

기술노트

보 건설 이후 영산강 보 구간에서의 질소계열 영양염류 및 식물플랑크톤 동태

서경애 · 나정은 · 류희성<sup>†</sup> · 김경현

국립환경과학원 영산강물환경연구소

Characteristics of Nitro-nutrients and Phytoplankton Dynamics  
in the Yeongsan River after Weir Construction

Kyung-Ae Seo · Jeong-Eun Na · Hui-Seong Ryu<sup>†</sup> · Kyunghyun Kim

Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 19 April 2018, Revised 29 June 2018, Accepted 29 June 2018)

Abstract

Insomuch as it is important to manage water quality, from the perspective of water management, it is essential to understand the effect of the weirs on water quality and phytoplankton dynamics in various regions. The purpose of this study is to investigate the characteristics of nitro-nutrients, as well as occurrences and succession patterns of phytoplankton, in the river sections of the two weirs in the Yeongsan River for the five years (from 2012 to 2016) after the weir construction. In respect to this data, the average water temperature measured at the representative point in the section of the Seungchon Weir (17.1 °C) was higher than that of the Juksan Weir (16.6 °C) by comparison. By way of an analysis of this data, it was found that the water quality variables such as, organic matter, nitrogen nutrients and phosphorus nutrients were improved gradually during the period, but the degree of the improvement differs as noted and measured between the weirs. Under the circumstances, it is especially noted that the NH<sub>3</sub>-N concentration was higher for the point of the Seungchon Weir (2.204 mg/L) than that of the Juksan Weir (1.157 mg/L). This indicates that effluent as seen from sewage treatment plants and hydrological feature near the densely population area, could be the main cause for the incidence of water pollution in the upstream section of the Seungchon Weir. Additionally, the phytoplankton analysis showed that a relative abundance of diatoms and green algae were 56.9 % and 25.8 % respectively. However, it is noted that the cyanobacteria was measured lower as 10.7 %. Also, in the study sites cell density and occurrence frequency of cyanobacteria were relatively lower than compared to the same measurements noted in other rivers.

**Key words** : Algae, Sewage treatment plant, Water quality, Weir management

1. Introduction

영산강은 타 수계에 비하여 수질오염도가 높은 것으로 알려져 있으며, 특히 광주광역시와 같은 인구밀집지역이 영산강 상류 구간에 위치하고 있어, 부영양화 및 저층 산소 고갈 등의 수질문제가 빈번하게 발생되어 왔다(Shin et al., 2016). 게다가 유역 면적 및 유출량이 작고 지형 특성에 따른 하상계수가 높으며, 4대강 중 유일하게 농업용 저수지로부터만 하천 유지용수를 공급받아 안정적인 유량을 확보하기 위해 취약한 특징이 있다(Chong et al., 2015; Jung et al., 2012).

4대강 사업의 일환으로 영산강 본류에는 2개의 보가 건설되었으며, 새롭게 축조된 승촌보와 죽산보는 영산강 수계

의 물리적 환경변화를 야기하게 되었다. 보의 건설로 보 구간의 수량은 많아졌으나, 수심이 깊어지고 흐름이 지체되어 체류시간이 증가되었다(Jung and Kim, 2017). 이러한 특징의 하천을 호소형 하천으로 구분할 수 있으며, 일반적인 하천에 비해 수질 및 수생태계 전반에 많은 변화가 발생하는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2014). 또한 영산강 보 구간은 상류유역의 밀집된 인구 분포로 인하여 승촌보 상류 구간에서 일평균 72만톤의 공공하수처리장 방류수가 유입되고 있으며, 이는 영산강 갈수기 유량의 67%를 차지하여 승촌보 구간의 유량 및 수질에 미치는 영향이 크다(Lee and Jung, 2015). 이러한 영산강 보 구간의 지역적 특성에도 불구하고, 보 건설 이후 수질 및 수생태계에 대한 연구는 상수원으로 활용되고 있는 한강과 낙동강에 집중되는 경향이며, 영산강에 대한 연구는 상대적으로 매우 부족한 실정이다(Shin et al., 2015; Shin et al., 2016).

식물플랑크톤은 수생태계의 1차 생산자로서 수질 및 수리수문학적 특성에 따라 현존량과 종조성의 변화가 뚜렷하기 때문에, 수환경의 변화를 파악하는데 중요한 생물학적 인자로 이용되고 있다. 따라서 보 건설 이후 수질 및 조류발생의

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
huistar715@korea.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

특성을 파악하는 것은 보 구간 수생태계의 진단 및 향후 관리방안을 마련하는 측면에서 중요하다고 할 수 있다(Tekile et al., 2015). 최근 남조류 대발생에 대한 주요 요인으로 질소계열 영양염이 강조되고 있으며, 특히 암모니아성 질소의 농도가 높은 영산강의 특성을 고려할 때, 식물플랑크톤 발생과 질소계열 영양염류가 함께 고려되는 것이 필요하다.

이러한 보 건설과 같은 물리적 수환경 변화에 따른 식물플랑크톤 발생 및 천이 요인을 파악하기 위해서는 장기적 모니터링이 필수적이다(Gallegos et al., 2010; Ryu et al., 2016). 이에 본 연구는 보 건설 이후 영산강 본류 보 구간에서 수질 및 식물플랑크톤 발생 양상을 5년간 모니터링하여 그 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구 결과는 영산강 보 구간의 수질 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. Material and Methods

본 연구의 대상지역인 영산강은 우리나라 4대 강 중 하나로 유역면적은 약 3,460 km<sup>2</sup>며, 담양군 용추봉에서 발원하여 광주광역시, 나주시, 및 영암군 등을 지나 영산강하구

