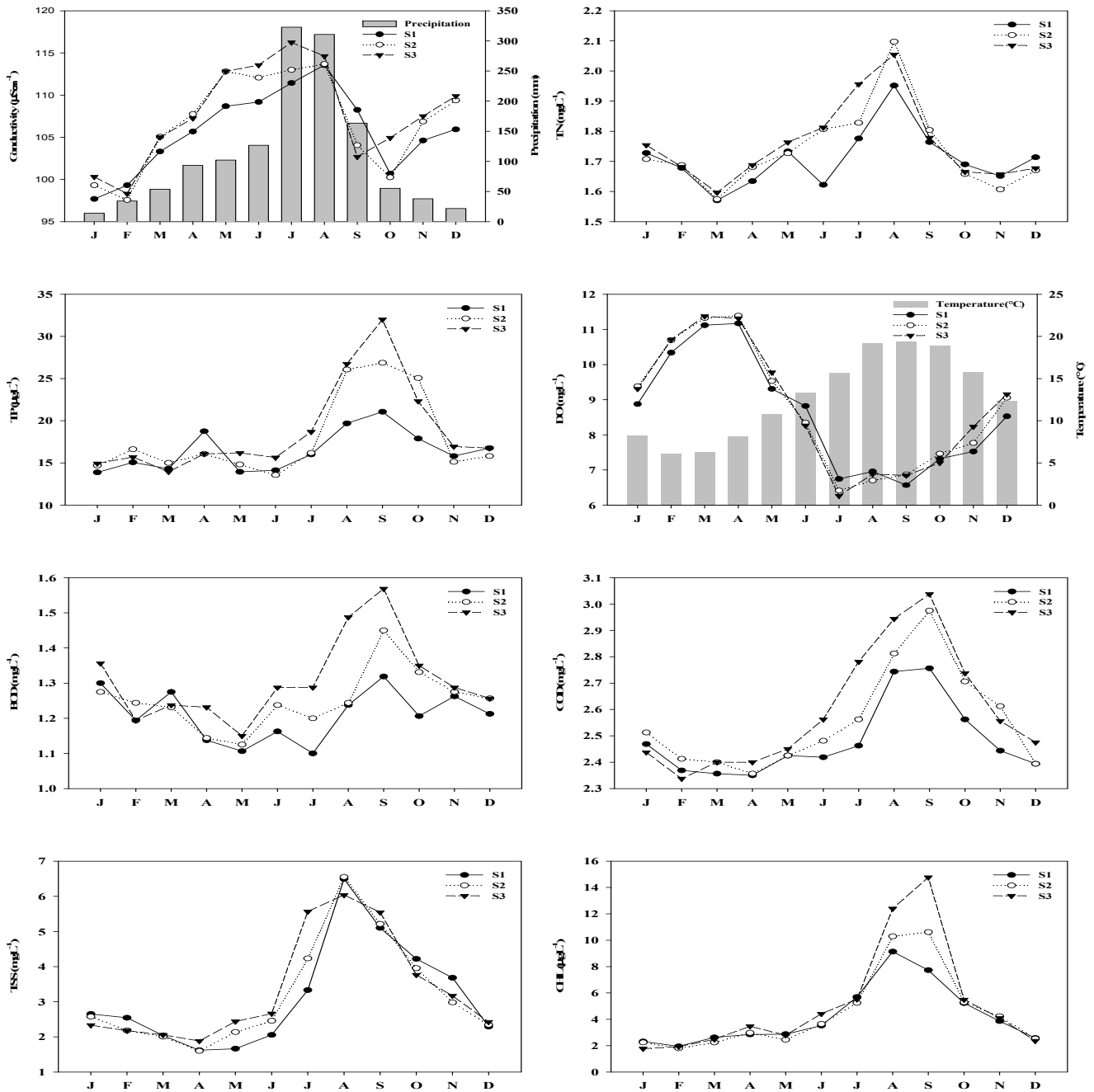


Figure 3. Seasonal fluctuations of precipitation(Pre), conductivity(Cond), Total nitrogen(TN), Total phosphorous(TP), Biological oxygen demand(BOD), Chemical oxygen demand(COD), Total suspended solids(TSS), Chlorophyll-a(Chl-a), Dissolved oxygen(DO), and Temperature(Temp).

가 높게 나타난다. BOD와 COD는 전체적으로 유사한 형태를 띠기 때문에, BOD와 마찬가지로 9월에 가장 높은 값이 관찰되었고, 지점 중에서는 유수대에서 가장 높게 나타났다. BOD에서 보다 COD에서 S3와 S2의 차이가 작았는데, 이는 S2에 유입된 유기물 중 난분해성 유기물의 비율이 높았기 때문이라

사료된다. 용존 산소량(DO)은 수온이 높은 하절기에 낮게 나타났고 겨울철에 높게 나타나 수온에 따른 포화 용존산소량의 증감 패턴을 그대로 반영하였다. 즉, 수온이 낮은 9월부터 4월에는 DO가 높아지는 추세를 보였고, 최고 기온을 보이는 하절기(7, 8월)에는 DO 값이 낮아지는 현상이 뚜렷했다. 보통 7mg

L^{-1} 이상의 용존산소일 경우 생물생장 및 서식에 제약조건으로 작용하지 않기 때문에 호수표층에서 측정된 산소농도는 생물에 영향을 주지 않을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 수층별 용존 산소를 측정하지 않았기 때문에 심수층(Hypolimnion)의 산소 농도는 알 수 없으나, 하절기 혹은 6월말 심층의 산소농도는 급격히 낮아져 저서동물(담수패류)에 영향을 줄 수도 있을 것으로 사료되었다.

