

금강수계 백제보 건설 전·후의 화학적 수질특성 및 경험적 모델 분석

김유진, 이상재¹, 안광국*

충남대학교 생명시스템과학대학 생물학과, ¹새만금지방환경청

Characteristics of chemical water quality and the empirical model analysis before and after the construction of Baekje Weir

Yu-Jin Kim, Sang-Jae Lee¹ and Kwang-Guk An*

Department of Biological Science, College of Biological Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

¹Chemical Safety Division, Saemangeum Regional Environmental Office, Jeonju 54872, Republic of Korea

*Corresponding author

Kwang-Guk An

Tel. 042-821-9690

E-mail. kgan@cnu.ac.kr

Received: 12 November 2018

First Revised: 19 January 2019

Second Revised: 23 February 2019

Revision accepted: 25 February 2019

Abstract: This study analyzed the water quality characteristics and developed empirical models prior to and after the construction of Baekje Weir, in the Geum River watershed between 2004–2017. The comparative evaluation of the surface water chemistry before and after the four major river projects on the weirs indicated that total phosphorus (TP), based on annual data, rapidly decrease after the construction of the weir while the total nitrogen (TN) decreased. Conversely, chlorophyll-*a* (CHL) concentration, which is a good indicator of primary productivity, increased after the construction of the weir together with an increase in specific conductivity. Simply put, the construction of the weir led to the decrease in concentrations of N and P due to the increased water residence time (WRT), whereas the CHL:TP ratio greatly increased in magnitude. The regression analysis of the empirical model indicated that CHL had no significant relation ($r=0.068$, $p=0.6102$, $n=58$) with TP before the weir construction, but had a relation with TP after the weir construction ($r=0.286$, $p<0.05$, $n=56$). Therefore, such conditions resulted in an increase in primary productivity on a given unit of phosphorus, resulting in frequent algal blooms. In contrast, seasonal suspended solids (SS) and TP increased during the monsoon period, compared to the pre-monsoon, thereby showing positive correlations ($r>0.40$, $p<0.01$, $n=163$) with precipitation. If the government consistently discharges water from the weir, the phosphorus concentration will be increased due to its reversion to a lotic waterbody from a lentic waterbody hereby reducing algal blooms in the future.

Keywords: weir, nitrogen, Guem River, phosphorus, water quality

서 론

최근 우리나라에서는 4 대강 사업으로 인해 하천의 환경이 급격하게 변하고 있다. 특히 수체 내에 보(weir)의 건

설로 유속, 유량과 같은 수리수문학적 특성 변화, 화학적인 변화, 물리적 서식지 변화 및 어류, 저서무척추동물 및 식물성 플랑크톤의 생물상 변화에 이르기까지 광범위하게 변화하여 하천환경에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 자연하천은 유속이 빠르고 체류시간이 짧으며, 광투과도가 높고, 영양염의 농도가 높으나, 조류(녹조)의 농도는 일반적으로 낮은 것으로 잘 알려져 있다. 그러나 최근, 도시화, 공업화 및 산업화 등으로 인해 하천 및 강에는 각종 영양염 및 오염물질이 유입되고 있고, 또한 기후 온난화 등에 의한 기상조건변화로 수체의 화학적 생물학적 특성은 크게 변화하고 있다(Kim 2013).

한편, 하천/강 생태계에 영향을 주는 또 다른 요인은 댐 및 보의 건설에 의해 수생태 특성이 급격히 변화하고 있다. 우리나라에서 하천수계의 중하류역에 건설된 소형댐과 인공보는 하천의 하상구조와 기질조성을 변화시키고(Yu 2013), 수심의 증가와 유속의 감소로 인한 정체수역을 증가시키며, 자연하천의 특성보다는 호소의 특성을 갖게 되어 복잡한 수생태 특성을 띠게 된다(An *et al.* 2001). 또한, 보 구간은 지속적인 퇴적작용이 일어나 준설작업이 빈번히 일어나고 있고, 이로 인해 유량 및 유속의 수리수문학 특성 변화를 초래한다(Macan 1961). 침전물 퇴적 및 공사시의 준설사업은 물리적 서식지 교란을 일으키며, 각종 공사과정에서 탁도 발생으로 인해 수중에 투과 광량을 감소시켜 식물성 플랑크톤과 같은 1차 생산자에 영향을 주게 된다. 이런 특성들은 정체수역 증가로 인한 질소(N) 및 인(P) 등의 축적으로 녹조현상 및 부영양화 현상을 가속하고(Fisher *et al.* 1992), 화학적 수질악화를 가속하고 있는 것으로 보고되고 있다(Krenkel *et al.* 1979). 이와 같은 하천 환경의 변화는 최종적으로는 1차 생산자인 부착조류 및 식물플랑크톤을 비롯하여 이들을 먹이로 하는 동물플랑크톤, 저서성 대형무척추동물과 어류 등 수생태계 전반에 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다(Mantel *et al.* 2010; Muller *et al.* 2011; Kim 2013).

최근 우리나라에는 하천의 저수량 확보 및 홍수와 가뭄 피해를 저감하기 위한 취지로 4대강 사업을 2009~2012년에 착수하였고(Jung *et al.* 2014), 이 일환으로 한강, 낙동강, 금강, 영산강 수계에 16개 보(Weir)를 건설하였다. 본 연구 대상지역인 금강 수계에는 본류에 세종보, 공주보, 백제보 등 3개 보를 건설하였고 이를 위해 대규모 준설이 이루어졌다(Yu 2013). 현재 우리나라의 상수원 지표수 의존율이 97%로 매우 높아 하천의 수질오염관리가 매우 중요한 실정이다. 그러나 건설 후 보 구간은 폐쇄성 수역으로 변화하며, 보의 수질관리 필요성이 시급히 요구되었다. 특히 본 연구대상 지역의 상류에는 생활하수, 점오염원 및 비점오염원의 영향권에 노출되어 있는 갑천 및 미호천의 각종 수

질오염문제가 야기되며 보의 구간에 직접적인 수질악화에 기여하고 있는 실정이다. 금강에 3개의 보 건설은 오염부하를 가중시켰으며, 수체류시간의 증가로 녹조발생 및 물의 악취현상을 가져와 부영양화에 큰 부정적인 영향을 주었다. 또한, 유속의 감소와 수심의 증가 등 수리학적 변화를 가져왔으며, 이는 수질의 전체 환경에 큰 영향을 미치게 되었으나 보의 건설에 따른 수질변화 등에 대한 연구는 극히 미흡한 실정이다.

최근 유입량 및 강수량의 감소로 금강 본류는 남조류 개체가 증가하면서 녹조발생의 빈도가 잦아지고 있다. 금강의 백제보에서는 녹조가 대량 발생하고, 강바닥은 퇴적토가 증가하고 있고, 큰빛이끼벌레, 실지렁이, 붉은깔따구 등의 수질오염 지표종들이 우점하여 분포하는 것으로 보고되고 있다(Seo 2014). 이러한 현상은 단순히 시각적인 수체의 물색뿐만 아니라, 수중의 용존산소를 고갈시켜 어류 등 생물들의 질식사 초래할 수 있고, 이취미 물질과 독성물질을 생성하여 건강상의 문제를 일으키는 것으로 알려져 있다(Ju *et al.* 2016). 실제 2012년 백제보에서의 대규모 어류폐사는 이런 용존산소 고갈과 밀접하게 관계되는 것으로 추정하고 있다.