둑을 거쳐 서해로 흐르고 있다. 그 중 영산강 중류 구간에 위치한 승촌보와 죽산보는 각각 광주광역시 남구 승촌동, 전남 나주시 다시면에 위치하고 있다. 유역면적은 1,977 km<sup>2</sup>, 2,359 km<sup>2</sup>과 저수용량 9백만 m<sup>3</sup>, 27백만 m<sup>3</sup>의 다기능 보이다. 조사는 2012년 5월부터 2016년 12월까지 매주 1회 승촌보와 죽산보 상류 500 m 구간에서 실시하였으며, 현장 측정 및 수질분석을 수행하였다(Fig. 1). 현장항목은 현장수질측정기(Hydrolab, SURVEYOR 4)를 이용하여 수온, pH, DO, 전기전도도를 측정하였으며, 수질분석을 위하여 채수한 시료는 4 °C의 냉장조건에서 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 수질오염공정시험기준(ME, 2011)에 준하여 BOD, COD, TOC, T-N, DTN, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, T-P, DTP, PO<sub>4</sub>-P, SS, Chl-a, 총대장균군, 분원성대장균군 등 14개 항목을 분석하였다. 식물플랑크톤 분석을 위한 시료는 최종 농도가 5%가 되도록 Lugol's solution으로 현장에서 고정하여 운반하였으며, 24시간 이상 정치하여 침전시킨 다음 광학현미경(Nicon Eclipse Ni)으로 검경을 실시하였다. 정량분석은 Sedwick-Rafter chamber를 사용하여 출현 종별로 계수한 후 mL당 세포수로 산정하여 실시하였다(ME, 2011). 연구대



Fig. 1. Location of the sampling sites in two weirs of the Yeongsan River.

상 지역의 기상 관측자료는 기상청(KMA, 2018)에서 제공 받았다. 수질 및 환경인자, 식물플랑크톤과의 상관성을 파악하기 위하여 2012년도부터 2016년도까지의 5년간의 수질 데이터를 이용하여 SPSS(ver. 17.0) 통계처리 프로그램으로 상관분석을 실시하였다.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 영산강 보 구간의 기상 및 수질 요인 특성

승촌보 및 죽산보가 위치한 광주지역에서 조사기간 동안

연도별 하절기(7~8월) 누적 강수량은 각각 2012년 759 mm, 2013년 653 mm, 2014년 610 mm, 2015년 339 mm, 2016년 382 mm로 나타났으며, 연평균 강수량의 30% 이상이 이 시기에 집중되는 몬순강우의 특징을 보였다. 이로 인하여 승촌보 및 죽산보의 유입·방류량 변화가 하절기에 집중되는 양상을 나타내었다(Fig. 2(a), Fig. 3(a)). 한편, 연도별로는 2016년 강수량이 예년에 비해 상대적으로 적었으며, 특히 8월에 누적 강수량이 81 mm에 불과하였다. 반면에 동기간의 일사량은 1,162.2 MJ/m<sup>2</sup>로 40% 이상의 강우가 집중되었던 조사기간(2012년 886.3 MJ/m<sup>2</sup>, 2013년 1,006.4