월별 총 부유물질 (total suspended solid; TSS) 농도 변이 분석에 따르면, 강우량이 적은 12월부터 4월까지 낮은 농도를 보였고 특히 우리나라에서 갈수기인 4월에는 세 개의 지점에서 평균 $1.7mg L^{-1}$ 로 최저치를 보였다. 장마기인 7월과 8월에 평균 $6.7mg L^{-1}$ 로 갈수기에 비해 약 4배정도 높은 것으로 나타나, 총 부유물질 농도는 강우사상에 의해 직접 증가하는 것으로 나타났다. 수온이 높은 여름에 DO 농도가 높아질 경우 일반적으로 부영양호(Eutrophic lake)에서 일시적인 조류의 발생에 따라 산소가 과포화 됐을 경우를 생각해 볼 수 있지만 본 합천 호에서는 이런 현상이 나타나지 않았다. 최고치를 나타낸 8월의 지점별 총 부유물질 농도를 비교해보면 상류에 위치한 S3에서 비교적 낮은 값을 나타낸다. 이는 늘어난 강우량으로 인해 유속이 빨라지며 빠르게 총 부유물질을 하류 쪽으로 흘려보냈기 때문이라 사료된다. 호수전역에서 7 - 9월까지 1차 생산력의 지표인 Chl-a의 농도는 값이 증가하는 것으로 나타나, 하절기 수온상승 및 유역으로부터의 인과 같은 영양염류의 증가는

1차생산력 증가에 직접적인 역할을 하는 것으로 사료되었다.

3. 호수 유입량 및 방류량에 따른 수질변이 특성

합천댐에서 유입량 및 유출량의 변이는 강우량에 의해 조절되며 이는 또한 수질변이에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 조사기간동안 평균 강우량은 약 1,336mm로 나타났다. 연별 총 강우량은 2002년과 2003년, 2012년이 1600mm이상으로 다른 해에 비해 높은 강우를 보였고, 반면에 2008년과 2015년, 2017년은 1000mm 이하의 작은 강우를 보였다. 특히, 2008년과 2017년은 각각 767mm와 780mm로 조사기간 중 가장 적은 강우량을 보였다. 강우강도에 의한 영향을 비교하기 위하여 1,600mm 이상의 강우량을 보인 해를 집중강우의해(Wet year), 1,000mm 이하의 강우량을 보인 해를 가뭄의 해(Dry year)로 대별하여 년별 평균값을 나타냈다 (Figure 4, 5). 강우가 집중된 7 - 9월까지의 강우량은 확연한 차이를 보이지만 장마철을 제외한 다른 달은 크게 차이가 나지 않는다. 따라서 합천호의 경우 우리나라의 타 호수들과 마찬가지로 강우는 여름에 집중되어 있으며 총 강우량, 가뭄의 해와 장마의 해 또한 하절기에 결정되는 것으로 나타났다. 유입량과 방류량은 장마철인 7월과 8월에 크게 증가하고, 이는 강우량의 증감에 의해 조절되었다 (Figure 4). 수자원을 확보하는 댐의 역할에 맞게 유입량은 평균 10,141 CMS지만 방류량은 그에 못 미쳐

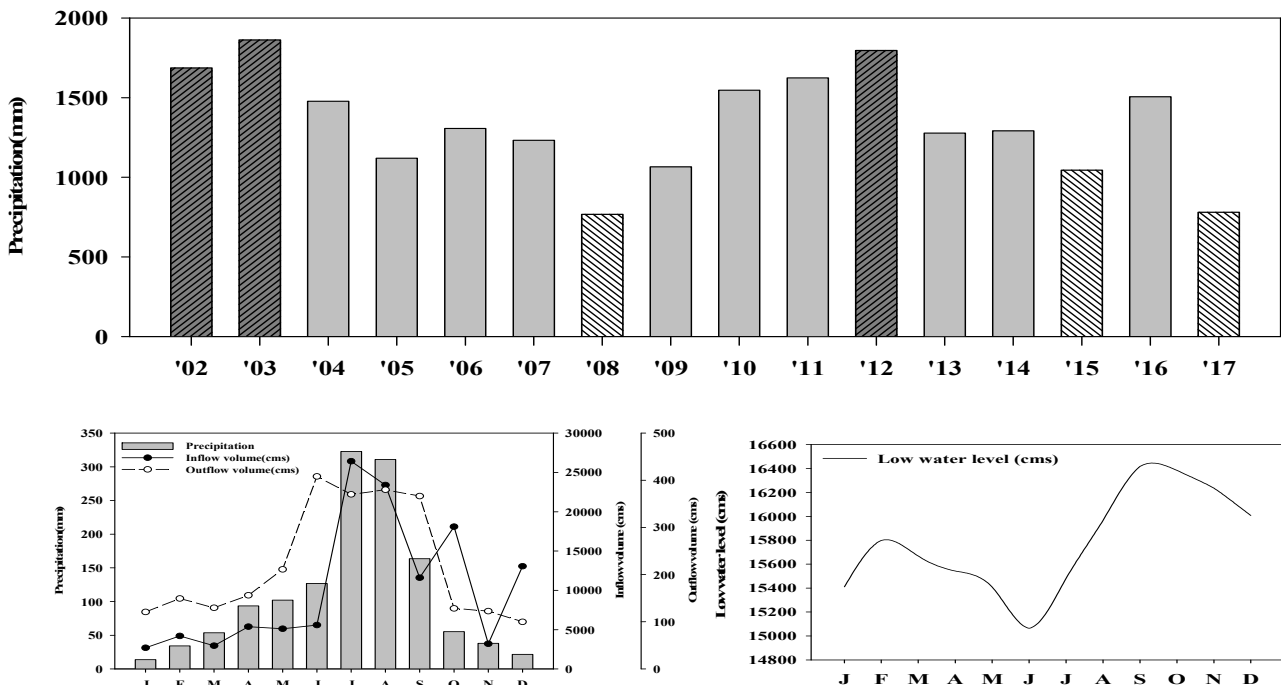


Figure 4. Annual average precipitation showing an intense-monsoon year vs. drought monsoon year, and the relations of the inflow and outflow in relation to the precipitation.