본 연구의 목적은 금강 유역의 백제보 건설로 인한 하천의 수질 환경 변동 특성을 분석하는 것이며, 수질 환경 변동 특성을 분석하기 위해 백제보 인근 수질 조사지점에서의 총인, 총질소 및 클로로필 농도 등의 변화를 분석하였다. 본 연구는 향후 상시방류를 정부에서 수행할 경우 금강의 수질개선 및 관리를 위한 대책마련에 중요한 기초자료로 활용될 것으로 사료된다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 선정

본 연구의 대상은 4대강 건설사업의 일환으로 만들어진 백제보로서 충남 부여군 부여읍 자왕리에 위치해 있으며, 상류 20 km 부근에는 공주보가 있고, 하류 60 km 부근에는 금강하구언이 있다. 백제보의 유역면적은 7,976 km²로 금강 총 유역면적의 약 80%에 해당하고, 총저수용량 23.8×10⁶ m³, 관리수위 EL. 4.2 m, 보 높이 7.2 m, 보 길이 311 m 규모로서 주변 농경지에 농업용수 공급 및 전력 공급하고 있는 가동보이다. 백제보는 건설 전(Before Weir Construction; B_{wc})에는 우수생태계였으나, 건설 후(After

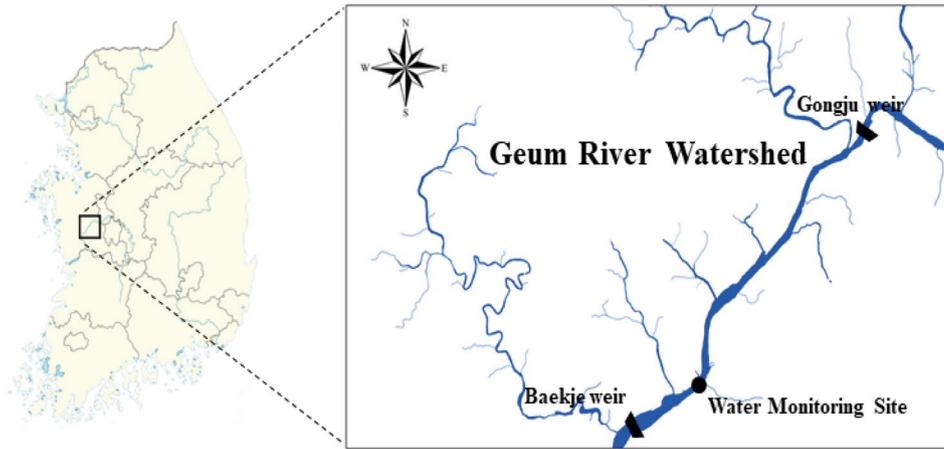


Fig. 1. The map showing the sampling sites on Geum River.

Weir Construction; A_{wc})에는 정수 및 유수생태계의 교잡형 시스템으로 전환되어 이에 따른 수질특성 변화를 분석하였다. 백제보는 충청남도 공주시 탄천면 분강리(N36°34'00.37", E126°98'48.59")에 위치하고 있다(Fig. 1).

2. 조사 기간 및 화학적 수질특성분석

이 화학적 수질 자료를 분석하기 위하여 2004년 1월부터 2017년 9월까지 측정된 환경부의 월별자료를 이용하였다. 자료 분석에 이용된 수질변수는 용존산소량(Dissolved Oxygen; DO), 생화학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand; BOD), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand; COD), 총인(Total Phosphorus; TP), 전기전도도(Electric Conductivity; EC), 총질소(Total Nitrogen; TN), 총부유물(Total Suspended Solids; TSS)이며 각 수치의 시간적 변화양상을 분석하였다. 금강 유역의 강수량은 2004년부터 2017년까지 부여군의 강수량 데이터를 분석하였으며, 강우의 하절기 특성을 고려하여 수질자료는 장마전기(Premonsoon; PRE: 5~6월), 장마기(Monsoon; MON: 7~8월), 장마후기(Postmonsoon; POS: 9~10월)로 나누어 분석하였다. 조사 기간(2004~2017년) 내에 백제보가 건설되어 건설 전후로 수질의 변화가 있을 것을 기대하여, 보 건설 전(2004~2009년, B_{wc})과 건설 후(2012~2017년, A_{wc})로 나누어 수질특성 및 변화를 분석하였다.

3. 경험적 모델(Empirical Model) 분석

백제보에서의 질소와 인의 농도 및 조류의 생산이 양

적으로 어떠한 관계가 있는지 해석하기 위해 TN-CHL, TP-CHL, TN:TP-CHL 간의 회귀분석을 통해 경험적 모델(Empirical model)을 구축하여 영양상태 평가 및 예측에 이용한다. 수질 자료를 계절별로 나누어 Log로 전환한 $\text{Log}_{10}(\text{TN})$, $\text{Log}_{10}(\text{TP})$, $\text{Log}_{10}(\text{TN:TP})$, $\text{Log}_{10}(\text{CHL})$ 을 가지고 Pearson 상관도 분석법(correlation analysis)과 회귀분석(regression analysis)을 하였다. 이를 통해 백제보의 부영양화의 특성과 부영양화의 주요 인자인 CHL에 영향을 주는 요인을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 강우특성과 수질변수와의 관계

본 연구대상 백제보 지역의 지난 14년간(2004~2017년) 강우분석에 의하면, 연평균 강수량은 1,296 mm로 장마기(7~8월) 동안 589 mm의 강수량을 보여, 이 시기의 강수량이 전체 강수량의 45%를 차지하였다. 총 강수량은 14년간 2008년과 2015년을 제외한 모든 해에서 1,000 mm 이상의 강우를 보였다. 특히, 2011년의 총 강수량은 2,014 mm로 다른 해에 비해 많은 강우가 내려 집중 강우의 해(Flood year)로 나타난 반면, 2015년에는 845 mm의 적은 강우가 내려 가뭄의 해(Dry year)로 나타났다. 집중 강우의 해(2011년)와 가뭄의 해(2015년)를 14년간의 평균 강수량의 비교분석에 따르면, 1~5월, 9~12월에는 각각 다른 해의 평균 강수량과 비슷한 강수량을 보이고, 6~8월에는 다른 해와 확연한 차이를 보였다. 강수량은 7~8월의 장마기

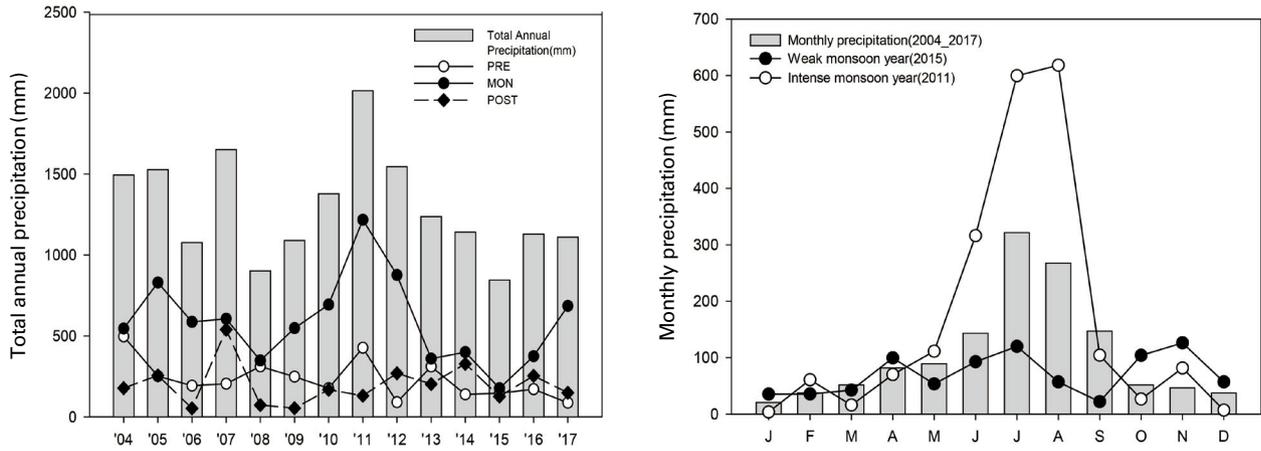


Fig. 2. Total annual precipitation and the monthly precipitation between 2004–2017.