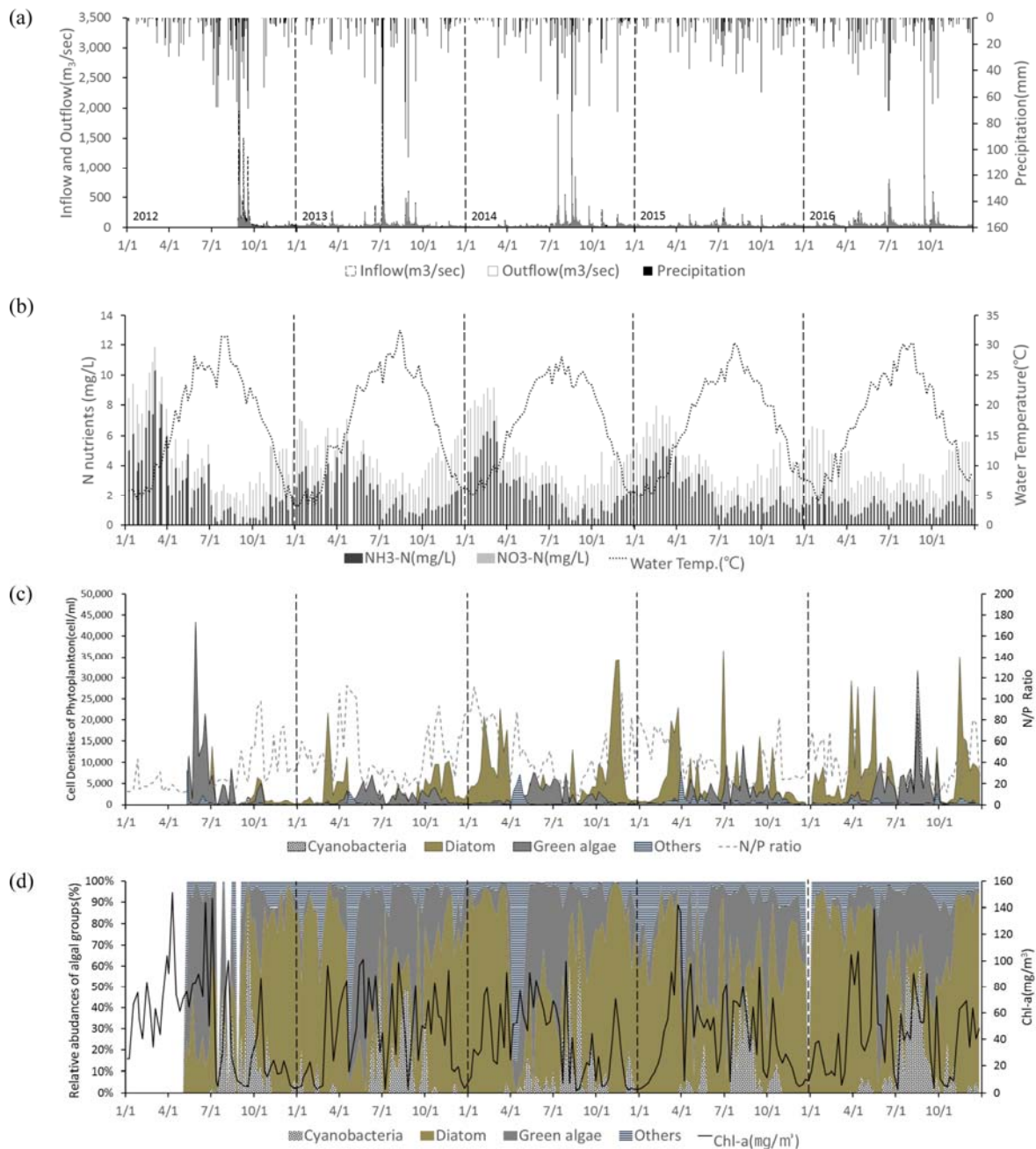
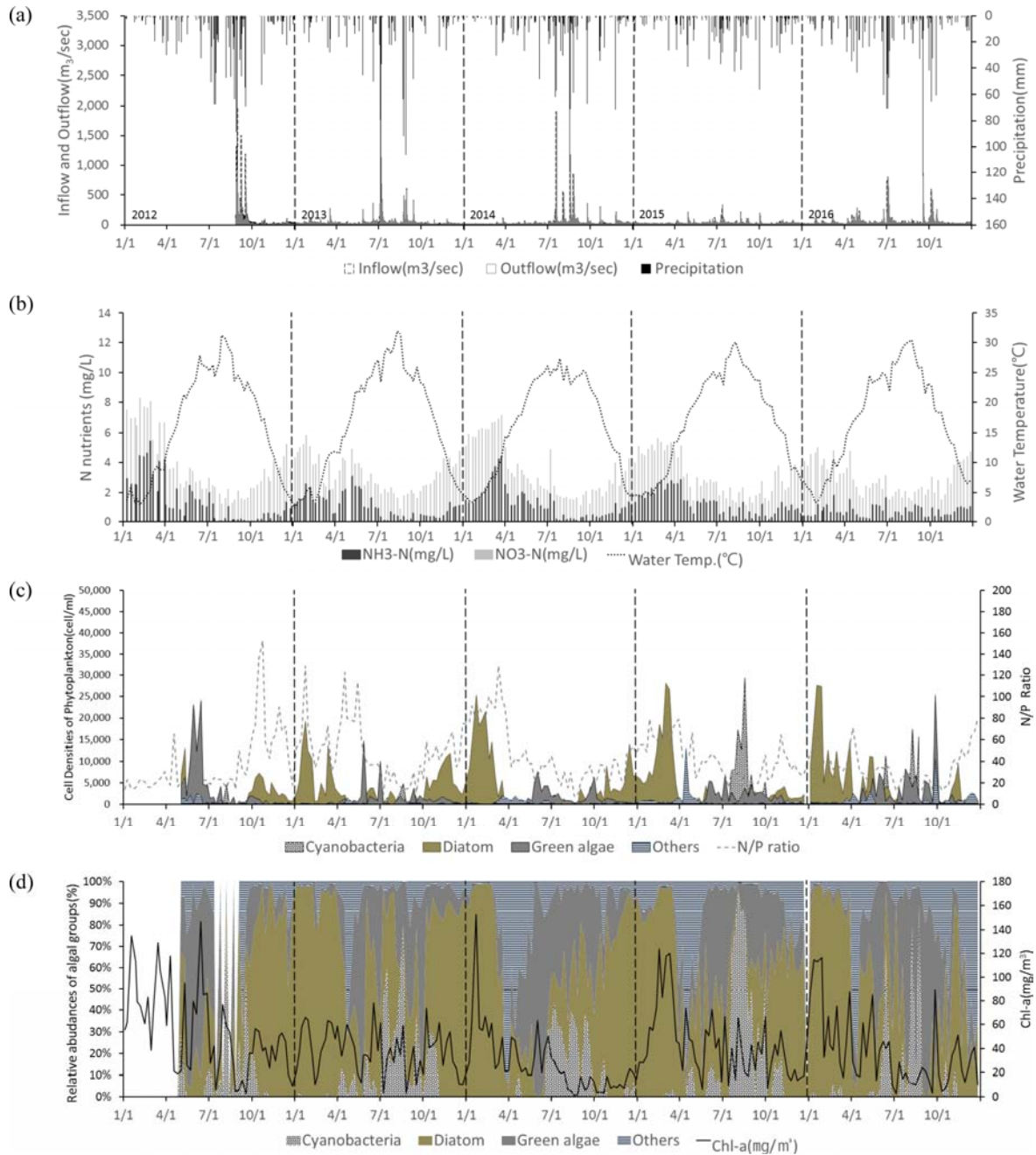


Fig. 2. Temporal variation of the (a) amount of daily precipitation, inflow and outflow, (b) T-N, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N and Water temperature, (c) cell densities of phytoplankton and N/P weight ratios, (d) relative abundances of algal groups and Chl-a from Jan. 2012 to Dec. 2016 in the Seungchon weir of the Yeonsan River.

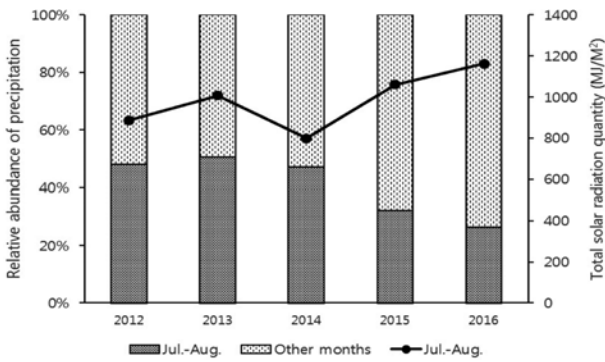


**Fig. 3.** Temporal variation of the (a) amount of daily precipitation, inflow and outflow, (b) T-N, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N and Water temperature, (c) cell densities of phytoplankton and N/P weight ratios, (d) relative abundances of algal groups and Chl-a from Jan. 2012 to Dec. 2016 in the Juksan weir of the Yeosan River.