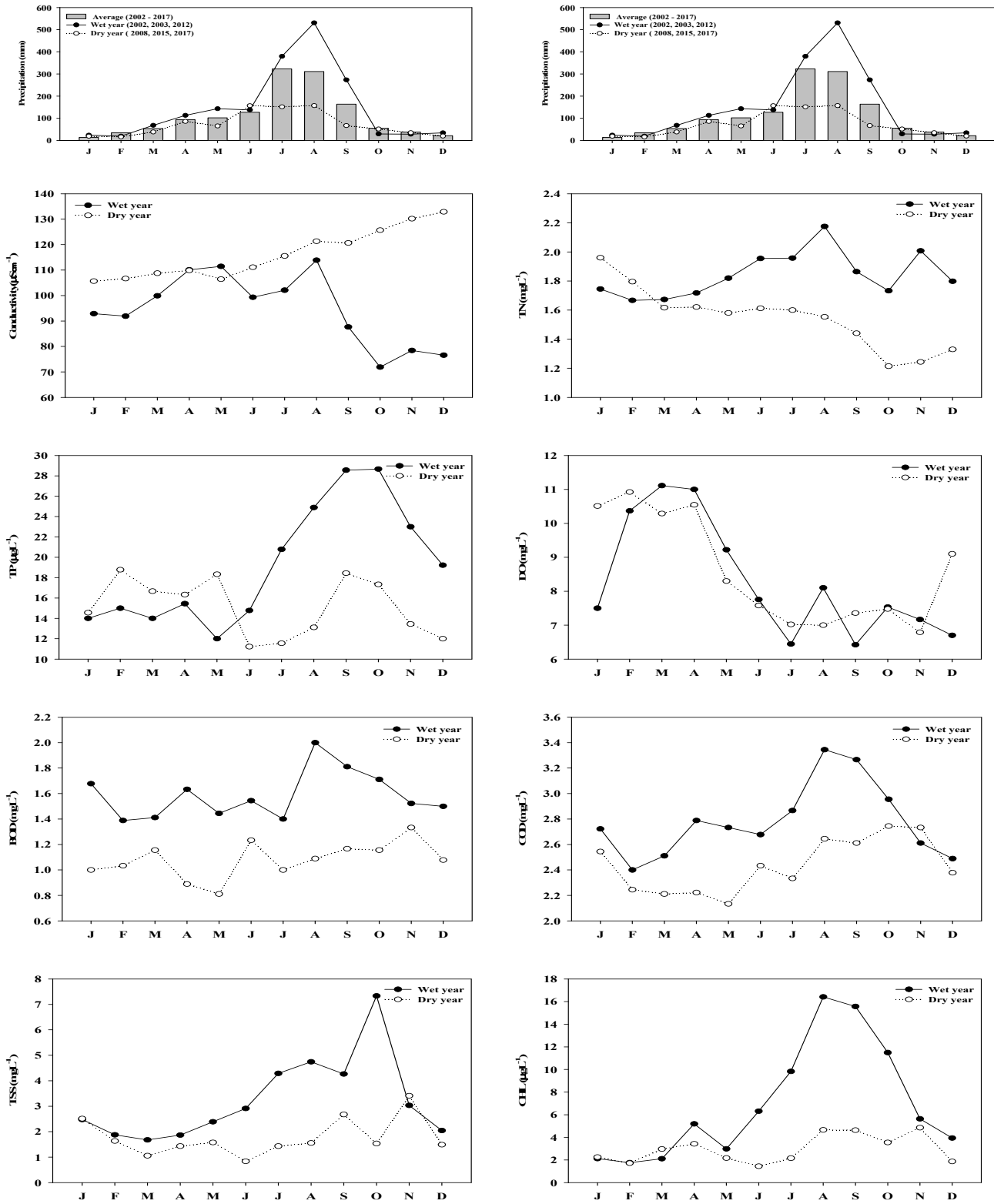


Figure 5. Drought monsoon and Intense monsoon fluctuations of Conductivity(Cond), Total nitrogen(TN), Total phosphorous(TP), Biological oxygen demand(BOD), Chemical oxygen demand(COD), Total suspended solids(TSS), Chlorophyll-a(Chl-a) and Dissolved oxygen(DO).

평균 220 CMS를 보인다. 유입량과 강우량이 많으면 방류량이 많아질 것이라 예측되지만, 6월의 강우량은 126.8mm로 7월 322.8mm의 절반 이하의 강우량을 가졌고 유입량 또한 5,585 CMS로 7월의 26,415 CMS에 비해 적은 유입량을 가졌음에도 불구하고 방류량이 408 CMS로 월별 방류량 중 가장 높은 값을 보였다. 실제 저수위는 6월에 15,064 CMS로 가장 낮고 장마 이후 급격하게 수위가 올라가 16,417 CMS로 연중 가장 높은 저수위를 보였다.

월별 전기전도도를 비교해 보았을 때 평균적으로 가뭃의 해에서 이온농도가 높아 전기전도도 값이 높게 나타났다 (Figure 5). 이는 가뭃에 의해 합천호의 저수량이 줄어들면서 상대적으로 이온의 농도가 높아졌기 때문이라 사료된다. 또한 장마철에 비해 겨울동안 전기전도도가 높아졌음을 통해 강우량이 전기전도도에 영향을 미침을 알 수 있다. 하지만 5월에는 특별히 전기전도도가 가뭃의 해에 비해 $5\mu S\ cm^{-1}$ 정도 높은 것을 확인 할 수 있다. 이는 2012년 5월에 장마의 해들 중에서 비교적 적은 강우량인 60.2mm가 내림으로서 생긴 결과라 추측한다. 또한 이는 가뭃의 해에 속하는 2008년과 2015년 5월에 비해서도 작은 값이다. 그래프를 통해 가뭃의 해에서는 12월까지 꾸준히 전기전도도가 올라가는데 비해 장마의 해는 전기전도도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 가뭃의 해와 장마의 해의 겨울철 강우량은 19.8mm와 34.4mm로 약 1.7배 차이가 난다. 이 때문에 합천호의 이온 농도가 희석되며 전기전도도가 감소했을 것이다. 총질소과 총인 농도는 전기전도도와는 반대로 장마의 해에서 더 높은 농도를 보인다. 이는 강우에 의해 주변 지역에서 무기염류 등의 물질들이 합천호로 흘러들어 왔기 때문이라 추측한다. 한편 총질소에서는 1월과 2월, 총인에서는 1월부터