에 집중분포 하였고, 장마전기 및 장마후기와 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 2).

2. 강우 강도에 따른 월별 수질 변화 특성

조사 기간(2004~2017년) 동안 집중 강우의 해(2011년)와 가뭄의 해(2015년)의 14년간의 월평균 강우량과 수질 변수의 관계를 비교·분석하였다. 1월부터 12월까지 모든 계절에 TN와 TP의 농도는 가뭄의 해(2015년)보다 집중 강우의 해(2011년)에 높게 유지되었다. TN의 연평균 농도는 집중 강우의 해와 가뭄의 해가 각각 3.902 mg L⁻¹과 2.982 mg L⁻¹이며, 두 기간 모두 장마기에 급격히 감소하였다가 장마후기에 다시 증가하는 유사한 변화양상을 보였다(Fig. 3). 이는 장마기에 증가된 강우에 의하여 유기물이 희석된 것으로 사료된다(An and Yang 2007). 집중 강우의 해(2011년)와 가뭄의 해(2015년)의 TP의 농도는 장마기를 제외하고는 큰 차이를 보이지 않았으며, 가뭄의 해의 TP 농도는 계절 변화폭이 집중 강우의 해에 비해 완만하게 나타났다.

집중 강우의 해(2011년)의 TP 농도는 장마기인 7월에 최댓값 493.0 µg L⁻¹을 나타내며 가뭄의 해(2015년)의 TP 농도 최댓값 99.0 µg L⁻¹(7월)보다 약 5배 높게 나타나 장마기에 뚜렷한 차이를 보였으며, 2011년과 2015년 7월 강우량은 각각 599.6mm와 120.0mm로 이 수치 또한 약 5배의 차이가 나타났다. 이는 TP 농도가 강우에 의해 증가와 밀접한 관계($r=0.7209, p<0.05 (p=0.0082)$)가 있음을 의미하였다. 두 기간 동안 TN/TP는 2011년의 장마기인 7월

과 8월을 제외하고는 모두 TN/TP > 16 으로 식물성 플랑크톤 성장에 대한 인(P) 제한특성(P-limitation)을 보였으며, 장마기에 TN/TP 값이 감소하는데 이 원인은 하절기에 인의 유입증가로 사료된다. EC는 장마기에 농도가 낮아지는 양상을 보였다. 이는 장마기의 집중호우로 인해 이온이 희석되는 효과를 나타내었기 때문으로 사료된다. 집중 강우의 해(2011년)에 강우에 의한 희석효과가 커지기 때문에 가뭄의 해(2015년)보다 EC의 농도가 더 낮은 것으로 나타났다(Fig. 3). CHL-a는 두 해가 다른 변동양상을 보였다. 집중 강우의 해(2011년)의 CHL-a 농도는 장마기에 감소하다가 장마후기에 급격히 증가하는 양상을 보인 반면, 가뭄의 해(2015년)에는 장마기에 증가하다가 장마후기 감소하는 양상을 보였다.

3. 보 건설 전·후의 수질 특성 및 계절적 변이

본 연구기간 동안, 보 건설 전(2004~2009년)과 보 건설 후(2011~2017년)의 수질변이 양상 분석에 따르면, 보 건설 전에 TP의 평균 농도는 180~200 µg L⁻¹ 범위 내에 존재하는 반면, 보 건설 후에는 TP의 평균 농도가 70~80 µg L⁻¹ 범위 내에 존재하였다. 보 건설 후에 TP의 농도가 뚜렷하게 감소된 것으로 나타나며, 이는 보가 건설됨으로써 하천이 호소화되어 수체류시간이 길어지며, 인의 침전효과가 나타나기 때문으로 사료된다(Fig. 4). TP은 보 건설 전·후 평균 농도 각각 196.6 µg L⁻¹, 75.2 µg L⁻¹로서 우리나라 환경부의 하천 수질기준에 의거할 때 각각 3급수 및 2급수의 수질을 보였다. TN도 보 건설 전에 비해 후에 일부 감