MJ/m<sup>2</sup>, 2014년 798.3 MJ/m<sup>2</sup>)에 비해 높게 나타나, 조사 지점의 하절기 수온 증가에 직·간접적인 영향을 미친 것으로 보인다(Table 1). 강수량과 유량을 중심으로 한 물리적 요인의 변화는 수온 등의 이화학적 수질 환경에 직·간접적인 영향을 주는 인자일 뿐만 아니라, 식물플랑크톤의 군집구조 및 천이 등 생물학적 요인 변화에도 주요 영향인자로 작용한다(Seo et al., 2013).

조사기간 동안 확인된 승춘보 및 죽산보의 수질 항목의 평균값을 Table 1에 제시하였다. 현장측정 항목을 시·공간적으로 살펴보면, 연별 평균 수온은 승춘보와 죽산보에서

각각 16.8~17.3 °C(평균 17.1 °C)과 16.2~16.9 °C(평균 16.6 °C)의 범위로 나타나 연도별로 두 개 보에서 점차 증가하는 경향을 보였으며, 상대적으로 승춘보의 수온이 높은 것으로 확인되었다. 용존산소는 승춘보와 죽산보에서 2012년에 각각 평균 10.7 mg/L과 11.2 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 2016년에 각각 9.0 mg/L과 9.7 mg/L로 가장 낮게 나타나 조사시기가 거듭될수록 감소되는 양상을 나타내었다. 이는 조사기간 동안 2014년을 제외한 매년 동절기 평균 수온이 점차 증가한 것에 따른 결과로 판단되며, 일반적으로 수온의 증가는 산소포화도를 낮추어 용존산소 농도에 영향



**Fig. 4.** Annual total precipitation and insolation in the weir reach of the Yeongsan River. The bar graph indicates the relative abundance of precipitation between rainy /dry seasons. Line graph indicates total insolation accumulated from July to August.

을 준다(Gwak and Kim, 2016).

전체 조사기간 동안 보별 유기물 항목을 비교해 보면, 승촌보의 유기물 오염도(평균값 BOD 4.7 mg/L; COD 8.1 mg/L; TOC 5.8 mg/L)가 죽산보의 유기물 오염도(평균값 BOD 3.9 mg/L; COD 7.6 mg/L; TOC 5.4 mg/L)보다 높은 것으로 나타났고, 시기별로는 두 개 보에서 점차 개선되고 있는 것으로 확인되었다.

영양염 항목을 살펴보면, 영산강 보 구간에서 질소계열 영양염 농도는 점차 낮아지는 양상을 보였으나, 타 수계에 비해서 여전히 높은 농도를 보였다(GRERC, 2016; HRERC, 2016; NRERC, 2016). T-N은 승촌보와 죽산보에서 2012년에 각각 평균 5.994 mg/L와 4.773 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 2016년에 4.564 mg/L와 3.710 mg/L로 점차 낮아지

는 것으로 조사되었다. NO<sub>3</sub>-N은 승촌보와 죽산보에서 각각 2012~2016년 평균 2.138 mg/L(0.856~4.714 mg/L)와 2.148 mg/L(0.707~4.597 mg/L)로 유사하였으나, NH<sub>3</sub>-N은 2012~2016년 평균 승촌보에서 2.204 mg/L(0.048~10.295 mg/L)로 죽산보에서 1.157 mg/L(0.044~5.455 mg/L)로 승촌보가 죽산보에 비해 약 2배 정도 높은 값을 보였다. NH<sub>3</sub>-N은 pH에 따라 NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 형태로 나타나는데, 물리 화학적 및 생물학적인 자정작용에 의해 NO<sub>3</sub>-N로 산화되거나 생물체로 동화되어 그 농도가 낮아지지만, 지속적인 오염원 유입이 유지되면 NH<sub>3</sub>-N농도가 높은 비율을 보인다(Han et al., 2015). 일반적으로 공공하수처리시설 방류수는 하천의 NH<sub>3</sub>-N의 농도를 증가시키는 주요 원인 중에 하나로 보고되고 있다(Han et al., 2014; Han et al., 2015). 승촌보는 영산강으로 유입되는 광주하수처리장 방류수의 직접적인 영향을 받고 있으며(Lee and Jung, 2015; Seo et al., 2010), 높은 농도의 NH<sub>3</sub>-N가 포함된 방류수가 승촌보 수질에 영향을 미친 것으로 사료된다. 한편, 조사기간 동안 NH<sub>3</sub>-N의 계절적 변동은 동절기에 비교적 높은 농도를 나타내었으며, 하절기에 감소하는 양상을 보였다(Fig. 2(b), Fig. 3(b)). 일반적으로 NH<sub>3</sub>-N의 계절적 변동은 동절기 갈수기의 유량감소로 인해 U자 형태의 패턴을 보이거나(Park et al., 2014), 영산강 보 구간 NH<sub>3</sub>-N 농도의 변화는 계절적 영향이 뚜렷한 특징을 보였다. 영산강 보 구간의 이러한 현상은 수온, 강수량, 유량 및 하수처리장의 복합적 영향으로 판단된다. 동절기에 보 구간의 유량은 하수처리장의 높은 기여도와 저수온기 하수처리장의 질소 처리효율 감소로 인해 방류수의 NH<sub>3</sub>-N 농도 증가 현상을 야기시킨다(Kil and Kang, 2016; Shin, 2018). T-P는 승촌보와 죽산보에서 2012년에 각각 평균

**Table 1.** The results of an annual water quality in the (A) Seungchon and (B) Juksan weir. The values in parentheses indicate comparisons from minimum values to maximum values for 5 years