5월까지 가뭃의 해가 더 높은 농도를 나타내는 것을 알 수 있다. BOD에서는 가뭃의 해와 장마의 해가 확연한 차이를 보인다. 가뭃의 해의 경우 낮은 BOD 값을 가지고 장마의 해는 높은 BOD값을 가진다. 또한 장마철이 지난 이후인 9월에 갑작스러운 BOD의 증가가 관찰된다. 이를 통해 강우량의 증가가 주변 지역에서 생물이 분해 가능한 유기물을 합천호로 흘러들어오게 함을 알 수 있다. COD에서도 장마의 해에서 더 높은 값을 가지게 됨을 알 수 있지만 BOD에 비해 강우량과 상대적으로 유사한 추세를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 유기물이 강우량에 비례하여 꾸준히 합천호로 유입되고 있다고 사료된다. 용존 산소량은 가뭃의 해와 장마의 해의 월별 추세가 비슷한 것으로 보여 크게 강우량에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 반대로 Chl-a는 강우량이 많은 장마철에 큰 차이를 보인다. 이는 많은 강우에 의해 무기염류의 증가와 일조량의 증가로 조류가 번성했기 때문이라 생각된다. 동시에 이는 총 부유물질에도 영향을 미쳐 장마철과 그 이후 장마의 해에서는 총 부유물질가 높은 수치를 보이는 것이 확인된다.

4. 부영양화 지수(TSI)에 의한 호수 부영양도 산정

합천호의 계절별 영양상태 지수는 총질소(TN), 투명도(Secchi depth; SD), 총인(TP), 클로로필-a (Chl-a) 순으로 높게 나타났다. 즉, 총 질소는 계절 및 지점에 상관없이 가장 높은 것으로 나타나 합천호에서는 질소의 농도가 아주 풍부한 것으로 나타났다. TSI 값에 의한 합천호의 영양상태 분석에 따르면, 빈영양(Oligotrophy) 상태에서 부영양(Eutrophy) 상태까지 다양하게 나타났다 (Figure 6). TSI(TP) 지수분석에

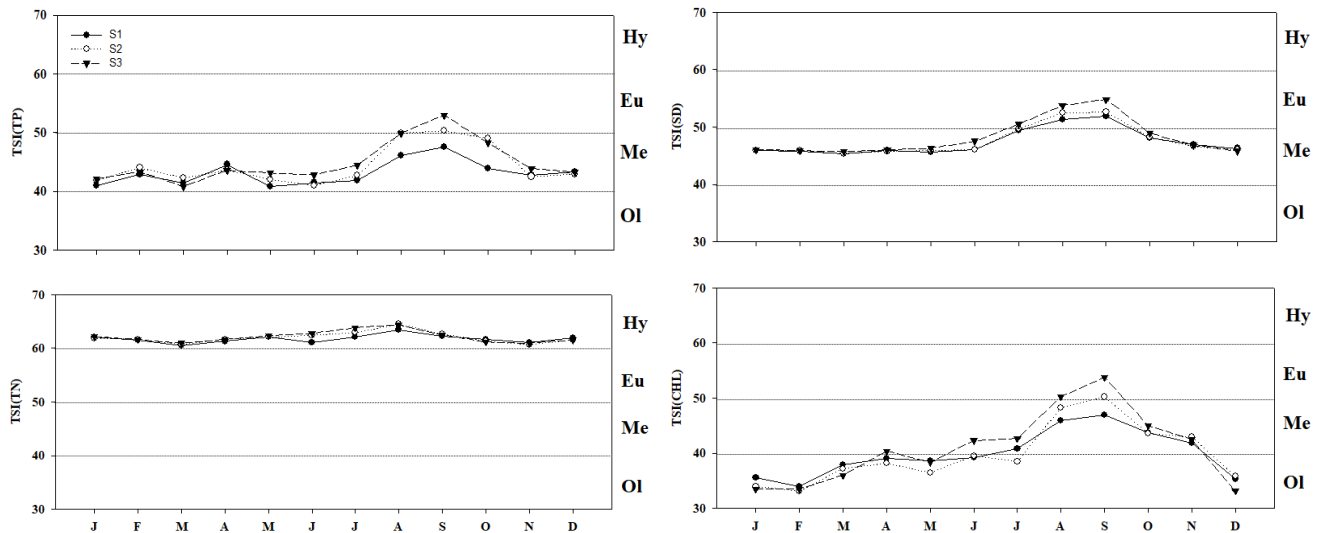


Figure 6. Seasonal fluctuations of Trophic State Index of TP, Secchi depth(SD), TN and Chl-a in the reservoir (Hy: Hyper-Eutrophic, Eu: Eutrophic, Me: Mesotrophic, Ol: Oligotrophic).