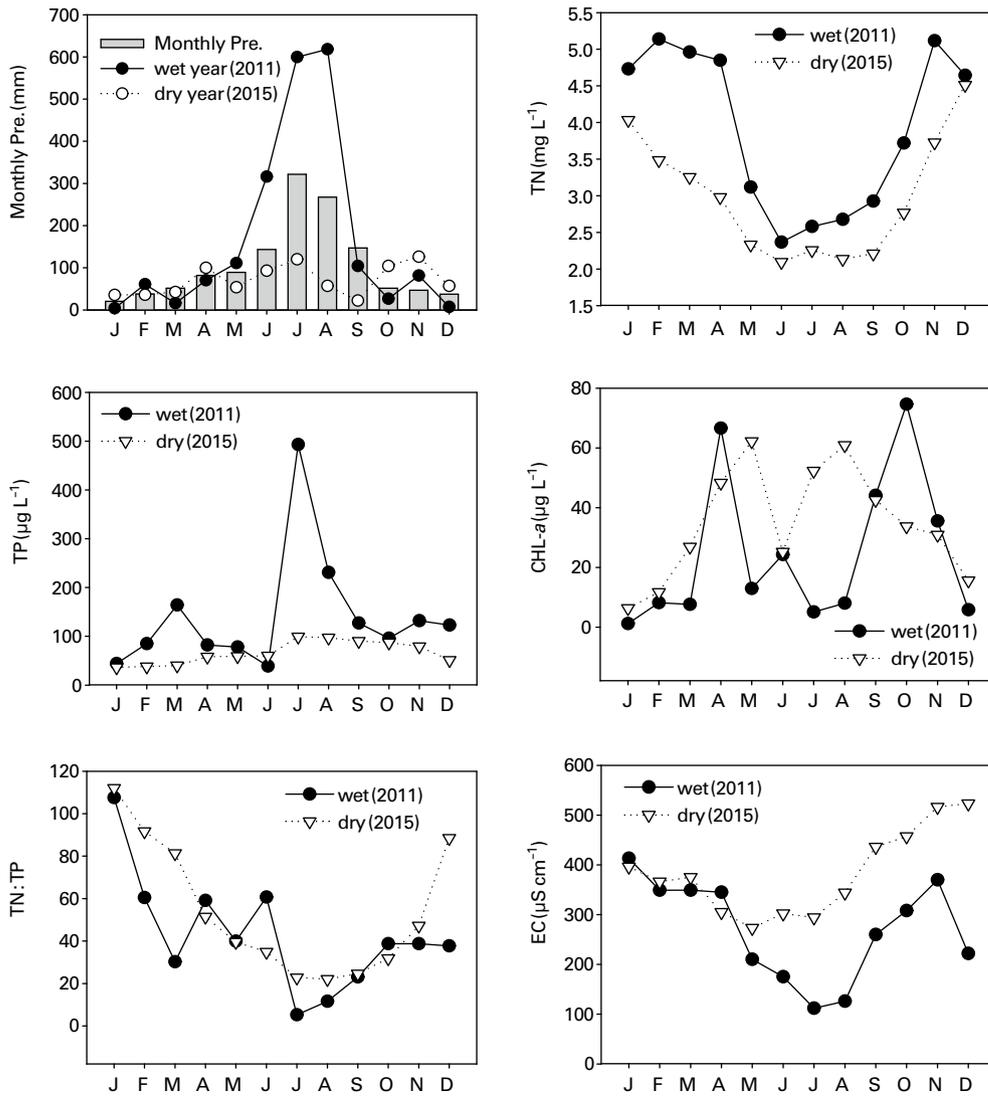


Fig. 3. Seasonal fluctuations of water chemical properties before and after the construction of the weir on the river.

소된 것으로 나타났지만 큰 변화는 보이지 않는다. 이는 보에 의해 하천의 체류시간이 길어지면서 하천의 미생물들이 양분으로 소모하였을 것으로 사료된다. 보 건설 후에 TP이 감소했기 때문에 TN/TP의 값은 증가한 것으로 나타난다. CHL-a의 농도는 보 건설 전에는 0~150 µg L⁻¹ 범위 내에 존재하고, 보 건설 후에는 0~70 µg L⁻¹ 범위 내에 존재하였다(Fig. 4).

TN, TP, CHL-a, BOD와 COD는 백제보 건설 전에 비해 건설 후에 낮은 농도를 보였다. 반면에 전기전도도는 보 건설 전에 비해 건설 후에 증가하는 양상을 보였다(Fig. 5). 현재 발생하는 환경문제에 비해 TN와 TP 값은 감소

하는 것으로 나타나는데 이는 보 건설에 따른 수체류시간의 증가 때문인 것으로 판단된다(Ryu *et al.* 2015). 또한, 보 건설로 인해 하천이 호소화되면서 수체가 정체되어 수체 전체의 TN와 TP은 증가하지만, 바닥에 가라앉아 표층의 TN와 TP은 감소되어 나타난 것으로 판단된다. DO은 건설 전과 건설 후의 농도의 차이가 없었다(Fig. 5).

보 건설로 하천이 정체되면 DO이 적어질 것으로 예상되지만, 보 건설 전후의 농도 차이가 거의 없었다. 이는 보 건설 후 증가한 조류들의 광합성 작용이 활발하여 산소 공급이 증가 된 것으로 보인다. CHL-a는 보 건설 전에는 15~90 µg L⁻¹의 범위 내에 분포하고, 보 건설 후에는

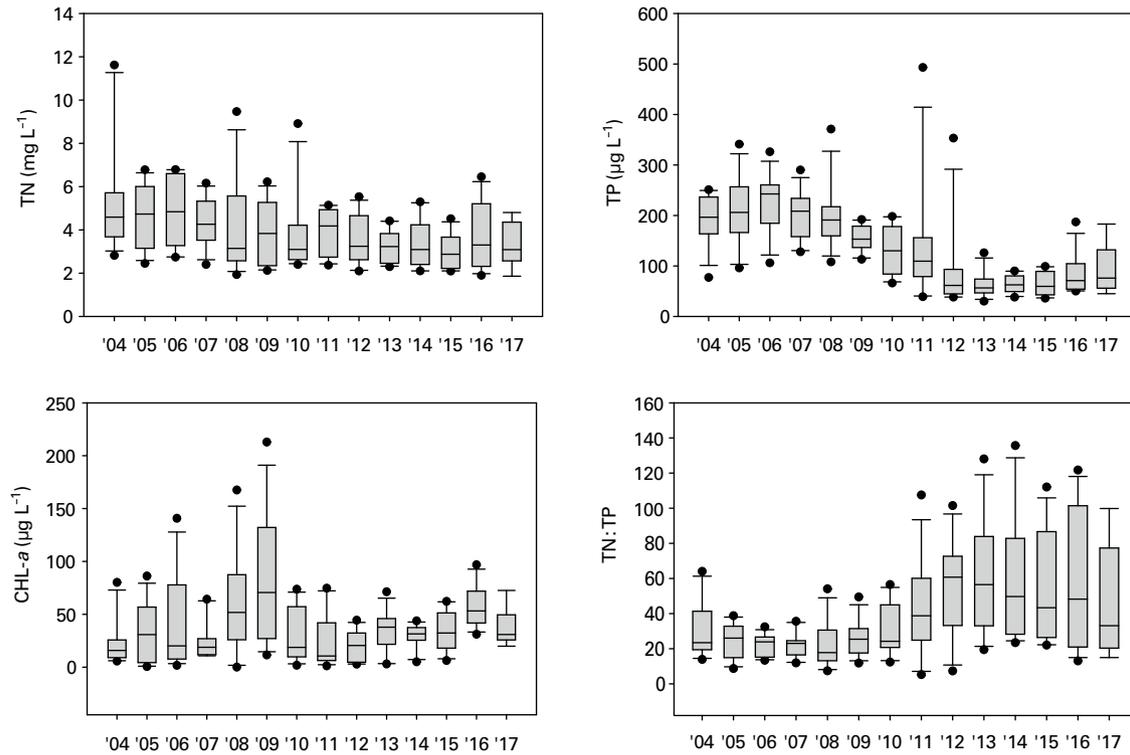


Fig. 4. Temporal variation in water quality on Baekje Weir.

20~50 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위 내에 분포하며 건설 후에 조류의 양은 감소한 것으로 나타났다(Fig. 5). 4대강 정비사업 이후, 현재 하천에서 발생하고 있는 녹조 문제에 비해, CHL-a는 15~90 $\mu\text{g L}^{-1}$ (B_{wc})의 범위 내 분포에서 20~50 $\mu\text{g L}^{-1}$ (A_{wc})의 범위 내 분포로 CHL-a 값이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이는 정부에서 녹조제거선을 이용해 인위적으로 금강 내의 녹조를 제거하였기 때문으로 판단된다. EC는 보 건설 전보다 건설 후에 농도가 높아진 것으로 나타났는데, 금강 상류에 위치하는 미호천은 오염물질 유입량이 가장 많은 하천으로 백제보에 유입되는 오염물질의 절반 이상은 미호천에서 흘러들어온다. 보 건설 전에는 백제보 부근은 유수생태계로 유입된 오염물질이 흘러나갔지만, 보 건설 후에는 오염물질이 수체에 장시간 정체되고 그 결과로 EC 값이 높아진 것으로 판단된다.