Weir	Year	Water Temp. (°C)	pH	DO (mg/L)	EC (µmhos/cm)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	DTP (mg/L)
(A)	2012	17.1 (3.7/31.5)	7.5 (6.3/9.3)	10.7 (4.0-16.3)	335 (91-554)	5.1 (1.2-12.2)	9.5 (5.2-15.7)	6.2 (2.2-10.4)	13.7 (3.6-39.9)	5.994 (1.774-13.563)	2.741 (0.048-10.295)	2.124 (0.936-4.338)	0.301 (0.037-0.888)	0.242 (0.016-0.826)	0.205 (0.003-0.797)
	2013	17.1 (3.1/32.5)	7.5 (6.6/9.0)	9.7 (4.8-16.3)	335 (122/533)	4.6 (1.5/7.6)	8.5 (5.7/14.7)	5.4 (3.8/7.4)	10.4 (3.0/37.0)	5.447 (2.614/9.269)	2.232 (0.390/5.666)	2.233 (0.905/3.944)	0.143 (0.054/0.435)	0.088 (0.017/0.404)	0.068 (0.001/0.387)
	2014	16.8 (5.2/28.0)	7.4 (6.0/8.3)	9.6 (3.5/14.8)	366 (98/526)	5.0 (1.7/9.0)	8.1 (3.7/12.9)	6.0 (3.7/9.7)	12.4 (3.0/51.7)	5.581 (2.315/10.957)	2.431 (0.313/6.980)	2.065 (0.930/4.222)	0.141 (0.057/0.285)	0.064 (0.020/0.157)	0.044 (0.002/0.151)
	2015	17.2 (4.8/30.3)	7.0 (6.3/7.8)	8.6 (2.6/15.3)	338 (166/454)	4.5 (1.8/7.7)	7.4 (4.1/13.8)	5.5 (2.5/7.9)	9.3 (2.4/19.8)	5.263 (2.675/8.549)	2.245 (0.492/5.286)	1.872 (0.856/3.776)	0.148 (0.067/0.289)	0.075 (0.032/0.200)	0.048 (0.004/0.131)
	2016	17.3 (4.2/30.2)	7.0 (6.2/8.0)	9.0 (2.6/14.6)	317 (152/476)	4.0 (1.8/7.1)	7.0 (4.9/9.9)	5.9 (3.8/8.4)	10.2 (4.1/44.7)	4.564 (2.605/7.880)	1.371 (0.498/2.569)	2.398 (1.046/4.714)	0.157 (0.080/0.286)	0.089 (0.017/0.196)	0.066 (0.000/0.189)
(B)	2012	16.2 (2.8/31.2)	7.7 (6.1/9.6)	11.2 (5.4/16.9)	313 (108/534)	4.8 (1.1/10.2)	9.1 (3.9/16.0)	5.5 (2.1/9.5)	16.0 (5.6/62.8)	4.733 (1.722/9.804)	1.446 (0.044/5.455)	2.341 (0.944/4.530)	0.204 (0.020/0.664)	0.151 (0.013/0.595)	0.120 (0.001/0.434)
	2013	16.7 (2.3/32.0)	7.6 (6.6/9.4)	10.4 (5.8/15.2)	287 (108/500)	3.6 (1.3/5.4)	7.6 (5.7/11.5)	5.1 (3.3/9.1)	13.0 (4.8/59.1)	4.111 (1.906/6.421)	1.073 (0.054/3.112)	2.158 (0.707/3.822)	0.101 (0.042/0.273)	0.057 (0.017/0.157)	0.040 (0.001/0.153)
	2014	16.2 (3.2/27.3)	7.7 (6.8/9.0)	10.1 (3.7/16.8)	324 (103/606)	3.8 (1.4/7.8)	7.4 (4.4/11.5)	5.4 (3.7/8.6)	16.1 (5.3/58.1)	4.410 (1.599/6.853)	1.267 (0.087/4.430)	2.183 (0.780/4.597)	0.110 (0.065/0.297)	0.056 (0.017/0.124)	0.038 (0.001/0.117)
	2015	16.8 (4.2/30.0)	7.5 (6.2/8.6)	9.9 (4.2/17.6)	302 (139/431)	3.7 (1.8/6.4)	7.1 (5.0/10.4)	5.2 (2.6/7.6)	10.4 (4.2/25.1)	4.195 (2.04/6.853)	1.260 (0.102/2.872)	1.856 (0.870/3.217)	0.108 (0.056/0.185)	0.055 (0.016/0.144)	0.033 (0.001/0.110)
	2016	16.9 (2.3/30.4)	7.2 (6.2/8.6)	9.7 (4.0/17.0)	280 (113/463)	3.4 (1.7/5.5)	6.8 (5.4/9.3)	5.5 (3.6/7.7)	10.5 (4.1/24.0)	3.710 (2.182/6.055)	0.737 (0.220/1.835)	2.205 (0.740/4.204)	0.117 (0.058/0.213)	0.064 (0.015/0.154)	0.041 (0.000/0.128)

0.301 mg/L와 0.204 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 이후 연평균 0.147 mg/L와 0.113 mg/L로 뚜렷한 감소 추세를 보였다. 이는 2012년 광주공공하수처리시설에 설치된 총인처리시설의 영향으로 사료된다. 본 연구를 통하여, 공공하수처리시설 방류수가 영산강 수계에 미치는 영향을 간접적으로 추정할 수는 있었으나, 영산강 보 구간 수질에 공공하수처리장 방류수가 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 수질 및 유량을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

총대장균군과 분원성대장균군도 각 보의 특성이 상이하게 나타났다. 조사기간 동안 총대장균군은 승촌보에서 평균 3148 CFU/100 mL(20 ~ 150,000 CFU/100 mL), 죽산보에서 평균 124 CFU/100 mL(0 ~ 48,000 CFU/100 mL)로 각각 분석되었다. 분원성대장균군은 승촌보에서 385 CFU/100 mL(2 ~ 56,000 CFU/100 mL), 죽산보에서 21 CFU/100 mL(0 ~ 9,400 CFU/100 mL)로 승촌보가 죽산보에 비해 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 대장균 오염도는 일반적으로 대도시 및 산업단지 밀집지역에서 높게 나타나며(Lee et al., 2016), 도심지역 인근에 위치한 승촌보의 지리적 특성으로 인한 결과로 판단된다.

3.2 영산강 보 구간 식물플랑크톤 출현 특성

승촌보와 죽산보의 식물플랑크톤 출현 특성은 가을과 겨울철에 규조류가 우점하고, 봄과 이른 여름철에는 녹조류와 기타 조류가 출현하며, 늦여름에 남조류가 우점하는 전형적인 온대 수계 지역의 천이 양상을 보였다(Jeong et al., 2014; Ryu et al., 2016). 다만, 동절기 규조류 우점 현상은 낙동강 수계 내 유사한 위도에 위치한 보에서보다 뚜렷한 것으로 나타났으며(Yu et al., 2014), 이러한 Bloom 현상의 원인은 Centrales목의 규조류가 높은 세포밀도를 보였기 때문으로 판단되었다(Fig. 2(c), Fig. 3(c)).