따르면, 호수전역(S1, S2, S3)에서 중영양 상태로 판정되었다. 8월부터 10월까지 약간 더 높은 값을 보이지만 계절별로 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, S3에서의 TSI 지수가 S2와 S1에 비해 미세하게 높은 것을 확인 할 수 있었는데 이는 월별 총인의 값 변화와 마찬가지로 침전 과정에 의해 발생된 것으로 사료된다. TSI(CHL) 지수에 따르면 합천호가 12월부터 6월까지의 빈영양, 7월과 10월은 중영양, 8월과 9월은 과영양 상태라는 것을 보여준다. 인의 양은 계절에 상관없이 부영양 상태를 유지하지만 Chl-a는 빈영양과 과영양 사이를 계절에 따라 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 계절에 따라 햇빛의 양 등이 달라져 조류의 성장에 영향을 끼쳤기 때문일 것이다. 또한 총인의 양 중에 생물이 사용 가능한 용존인의 형태가 아닌 입자성 인의 비율이 높았기 때문일 수 있다. TSI(SD)의 분석에 따르면, 10월부터 7월까지의 중영양 상태 (Mesotrophy), 8월과 9월은 부영양 상태를 보였다. 8월은 장마철로 강우량이 증가하는데 이 때문에 외부에서 총 부유물질과 영양염류 등이 유입되어 부영양화가 발생한다고 추측된다. 또한 장마철이 아닌 경우 지점별 TSI(CHL)의 차이가 크게 관찰되지 않지만 장마철의 경우에는 S3부터 S1까지 점차적으로 낮은 지수를 나타냄을 알 수 있다. 이는 외부에서 유입된 물질들이 하류에 위치한 S1으

로 흘러내려오며 침전 과정을 거쳤기 때문이라 생각된다.

TSI(TN) 지수 분석 결과에 따르면, 합천호는 과영양상태 (Hypertrophic)로 평가되었다. 하지만, 국내 호소환경기준에 따르면 총질소:총인 비가 16이상인 경우 총질소의 기준을 적용하지 않는다. Forsberg and Ryding (1980)은 식물성 플랑크톤의 성장에서 총질소:총인의 비율이 10-17일 때 질소(N) 또는 인(P)이 1차적인 제한요인(Limiting factor)이며, 10 이하 일 때는 질소(N)가 제한요인이고, 17이상 일 때는 인(P)이 제한요인 이라고 제시한 바 있다. 합천호의 2002부터 2016년까지의 월별 총질소와 총인의 비율을 조사한 결과 최저값이 35로서 합천호에서는 질소가 아닌 인이 제한요인으로 작용하는 것으로 나타났다 따라서 합천호는 TSI(TN) 지수를 적용하기에 적합하지 않다. 이처럼 계절별로 나타난 부영양화 지수 비교는 공간별 지수와 측정요소별 증감량에 따른 다른 측정요소의 변화를 비교하기에 적절하지 않다. 따라서 데이터 추세를 이용한 일차식 그래프를 통해 이를 보완할 수 있다. 분석된 TSI(TP)와 TSI(TN)와 TSI(CHL), TSI(TP)와 TSI(CHL)이 비례하여 증가한다는 상관관계에 대해서 알 수 있었다.

한편, TSI(TP)와 TSI(CHL)의 관계 분석에 따르면 (Figure 7), 상류로부터 하류에 이르기까지 공간구간 별로 기울기 값

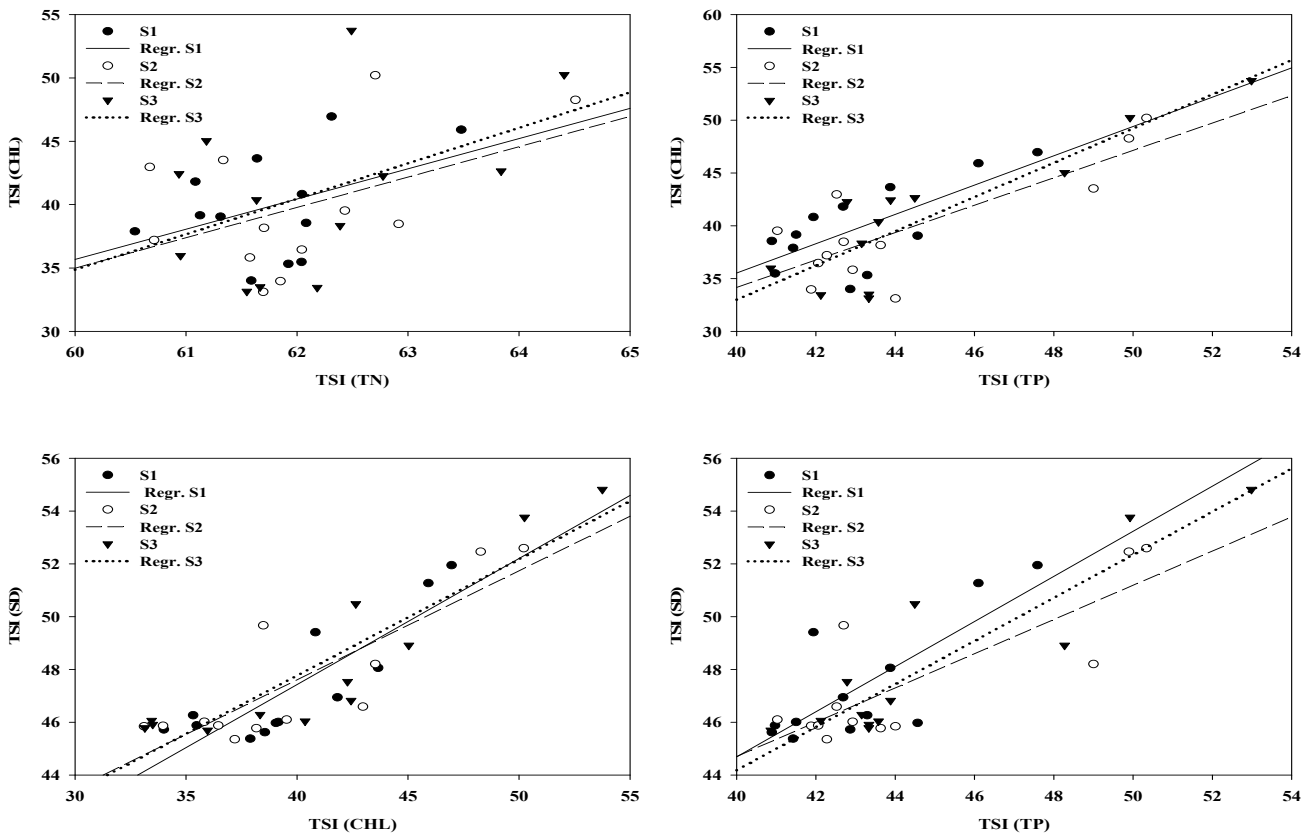


Figure 7. Regression analysis based on the various parameters of Trophic State Index(TSI).