보 건설 전 (B_{wc} , 2004~2009년)과 후 (A_{wc} , 2012~2017년)로 나누어 분석한 수질변수의 계절적 변화양상에 따르면, TP과 TN, CHL-a, BOD, TSS 농도는 보 건설 전에 비해 건설 후에 낮게 나타났고, EC는 건설 전보다 건설 후가 높게 나타났다(Fig. 6). TP의 농도는 TN와 다른 계절적 변이양

상을 보인다. TP의 농도는 보 건설 전에는 갈수기인 6월에 최고치(239.8 $\mu\text{g L}^{-1}$)를 나타냈고, 그 후 장마기에는 감소하는 양상을 보였다(Fig. 6). 보 건설 후에는 장마기에 증가하여 8월에 최고치(153.0 $\mu\text{g L}^{-1}$)를 나타냈고, 장마후기에는 감소하는 양상을 보였다(Fig. 6). 보 건설 전의 분석 결과는 이전의 다른 하천의 수질연구에서 인의 유입이 주로 하절기에 발생하여 8월에 최댓값을 보이고 다시 강우의 감소에 따라 농도가 감소한다는 연구와는 다른 결과를 보였고, 보 건설 후의 분석 결과는 이전 연구와 유사한 결과를 보였다(An and Shin 2005). TN의 농도는 장마전기에 급격히 감소하다가 장마후기인 10월에 증가하는 양상을 보였다(Fig. 6). 이는 중류 지점의 지역적 특성으로 미루어 볼 때, 강우로 인한 유입량이 더욱 많아져 장마기에 TN 농도가 높아질 것으로 생각되나, 이미 인접한 공단 및 인구의 밀집으로 인한 생활하수 및 농업폐수 등의 오염물질이 하천으로의 유입으로 오염도가 높아진 상태에서 장마기의 집중 강우는 급격한 유량 증가를 가져와 오염물질이 희석되는 것으로 나타났다(Oh and Koh 2003).

보 건설 전, 후의 TP과 TN 농도 분석에 따르면, 모든 계

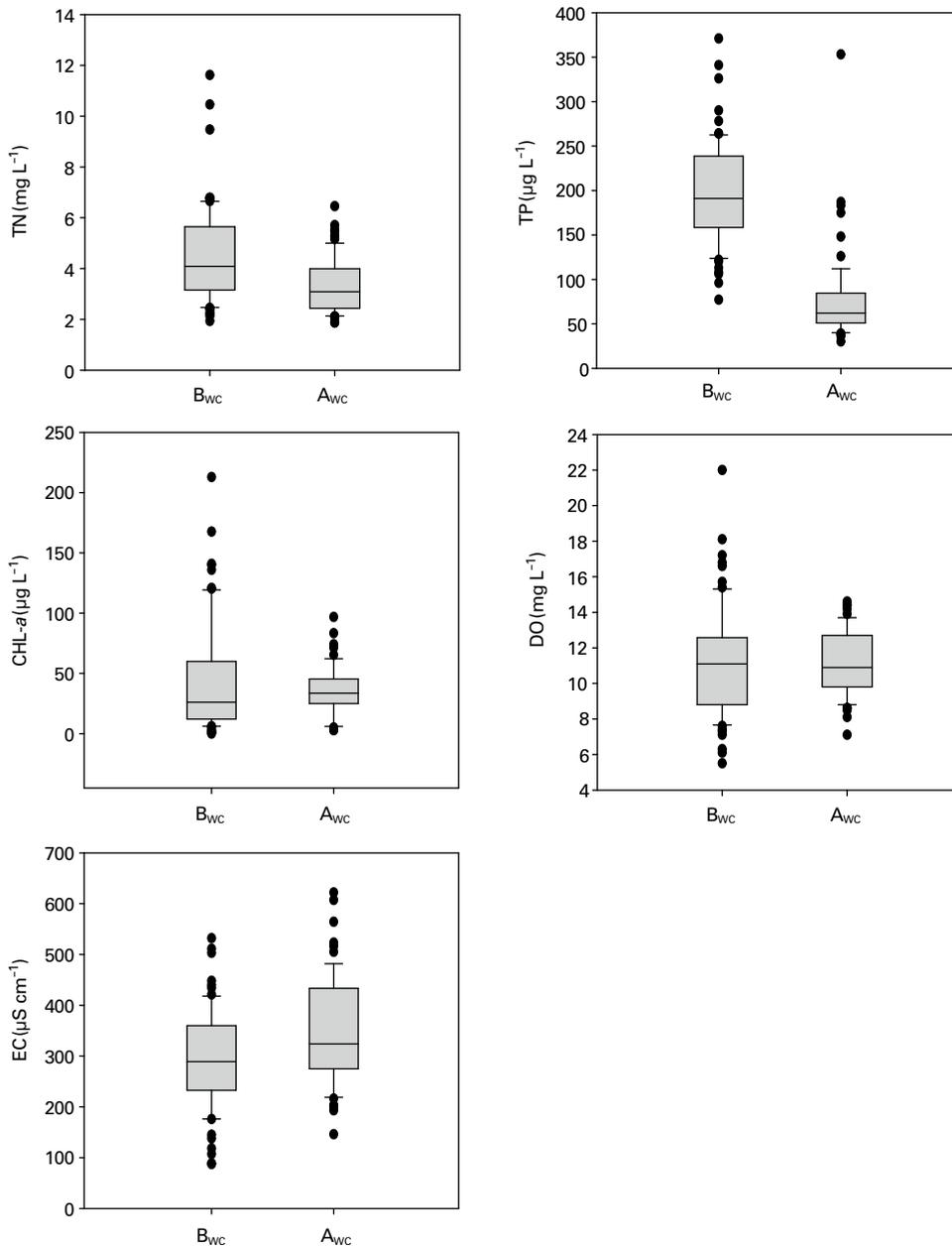


Fig. 5. Seasonal fluctuations in water quality in the period of B_{wc} (2004-2009) and A_{wc} (2012-2017), respectively.

절에 건설 전 농도가 높은 것으로 나타났다(Fig. 6). 이는 보 건설 후에 호소화되어 표층의 인과 질소가 가라앉아 표층의 농도는 낮게 나온 것으로 사료된다. DO는 보 건설 전과 후의 농도에 큰 차이가 없는 것으로 나타나며, 두 기간 모두 장마기에 감소하며 장마후기에 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6). TSS는 보 건설 전의 농도가 건설 후보다 높게 나타났으며, 장마기인 8월에 최댓값을 보였다.

유기물 오염의 지표로써 이용되는 BOD와 COD 농도는 유사한 계절 변이 특성을 보였다. BOD는 보 건설 전에 평균 3.3 mg L⁻¹로 우리나라 하천 수질 기준에 의한 3등급, 건설 후에는 평균 2.6 mg L⁻¹로 2등급의 수질을 보였다. 보 건설 전과 건설 후에 BOD는 1월부터 4월까지 급속히 상승하기 시작하여 각각 4월에 최고치(6.1 mg L⁻¹), 5월에 최고치(4.0 mg L⁻¹)를 나타냈으며, 이후 장마기까지 급격히 하