전체 조사기간 중 승촌보와 죽산보의 분류군별 구성을 살펴보면, 규조류는 각각 57.5%와 56.2%를 차지하였으며, 다음으로는 녹조류가 27.6%와 24.0%로 높은 비율을 차지하였다. 반면에 남조류의 생물량 비율은 승촌보에서 9.1%,

죽산보에서 12.2%로 나타나, 타 수계에 비하여 식물플랑크톤 구성 중 남조류의 생물량 비율이 비교적 낮은 것으로 확인되었으며, 특히 유사한 위도상에 위치한 낙동강 보 구간의 식물플랑크톤 구성과도 큰 차이를 보였다(Yu et al., 2014)(Fig. 2(d), Fig. 3(d)). 한편, 연도별 남조류 최대 세포밀도는 2012년 8월에 8,150 cells/mL, 2013년 10월에 5,375 cells/mL, 2014년 8월에 3,000 cells/mL, 2015년 8월에 29,350 cells/mL, 2016년 8월에 31,700 cells/mL로 확인되었다. 남조류에 의한 수화현상은 영양염 농도가 높은 하절기 보 구간에서 빈번하게 발생하지만, 영산강 보 구간에서 남조류의 세포밀도는 타 수계에 비하여 상대적으로 높지 않았다(Byun et al., 2015; Han et al., 2016; Park et al., 2015). 남조류의 발생은 다양한 환경요인의 의해 조절되며, 기상 요인으로는 강수량 및 강수빈도에 높은 영향을 받는다(Ryu et al., 2016). 낙동강 및 영산강 보 구간에서 조류발생과 환경요인간의 특성을 분석한 선행연구에 따르면(Kim et al., 2016), 영산강 보 구간은 낙동강에 비해 영양염 등의 오염도는 높았으나 강수량 및 강수빈도가 높게 나타나 남조류 발생이 감소하였을 것으로 추론하였다.

식물플랑크톤 증식에 영향을 DTN/DTP 비(weight)를 살펴보면, 조사기간의 연도별 하절기(7 ~ 8월)에 승촌보와 죽산보에서 각각 평균 40.0(28.1 ~ 52.0), 35.8(27.7 ~ 47.5)로 나타났다(Fig. 2(c), Fig. 3(c)). 한편, 유사한 위도 상에 위치한 낙동강 보 구간의 비는 합천창녕보와 창녕함안보가 각각 평균 53.4(41.3 ~ 66.9)와 58.4(40.9 ~ 74.9)의 범위로 나타나, 상대적으로 영산강 보 구간에 비하여 높았다(ME, 2018; Yu et al., 2014). 남조류는 다른 분류군에 비하여 성장 제한영양염으로 인이 생물량 결정에 중요한 요인으로 작용하며, 특히 N/P비(weight)가 30 이하일 때 남조류의 생존 경쟁력이 우세한 것으로 알려져 있다(Lehman et al., 2009; Smith, 1983). 이를 통해 영산강 보 구간의 조류발생 패턴은 일반적으로 알려진 N/P 비율에 의한 발생보다 다른 수환경 요인에 의해 결정됨을 간접적으로 추론할 수 있었다.

5년간의 조사기간 중 100 mg/m<sup>3</sup> 이상의 높은 Chl-a 농도를 보인 시기는 승촌보와 죽산보가 각각 11회와 13회로 확

Table 2. The correlation coefficients between the algal cell density and the environmental factors in the (A) Seungchon and (B) Juksan weir

Weir	Algae taxa	pH	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	TOC (mg/L)	Water Temp. (°C)	EC (µmhos/cm)	F. coli (CFU/100mL)	E. coli (CFU/100mL)	DTN (mg/L)	DTP (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	Chl-a (mg/L)
(A)	Cyanobacteria	0.114	-.228**	-.017	.044	.060	-.299**	-.255**	-.230**	-.017	.003	.428**	-.241**	.084	.019	-.310**	-.042	-.045	.132
	Diatom	.161*	.288**	.322**	.185*	.095	.215**	.154*	.079	-.060	.241**	-.119	.204**	-.153*	-.183*	.184*	-.262**	-.284**	.419**
	Green algae	.334**	.027	.422**	.527**	.110	-.036	.029	-.321**	.293**	.490**	.417**	.009	-.105	-.167*	-.057	.243**	.181*	.460**
	Other	.085	-.021	.357**	.296**	-.015	.200**	.238**	-.127	.125	.282**	.009	.223**	-.098	-.106	.188**	.109	.074	.255**
(B)	Cyanobacteria	.201**	-.160*	-.049	.039	-.086	-.212**	-.172*	-.242**	.038	.119	.317**	-.104	-.048	-.043	-.221**	.061	-.002	.010
	Diatom	.287**	.660**	.345**	.073	.059	.511**	.250**	.597**	-.211**	.066	-.558**	.441**	-.134	-.117	.515**	-.357**	-.343**	.578**
	Green algae	.109	-.160*	.395**	.493**	.051	-.066	.040	-.308**	.258**	.454**	.345**	.030	-.093	-.092	-.080	.251**	.155*	.299**
	Other	-.290	.028	.207**	.062	-.083	.219**	.313**	.013	.098	.119	-.074	.169*	-.084	-.070	.204**	.067	.021	.162*

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level  
\* Correlation is significant at the 0.05 level

인되었으며, 이 시기에 출현한 주요 우점 분류군으로는 규조류의 *Stephanodiscus*속과 *Cyclotella*속, 녹조류의 *Eudorina*속과 *Pediastrum*속으로 각각 확인되었다. 일반적으로 영산강 보 구간에서는 *Stephanodiscus*속의 세포밀도가 평균 21,050 cells/mL 이상인 경우 Chl-a 농도가 100 mg/m<sup>3</sup>를 초과하였다. Chl-a 농도와 분류군별 세포수의 상관관계 분석을 실시한 결과, 규조류가 승촌보와 죽산보에서 각각 0.419와 0.578, 녹조류가 승촌보와 죽산보에서 각각 0.460, 0.299( $p < 0.01$ )의 유의한 양의 상관성을 보였다.