(slope)에 따라 S1과 S2에 비해서 S3에서 더 빠르게 증가하였다. 또한 부영양화 지수의 경우 44이상의 같은 TSI(TP) 지수 값에 따른 TSI(CHL)이 S1, S3, S2 순으로 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 S2와 S3에 비해 S1에서 더 부영양화가 진행되었다 사료된다. 총인에 영향을 미치는 강수량 등의 요인이 큰 폭으로 변화하고 있는 S3에 더 영향을 끼치는 것 또한 추측할 수 있다. TSI(TN)과 TSI(CHL)의 그래프에서 S1과 S2는 유사한 기울기를 가지고 S3의 경우 더 급한 경사의 기울기가 관찰된다. 이는 S3에서의 증가율이 더 높다는 것을 의미한다. TSI(TP)와 TSI(SD) 그래프는 S2에 비해서 S1과 S3에서의 증가율이 높다고 생각된다. TSI(TP)의 지수가 낮을 경우 S2에서의 TSI(SD)가 S1과 S3 중간에 위치하지만 지수가 높아짐에 따라 순서가 바뀌어 S1, S3, S2 순으로 TSI(SD) 지수가 낮아졌다. TSI(CHL)과 TSI(SD)는 거의 유사하게 증가하여 공간에 따른 차이가 크지 않는 것으로 사료된다.

5. 트로픽 변수를 이용한 경험적 모델(Empirical Model)

1차 생산력의 지표인 Chl-a농도는 호수 부영양화 평가 지표로 대표적으로 활용한다 합천호의 상하류간 부영양화 지수 분석에 따르면, 하절기에 Chl-a가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 수온상승 효과 및 영양염류 농도의 증가에 의한 것으로

사료되었다 수질 변이 간의 상관관계를 알아보기 위해 호수의 상하류간 공간 특성 분석에 따르면, 세 지점 모두에서 총인과 Chl-a의 경우에는 유의한 상관관계를 나타내는 ($p < 0.05$) 반면, 총질소와 Chl-a의 경우 통계학적으로 유의한 관계를 보이지 않는 것($p > 0.05$)으로 나타났다. 이는 TSI(TN)에서 나타났던 것과 마찬가지로 총질소의 농도가 호소 내 총분함을 나타낸다. 세 지점의 비교를 통해 댐 가까이에 위치한 S1에 비해 ($R^2=0.5861$, $p=0.0037$) 상류에 위치한 S3 ($R^2=0.8397$, $p < 0.0001$)에서 Chl-a의 변이 총인의 변이를 더 높게 설명하는 것으로 나타났다 (Figure 8). 본 연구에서 적용된 경험적 모델 결과는 호소 내 어떤 영양염류가 1차 생산력에 직접적으로 관여하는 조류의 증감을 설명하는데 중요한 자료로 이용 될 것으로 사료된다. 수질변수간의 상관도 분석에 따르면 Chl-a 농도는 유기물 및 인(P) 농도와 아주 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. BOD와 총인은 강수량에 영향을 직접적으로 받기 때문에 연간의 농도 증감은 연 강수량 차이에 의해 조절되는 것을 알 수 있다 (Table 1).

본 연구는 합천호에서 2002 ~ 2017년까지 16년간 8개의 수질변수를 이용하여 부영양화 특성, 경험적 모델분석 및 몬순 강도에 따른 수질변이 특성을 분석하였다. TSI를 통한 영양상태 분석에서 합천호는 중영양 ~부영양 상태로 나타났으며 하절기에 주로 부영양 상태를 나타냈다. 오염원이 크게 변하지 않는

Table 1. Pearson's correlation coefficients (r) and the probability (p) among the chemical parameters in the reservoir ($n = 576$). (Cond. = conductivity)

	Chl-a	TSS	DO	BOD	COD	TN	TP	Cond.
Chl-a	r							
	p							
TSS	r	.262**						
	p	0.000						
DO	r	-.218**	-.167**					
	p	0.000	0.000					
BOD	r	.496**	.258**	-.171**				
	p	0.000	0.000	0.000				
COD	r	.308**	.107**	-.192**	.265**			
	p	0.000	0.010	0.000	0.000			
TN	r	.293**	.129**	-.158**	.211**	.138**		
	p	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001		
TP	r	.438**	.295**	-.232**	.273**	.260**	.328**	
	p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Cond.	r	-.170**	-.206**	-0.064	-.253**	-	-.257**	-.240**
	p	0.000	0.000	0.125	0.000	0.159	0.000	0.000

*:significant at the 0.05 level, **:significant at the 0.01 level

상황에서 강우 사상과 계절적 강우 특성에 의해 수질이 조절되는 것으로 분석되었다. 총인, 총질소, 생물학적 산소요구량 및 이온 농도변화는 건기해(Dry year)와 홍수해 (Wet year)의 비교분석에서 뚜렷한 차이를 보여 강수가 영양염류, 유기물 농도 및 이온농도 변동에 가장 중요한 역할을 하는 것으로 분석되었다. 특히, 수질 변수 중 매년 영양염 지표(TP, TN), 유기물 지표(BOD, COD), 총 부유물질 농도 및 1차생산력의 지표(Chl-a)는 강수량과 정 상관관계를 보였다. 녹조의 지표인