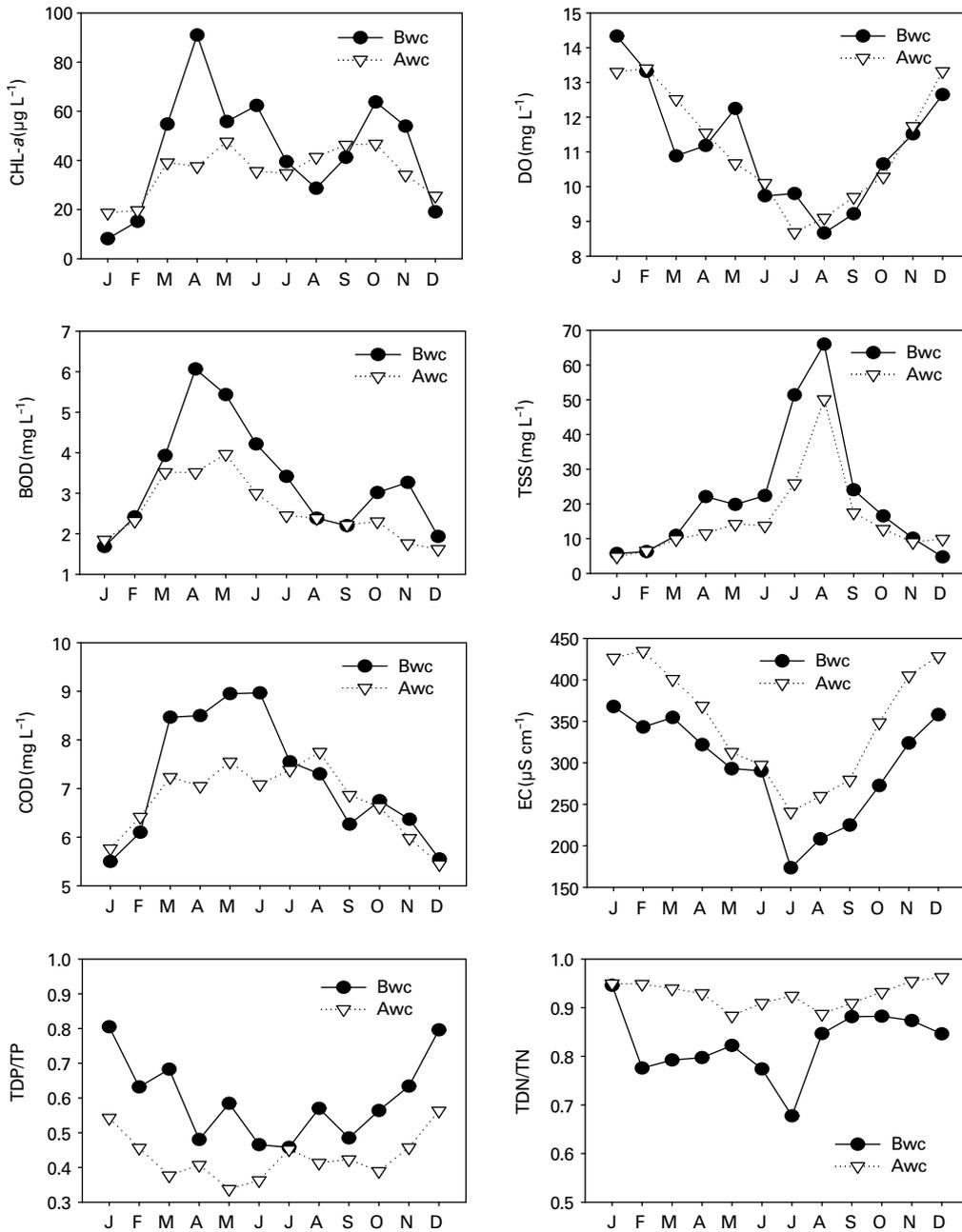


Fig. 6. Seasonal fluctuations in water quality before (2004–2009) and after the construction of the weir (2012–2017)

강하였다. 갈수기인 1월에서 5월까지 BOD가 증가한 것은 유량이 적은 갈수기에 유기물질이 농축되기 때문에 BOD가 증가되는 것으로 보였고, 반면 장마기에는 유량이 급격히 많아져 유기물질이 희석되는 효과를 가져와 BOD가 감소한 것으로 나타났다(Fig. 6). EC는 모든 계절에 건설 전의 농도보다 건설 후의 농도가 높게 나타났다. 보 건설 전과 후에 모두 장마기까지 급격히 감소하는 양상을 보였고,

장마후기부터 다시 증가하는 양상을 보였다(Fig. 6). 이는 장마기에 집중강우로 인해 다량의 이온이 일시적으로 희석되기 때문으로 판단된다(Kang and An 2006).

4. 경험적 모델(Empirical Model) 구축

백제보에서 수질 변수들 간의 관계분석을 위해 1차 회

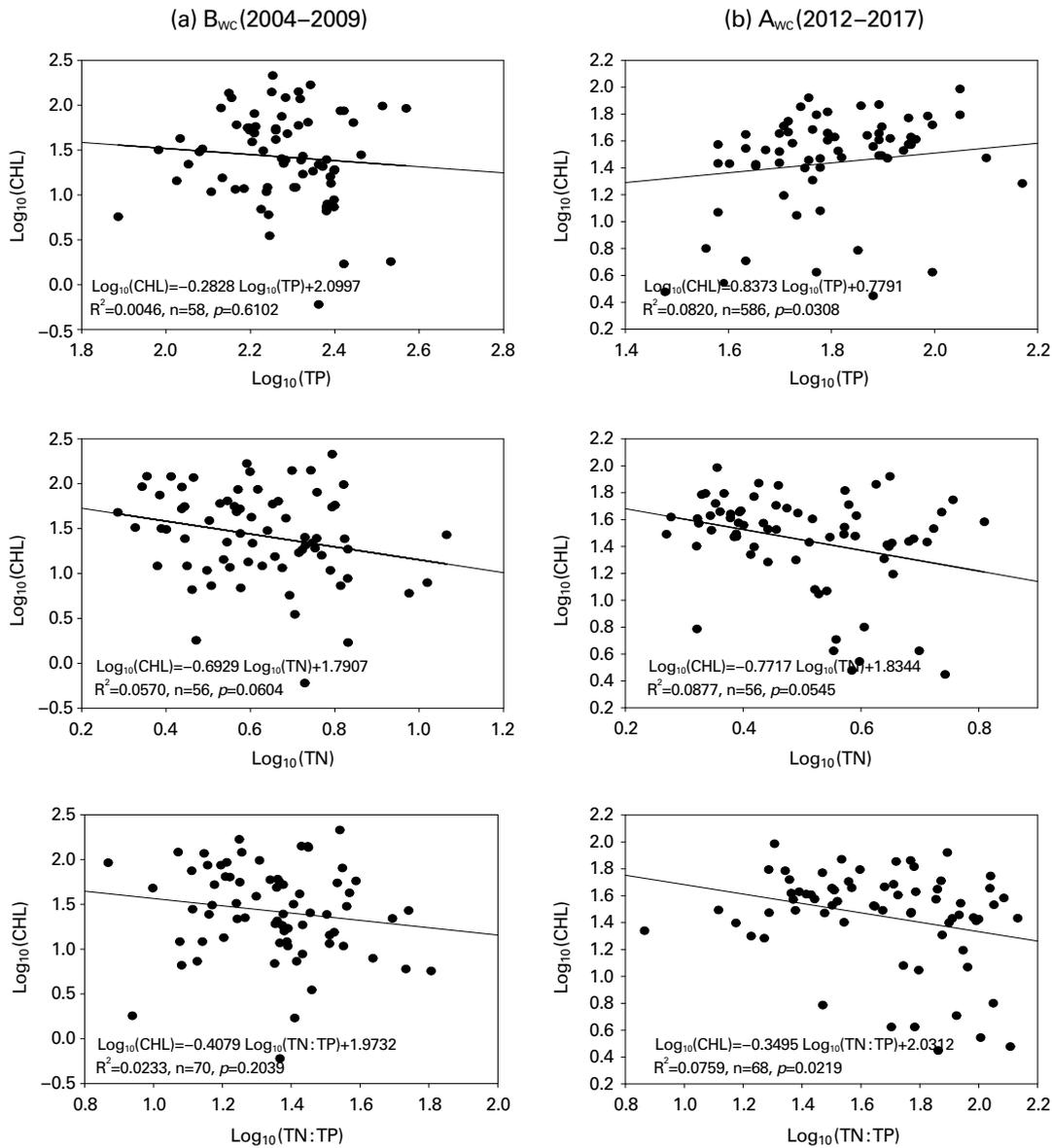


Fig. 7. Empirical models and the regression equations of the trophic variables (TN, TP, CHL-*a*, TN/TP) on the Baekje Weir. The dataset used here were based on the monthly average of each parameters during the 2004–2017