영산강 보 구간에서 식물플랑크톤 세포밀도와 관련 있는 환경요인을 분석하기 위해, 상관성 분석을 실시하였다 (Table 3). 식물플랑크톤의 출현 특성은 물리적 또는 화학적 환경요인에 가장 잘 적응하는 종들이 우점하게 되며, 그 중 수온은 식물플랑크톤 세포밀도 및 발생빈도를 결정짓는 가장 중요한 요소가 된다(Shitao, 2012). 본 연구를 통해서도 식물플랑크톤 분류군 중 규조류는 죽산보에서 수온과 유의한 음의 상관성(-0.558;  $p < 0.01$ )을 보였으며, 녹조류(0.417, 0.345;  $p < 0.01$ )와 남조류(0.428, 0.317;  $p < 0.01$ )는 각각 유의한 양의 상관성을 보였다. 한편, NO<sub>3</sub>-N는 죽산보의 규조류 세포밀도와 0.597( $p < 0.01$ )로 유의한 높은 양의 상관성을 보였으나, 승촌보의 규조류 세포밀도와는 유의한 상관성이 확인되지 않았다. 일반적으로 하천에서 규조류의 세포밀도는 NO<sub>3</sub>-N와 유사한 증감패턴으로 높은 양의 상관성을 보이지만(Berg et al., 2003; Kalf, 2002), 승촌보 구간에서 확인된 유의하지 않은 상관성은 지속적인 오염원 유입영향의 결과로 사료된다.

#### 4. Conclusion

보 건설 이후, 영산강 분류 구간의 수질 및 식물플랑크톤 발생 양상을 5년간 모니터링하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 영산강 보 구간의 조사기간 동안 평균 수온은 각각 17.1 °C와 16.6 °C로 상류의 승촌보가 죽산보에 비해 높았으며, 연도별로는 두 개 보 모두에서 점차 증가하였다.

2) 수질요인 중 유기물 및 영양염 항목은 수체가 안정될 수록 연도별로 점차 개선되고 있었으나, 보 구간별로 개선 효과는 상이하였다. 특히 NH<sub>3</sub>-N는 승촌보에서 평균 2.204 mg/L로 죽산보 평균 1.157 mg/L보다 약 2배 정도 높은 값을 보였다. 이는 상대적으로 승촌보가 인구밀집지역에 가까운 지리적 특성과 공공하수처리장 방류수의 높은 유입량에 따른 영향으로 판단된다.

3) 전체 조사기간 동안 규조류와 녹조류의 생물량 구성비는 82.7%로 높은 비율을 차지하였으나, 상대적으로 남조류의 생물량 비율은 10.7%로 낮게 나타났다. 한편, 분류군별 세포밀도는 유사한 위도에 위치한 낙동강 수계 보 구간의 결과와 차이를 보였다. 동절기의 규조류 세포밀도 및 발생 빈도는 매우 높은 반면, 하절기 남조류의 세포밀도 및 발생 빈도는 비교적 낮았다.

4) 죽산보 구간에서 규조류의 우점도는 NO<sub>3</sub>-N와 유의한

양의 상관성을 보였으나, 승촌보에서는 유의한 상관성이 확인되지 않았다. 이는 승촌보의 지속적인 오염원 유입으로 인한 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

#### Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-03-03-002).

#### References

- Berg, G. M., Balode, M., Purina, I., Bekere, S., Bèchemin, C., and Maestrini, S. Y. (2003). Plankton Community Composition in Relation to Availability and Uptake of Oxidized and Reduced Nitrogen, *Aquatic Microbial Ecology*, 30, 263-274.
- Byun, J. H., Hwang, S. J., Kim, B. H., Park, J. R., Lee, J. K., and Lim, B. J. (2015). Relationship between a Dense Population of Cyanobacteria and Odorous Compounds in the North Han River System in 2014 and 2015, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 48(4), 263-271. [Korean Literature]
- Chong, S. A., Yi, H. S., Hwang, H. S., and Kim, H. J. (2015). Modeling the Flushing Effect of Multi-purpose Weir Operation on Algae Removal in Yeongsan River, *Journal of Korean Society Environment Engineering*, 37(10), 563-572. [Korean Literature]
- Gallegos, C. L., Jordan, T. E., and Hedrick S. S. (2010). Long-term Dynamics of Phytoplankton in the Rhode River, Maryland(USA), *Estuaries and Coasts* 33, 471-484.
- Geum River Environment Research Center (GRERC). (2016). *Aquatic Ecosystem Monitoring in Weir of the Geum River*, Geum River Environment Research Center, 41-42. [Korean Literature]
- Gwak, B. R. and Kim, I. K. (2016). Characterization of Water Quality in Changnyeong-Haman Weir Section Using Statistical Analyses, *Journal of Korean Society Environment Engineering*, 38(2), 71-78. [Korean Literature]
- Han, M. D., Son, J. Y., Ryu, J. C., Ahn, G. H., and Kim, Y. S. (2014). The Effects of Pollutants into Sun-basin on the Water Quality and Loading of Receiving Streams, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, 36(9), 648-658. [Korean Literature]
- Han River Environment Research Center (HRERC). (2016). *Aquatic Ecosystem Monitoring in Weir of the Han River*, Han River Environment Research Center, 37-40. [Korean Literature]
- Han, S. H., Kim, Y. Y., Sung, Y. G., Park, I. B., Cho, D. H., Nam, W. K. Kim, C. G., and Oh, J. K. (2015). Characteristics of Organics and Ammonia Nitrogen Discharged by Pollution Source from Human Living, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(4), 377-386. [Korean Literature]
- Han, S. R., Cho, K. C., Yoon, J. H., Lee, J. J., Yoo, S. A., Choi, I. C., Joo, H. J., Cheon, S. U., and Lim, B. J. (2016). Phytoplankton Community Structure of Midstream of Geum River on 2014 and 2015. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 49(4), 375-384. [Korean Literature]