Chl-a 농도는 총인, 총질소, 및 생물학적 산소요구량와 높은 상관관계를 보여, 타 호수처럼 영양염의 과도한 증가시기에 Chl-a농도가 낮아지는 특성과는 차이를 보였다. Log 전환된 총질소, 총인 및 Chl-a에 대한 경험적 모델(Empirical model) 분석에 따르면, 인(Phosphorus) 농도에 의해 Chl-a 농도가 1차적으로 조절되며, 질소(N)농도는 유의한 영향을 주지 않는 것으로 나타났다(Figure 8). 또한 상류, 중류, 하류에 따른 공간적 회귀분석에서 Log_{10}TP 와 $\text{Log}_{10}\text{CHL}$ 는 $p < 0.005$ 의 유의적인

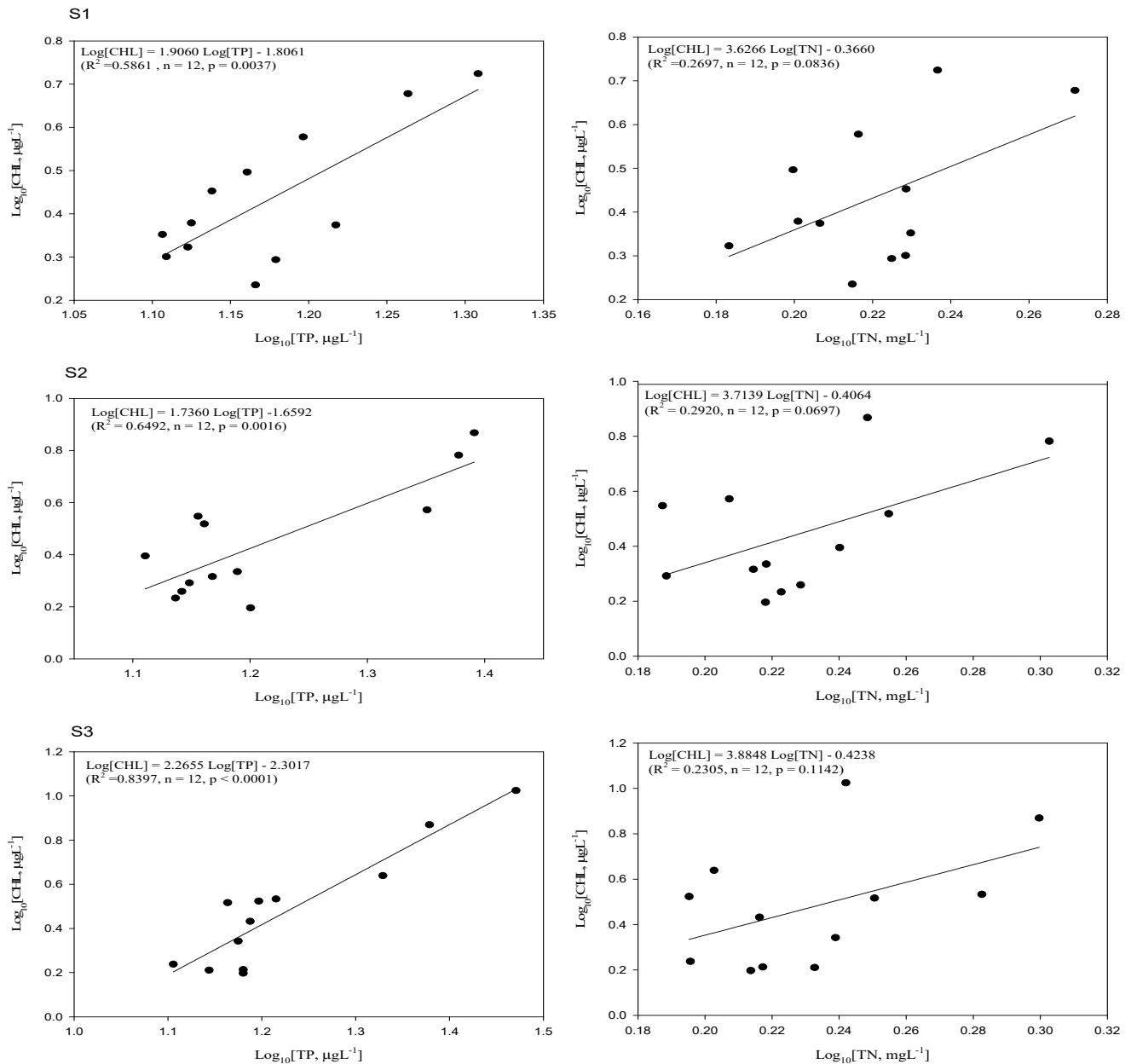


Figure 8. Regression analysis of log-transformed CHL against log-transformed TN and TP, based on the average of monthly water quality measurement data in the three reservoir sites.

상관관계를 나타내었으나 Log_{10}TN 과 $\text{Log}_{10}\text{CHL}$ 는 $p>0.005$ 의 결과를 나타내며, 인(P)이 녹조번성에 핵심 역할을 하는 것으로 분석되었다. 또한, 총질소와 총인 모두 Chl-a와 댐에 가까운 하류구간(Lacustrine zone)에 비해 상류구간(Riverine zone)에서 더 유의적인 결과를 나타내며 무기성 부유물의 농도의 영향에 의한 광제한 효과(Light limitation)가 상류역에서 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

사 사

본 연구는 대전녹색환경지원센터의 2017년도 연구개발사업 지원에 의해 수행됨.