귀 경험적 모델을 이용하여, 보 건설 전과 건설 후로 대별하여 인자를 분석하였다. 백제보 건설 전에 대한 부영양화 변수의 경험적 모델의 분석에 따르면, TP와 CHL-*a*의 상관관계는 유의성이 없는 것으로 나타났는데 ($R^2 = 0.0046$, $p > 0.05$), 이는 TP 농도 범위에 좁아서 CHL-*a*의 농도의 영향에 미미한 것으로 사료되었다(Fig. 7). 백제보 건설 후에 대한 경험적 모델의 분석에 따르면, TP에 대한 CHL의 회귀분석에 따르면 CHL-*a*의 변이는 TP의 변이에 의해

조절되는 것으로 나타났고 ($p < 0.05$, $n = 56$), CHL-*a*는 TP와 1차 함수관계 ($\text{Log}(\text{CHL}) = 0.8373 \times \text{Log}(\text{TP}) - 0.0587$)를 보여, TP의 증가에 따라 조류의 1차 생산력이 증가함을 보였다(Fig. 8). 이러한 결과는 보 건설로 인해 하천이 호소화되었다는 것을 의미한다. 보가 건설되기 전, 유수생태계 일 때에는 TP이 유입되면 TP은 washing 되어 녹조 생산에 직접적인 영향을 주지 못하지만, 보를 건설함으로써 하천이 호소화되면서 정수생태계의 시스템을 나타내

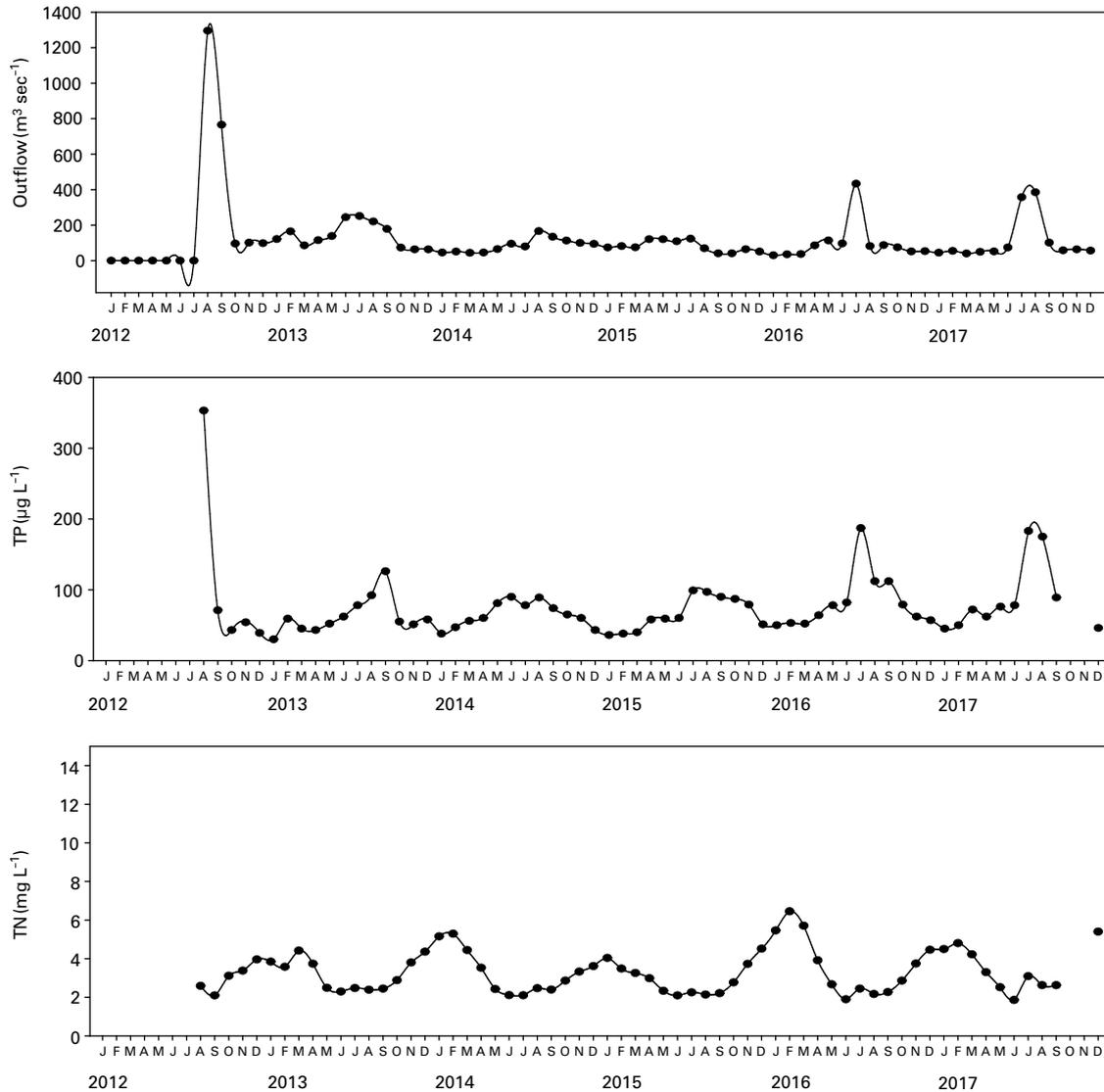


Fig. 8. Monthly fluctuation of outflow volume (discharge), TP, and TN in Baekje Weir

어 washing 효과가 약해져 TP의 유입은 녹조 생산에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보였다. 보 건설 전·후 TN은 CHL-*a*와 유의한 상관관계를 보이지 않았으며, 이는 TN 농도가 수계 내에 이미 필요 이상 존재하며 인(P)이 제한요인(limited factor)으로 작용한 것으로 나타났다. 따라서 백제보는 4대강 사업 후 호수형 수체가 되면서 인(P)에 의해 식물성 플랑크톤의 1차 생산력이 조절되는 것으로 나타났고, 인(P) 증가에 따라 녹조의 농도 및 수화현상의 빈도가 증가되는 것으로 사료되었다. 한편 TN의 농도는 CHL-*a*의 농도에 결정인자로 작용하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 경험적 모델은 백제보의 향후 부영양화 현

상 저감 및 수 환경 관리에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 보 방류에 대한 영양염류 농도 변화