- Jeong, B. K., Kim, Y. J., Jung, S. W., Lee, H. Y., and Shin, Y. S. (2014). Temporal Variation and Identification of a Cetric Diatom, *Stephanodiscus* spp. during Winter spring Blooms in the Yeongsan River, *The Korean Society of Limnology*, 47(4), 273-281. [Korean Literature]
- Jung, S. J., Lee, D. J., Hwang, K. S., Lee, K. H., Choi, K. C., Im, S. S., Lee, Y. H., Lee, J. Y., and Lim, B. J. (2012). Evaluation of Pollutant Characteristics in Yeongsan River using Multivariate Analysis, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 45(4), 368-377. [Korean Literature]
- Jung, S. Y. and Kim, I. K. (2017). Analysis of Water Quality factor and Correlation between Water Quality and Chl-a in Middle and Downstream Weir Section of Nakdong River, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 39(2), 89-96. [Korean Literature]
- Kalff, J. (2002). *Limnology*, Prentice-Hall, Inc. 592.
- Kil, H. K. and Kang, S. H. (2016). A Study on the NBOD Reduction in Wastewater Treatment Plant using Sludge Reaeration During Winter Season, *Journal of Korean Society of Urban Environment*, 16(2), 207-213. [Korean Literature]
- Kim, M. A., Lee, S. Y., Mun, H. S., and Kim, K. H. (2016). An Analysis of Meterological Factor between Weirs in Nakdong-Yeongsan River, *Proceeding of the 2016 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, 368-369. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2018). *Korea Weather Information (KMI)*, <http://www.kma.go.kr/>. (accessed Jan. 2018).
- Lee, H. J., Park, H. K., Lee, J. H., Park, A. R., and Cheon, S. U. (2016). Coliform Pollution Status of Nakdong River and Tributaries, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(3), 271-280. [Korean Literature]
- Lee, Y. W. and Jung, J. S. (2015). Development of Water Integration Management System in Yeongsan and Sumjin River Basins to conteract Megadrought by Climate Change, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 15(3), 167-175. [Korean Literature]
- Lehman, E. M., Mcdonald, K. E., and Lehman, J. T. (2009). Whole Lake Selective Withdrawal Experiment to Control Harmful Cyanobacteria in an Urban Impoundment, *Water Research*, 43, 1187-1198.
- Ministry of Environment (ME). (2011). *Standard Method for Water Pollutants*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Water Environment Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do> (accessed Jan. 2018).
- Nakdong River Environment Research Center (NRERC). (2016). *Aquatic Ecosystem Monitoring in Weir of the Nakdong River*, Nakdong River Environment Research Center, 43-45. [Korean Literature]
- Park, H. K., Shin, R. Y., Lee, H. J., Lee K. L., and Cheon, S. U. (2015). Spatio-temporal Characteristics of Cyanobacterial Communities in the Middle-downstream of Nakdong River and Lake Dukdong, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(3), 286-294. [Korean Literature]
- Park, J. H., Sohn, S. M., and Kim, Y. S. (2014). Distribution Characteristics of Total Nitrogen Components in Streams by Watershed Characteristics, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(5), 503-511. [Korean Literature]
- Ryu, H. S., Park, H. K., Lee, H. J., Shin, R. Y., and Cheon, C. U. (2016). Occurence and Succsion Pattern of Cyanobacteria in the Upper Region of the Nakdong River : Factors Influencing *Aphanizomenon* Bloom, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 52-59. [Korean Literature]
- Seo, K. A., Jung, S. J., Park, J. H., Hwang, K. S., and Lim, B. J. (2013). Relationships Between the Characteristics of Algae Occurrence and Environmental Factors in Lake Juam, Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(3), 317-328. [Korean Literature]
- Seo, H. J., Kang, Y. J., Min, K. W., Lee, K. S., Seo, G. W., Kim, S. H., Baek K. J., and Kim, S. J. (2010). Characteristics of Distribution and Decomposition of Organic Matters in Stream Water and Sewage Effluent, *Analytical Science and Technology*, 23(1), 36-44. [Korean Literature]
- Shin, C. H. (2018). Analysis of sewage treatment process for the improvement of T-N removal process, *Journal of Environmental Science International*, 27(2), 99-107. [Korean Literature]
- Shin, Y. S., Yu, H. S., Lee, H. K., Lee, D. H., and Park, G. W. (2015). The Change in Patterns and Conditions of Algal Blooms Resulting from Construction of Weirs in the Yeongsan River, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 48(4), 238-252. [Korean Literature]
- Shin, J. K., Kang, B. G., and Hwang, S. J. (2016). Limnological Study on Spring-Bloom of a Green Algae, *Eudorina elegans* and Weirwater Pulsued-Flows in the Midstream(Seungchon Weir Pool) of the Yeongsan River, Korea, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 49(4), 320-333. [Korean Literature]
- Shitao, P., Xuedo, Q., Honghua, S., Ran, Z., Mingxin, D., and Dewen, D. (2012). Distribution and Controlling Factors of Phytoplankton Assemblages in a Semi-enclosed Bay during Spring and Summer, *Marine-Pollution Bulletin*, 64, 941-948.
- Smith, V. H. (1983). Low Nitrogen to Phosphorus Ratio Favor Dominance by Blue Green Algae in Lake Phytoplankton, *Science*, 221, 669-671.
- Tekile, A., Kim, I. H., and Kim, J. S. (2015). Mini-review on River Eutrophication and Bottom Improvement Techniques, with Special Emphasis on the Nakdong River, *Journal of Environmental Sciences* 30, 113-121.
- Yu, J. J., Lee, H. J., Lee, K. L., Ryu, H. S., Hwang, J. H., Shin, R. Y., and Cheon, S. U. (2014). Relationship between Distribution of the Dominant Phytoplankton Species and Water Temperature in the Nakdong River, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 47(4), 247-257. [Korean Literature]