REFERENCES

- An, K.G.(2000) An influence of Point-source and Flow events on Inorganic Nitrogen Fractions in a Large Artificial Reservoir. Korean J. Limnol. 33(4): 350-357.
- 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(4): 327-336.
- 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 J. Limnol. 40(2): 285-293.
- Carlson, R.E.(1977) A trophic state index for lake. Limnol. Oceanogr. 22: 361-369.
- Cha, E.H.(2011) The Correlation and Trophic State of Water quality in the Upper Stream Water System of Hap-Cheon dam. M.D. Dissertation, Jinju National Univ. Jinju. (in Korean with English abstract)
- Choi, H.S., I.C. Byun, J.H. Cho, B.H. Moon and J.S. Heo(2003) Estimation of Water Quality and Trophic State in the Hapcheon Lake. Korean J. Environmental Agriculture 22(1): 1-6. (in Korean with English abstract)
- Forsberg, C. and S.O. Ryding(1980) Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. Arch. Hydrobiol. 89: 189-207.
- 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 J. Limnol. 43(2): 319-337.
- Hwang, S.J., Y.B. Sim, B.G. Choi, K.H. Kim, C.H. Park, W.B. Seo, M.H. Park, S.W. Lee and J.K. Shin(2017) Rainfall and Hydrological Comparative Analysis of Water Quality Variability in Euiam Reservoir, the North-Han River, Korea. KJEE 50(1): 29-45 (in Korean with English abstract)
- Jeon, H.R.(2016) Evaluation of Water Quality for Lakes and Reservoirs in Gyeonggi-do Area Utilizing the Korea Trophic State Index(TSIKO). M.D. Dissertation, Konkuk Univ., pp. 5-10. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.C., J.H. Park, B.J. Lim, W.M. Heo, G.S. Hwang, G.S. Choi and K.S. Chae(1988) The limnological survey of major lakes in Korea (2): Lake Hapchon. Korean J. Limnol. 31(4): 312-327. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.C., T.S. Ahn and K.S. Cho(1988) A Comparative Study of Eutrophication in Reservoirs of the Han River. Korean J. Limnol. 21(3): 151-163. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.M., H.R. Noh, S.N. Heo, H.J. Yang and J.D. Park(2005) A Study on the Water Quality Affected by the Rainfall and Influent Rivers in Paldang Reservoir, Korea. Journal of Korean Society on Water Quality 21(3): 277-283. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.W., H.Y. Lee, M.K. Kim and I.S. Cho(1994) A Study on Phytoplankton Flora in Chinyang Lake and Hapchun Lake. Journal of Environmental Science International 2(4), 367-371. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.H., J.H. Lee and K.G. An(2012) Spatio-temporal Fluctuations with Influences of Inflowing Tributary Streams on Water Quality in Daechong Reservoir. Korean J. Limnol. 45(2): 158-173. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.J., J.S. Lee, C.W. Oh, G.S. Hwang, Y.K. Kim and K.S. Lee.(2000) A hydrogeochemical study on the streams influenced by effluents from a wastewater treatment plant. Journal of the Geological Society of Korea 36(2): 137-152. (in Korean with English abstract)
- Kong, B.W., W.J. Lee, D.G. Ra and C.J. Cheong(2016) Analysis of Temporal-Spatial Characteristics of Water Quality using Water Quality Index In the Suncheon Bay. J. of Korean Society of Environmental Technology 17(2): 96-104. (in Korean with English abstract)
- 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 J. Limnol. 42(2): 221-231.
- Lee, H.J. and K.G. An(2009) The Development and Application of Multi-metric Water Quality Assessment Model for Reservoir Managements in Korea. Korean J. Limnol. 42(2): 242-252. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.S.(2011) Distribution Characteristics and Budget of Nutrients in Lake Hapcheon. M.D. Dissertation, Kumho National Institute of Technology, Gumi. (in Korean with English abstract)

- Lee, J.Y. and K.G. An(2010) Interannual and Seasonal Variations of Water Quality in Korean Dam Reservoirs and the Characteristics of Longitudinal Gradients Along the Main Axis of Headwater-to-Down reservoir. M.D. Dissertation(Graduate School of Education), Chungnam National Univ, Daejeon, 1pp. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.Y., K.C. Lee, J.E. Kim, S. Kim, J.M. Ahn and T.H. Im(2015) A Study on the Nutrient Release Characteristics from Sediments in Nak-dong River. *Journal of Korean Society on Water Environment* 31(6): 644-652. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.C., J.H. Han and K.G. An(2008) Functional Modifications of Daechung Reservoir Eutrophication by Upper Dam Construction. *Korean J. Limnol.* 41(3): 348-359. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.J., J.K. Shin and K.G. An(2010) Longitudinal and Vertical Variations of Long-term Water Quality along with Annual Patterns in Daecheong Reservoir. *Korean J. Limnol.* 43(2): 199-211.
- Park, H.G. and E.H. Cha(2013) A study on the Influence of Water Quality on the Upper Stream of Hap-Chun Lake. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* 35(2): 94-100. (in Korean with English abstract)
- Park, H.J. and K.G. An(2007) Trophic State Index(TSI) and Empirical Models, Based on Water Quality Parameters, in Korean Reservoirs. *Korean J. Limnol.* 40(1): 14-30. (in Korean with English abstract)
- Park, J.C., J.W. Park, J.K. Shin and H.M Lee(2005) Dynamics of High Turbid Water Caused by Heavy Rain of Monsoon and Typhoon in a Large Korean Reservoir. *Korean J. Limnol.* 38(1): 105-117. (in Korean with English abstract)
- Park, J.W. and D.K. Kwon(1998) A study on Early Development of Water Bloom by Blue-green Algae in Lake Hapchon I. Relationship between Increasing Standing Crop of *Microcystis aeruginosa* Kütz. and Concentration of K^+ , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in Water System. *Korean J. Limnol.* 31(2): 97-102. (in Korean with English abstract)
- Seong, J.U., H.J. Kim and J.C. Park(2011) Characteristics of TOC Distribution in Lake Hapcheon. *Journal of the Environmental Science* 20(6): 711-719. (in Korean with English abstract)
- Yeom, E.H.(2008) The Study of Improvement and Pollution Loading State on the Upper Stream of Hap-Chun Lake for Total Water Pollution Load Management System. M.D. Dissertation, Jinju National Univ. pp. 12-17. (in Korean with English abstract)