백제보 구간의 인과 질소의 농도는 상류에 위치한 공주보의 방류량 및 빈도 및 강우량에 의해 직접적으로 영향 받는 것으로 나타났다. 보의 방류량은 백제보가 건설된 2012년 이후에 2012년 8월에 처음 방류가 시작했다. 2012년 8월에 대규모 방류($1295.4 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$)가 처음 이루어졌는데, 이는 상류에 위치한 공주보 방류 1일 후에 백제보

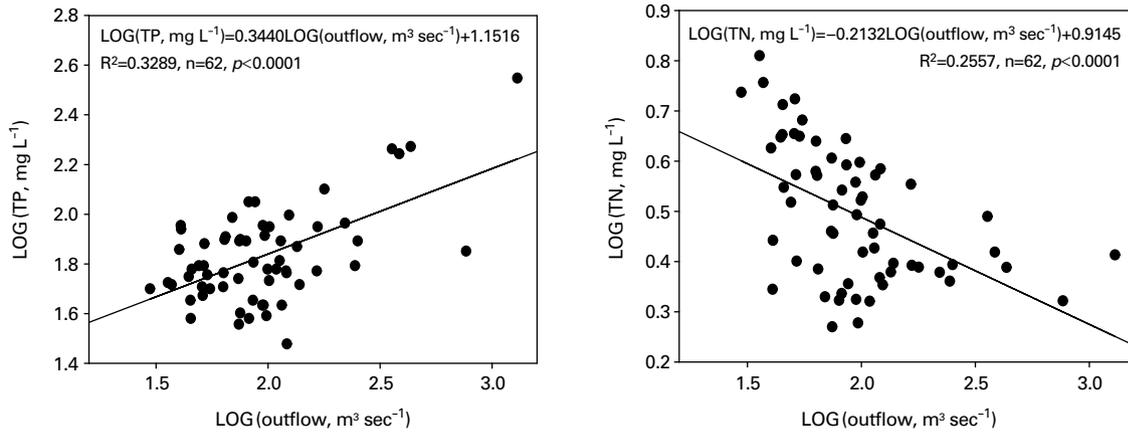


Fig. 9. Regression analysis of nutrient concentrations of TN and TP on the outflow volume (discharge volume) in Baekje Weir. The dataset was based on the monthly average of each parameter during the 2012–2017.

의 수위가 증가하면서 일어났다. 즉, 상류의 공주보의 방류는 2012년 8월에 백제보의 TP 농도를 급격히 증가(353 μg L⁻¹)시키며 수체 내의 인 농도를 급격히 증가시켰다(Fig. 8). 이는 보의 대규모 방류에 따른 상류 공주보 방류수의 영양염 유입 증가로 TP가 급격한 증가를 보인 것으로 사료된다. 실제, 영양염과 방류량의 상관 분석에서, 방류량과 TP는 유의한 상관관계($r=0.550, n=62, p<0.0001$)를 보였다(Fig. 9).

적 요

본 연구는 2004~2017년 동안 금강수계에서 백제보 건설 전·후의 화학적 수질 특성 및 경험적 모델 분석을 실시하였다. 4대강 사업 전후의 표층수의 수질에 대한 비교평가에 따르면, TP의 농도는 보 건설 후 급격히 감소하는 현상을 보였고, 총질소 역시 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 식물성 플랑크톤의 1차 생산력의 지표인 CHL-*a* 농도와 EC는 보 건설 후 증가한 것으로 나타났다. 즉, 보 구간에서 수체류 시간의 증가로 인해 N, P의 농도는 감소하였지만, CHL/TP 비는 크게 증가하였고, 이로 인해 단위 인(P) 농도 대비 1차생산력은 증가한 것으로 나타났다. 경험적 모델의 회귀분석에 따르면, 보 건설 전 기간에 CHL-*a* 농도는 TP와 유의한 관계를 보이지 않았으나($r=0.068, p=0.860, n=58$), 보 건설 이후에 두 변수 사이에는 유의한 관계($r=0.6102, p<0.05, n=56$)를 보였다. TN 및 이온희석 현상의 지표로 이용된 EC는 계절별 분석에서 장

마기에 크게 감소하는 현상을 보이며 강우와 역상관 관계($r=0.5378, p<0.01, n=163$)를 보였으나, 계절별 TP과 부유물 농도(SS)는 갈수기에 비해 장마기에 증가하는 특성을 보여 강우와 정상관 관계($r>0.40, p<0.01, n=163$)를 보였다. 2018년 현재 보 구간의 완전한 상시방류를 시행할 경우, 향후 수체의 하천화에 의해 TP 농도는 증가하며, 녹조 현상은 감소할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 대전녹색환경지원센터의 2018년도 연구개발 사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- An KG, JW Seo and SS 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 KG and IC Shin. 2005. Influence of the Asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream. Korean J. Ecol. Environ. 38:54–62.
- An KG and WM Yang. 2007. Water quality characteristics in Keum River watershed. Korean J. Limnol. 40:110–120.
- Fisher TR, ER Peele, JW Ammerman and L Harding. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. Mar. Ecol. Prog. Ser. 82:51–63.

- Ju HJ, IC Choi, JHYoon, JJ Lee, BJ Lim and SH Lee. 2016. Analysis of cyanobacterial growth pattern in Bekjae Weir during recent 3 years. pp. 562–563. In Proceedings of Korean Society of Water Quality. Bexco, Busan, Korea.
- Jung WH, YI Kim, SJ Yi and JY Huh. 2014. Monitoring of riverbed changes in the mid to downstream of the Geum River before and after the Geum Rivers restoration project. pp. 182–183. In Proceedings of Korean Society of Water Quality. Kintex, Ilsan, Korea.
- Kang SA and KG An. 2006. Spatio-temporal variation analysis of physico-chemical water quality in the Yeongsan-River watershed. Korean J. Limnol. 39:73–84.
- Kim BR. 2013. A study on change of water quality of the artificial weir in the middle of the Nakdong River. MD. dissertation, Yeungnam University.
- Krenkel PA, GF Lee and RA Jones. 1979. Effects of the impoundments on downstream water quality and biota. pp. 289–306. In The Ecology of Regulated Stream (Ward JV and FA Stanford eds.). Plenum Press, NY.
- Macan TT. 1961. Factors that limit the range of fresh-water animals. Biol. Rev. 36:51–198.
- Mantel SK, NWJ Muller and DA Hughes. 2010. Ecological impacts of small dams on South African rivers Part 2: Biotic response-abundance and composition of macroinvertebrate communities. Water Sa 36:361–370.
- Mueller M, J Pander and J Geist. 2011. The effects of weirs on structural stream habitat and biological communities. J. Appl. Ecol. 48:1450–1461.
- Oh KH and YK Koh. 2003. Water quality and pollutions of river waters in Gwangju city. J. Environ. Sci. Int. 12:287–297.
- Ryu SH, IC Lee, TY Jang and KH Kim. 2015. Analysis of water quality variation by weir construction in the Nakdong River Basin. pp. 16–20. In Proceedings of the Korean Society for Marine Environment and Energy. Tongyeong Campus, Gyeongsang National University.
- Seo JE, HS Chae, KJ Jung and YJ Na. 2014. Studies on Distribution of *Pectinatella magnifica* and Water Environment in the main stream of the Geum River. Project No: NIER-SP2015–013. Woosuk University, Wanju.
- Yu KA. 2013. Initial effects of large artificial structure construction on river ecosystem. Ph.D. dissertation. Konkuk University, Seoul.