

<Original article>

영산강수계 죽산보의 식물플랑크톤과 이화학적 변화

손미선 · 정현수 · 박창희 · 박종환 · 임채홍 · 김경현*

국립환경과학원 영산강물환경연구소

The Change of Phytoplankton Community Structure and Water Quality in the Juksan Weir of the Yeongsan River Watershed

Misun Son, Hyeon Su Chung, Chang Hee Park, Jong-hwan Park,
Cheahong Lim and Kyunghyun Kim*

Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research,
Gwangju 61011, Republic of Korea

Abstract - The objective of this study was to determine the changes in phytoplankton and long-term water quality of Juksan-Weir in Yeongsan River that took place between April 2010 and December 2015. The number of species used in this study was 288, which consisted of 6% of Cyanophyta, 26% of Bacillariophyta, 53% of Chlorophyta and the others (15%). The standing crops of phytoplankton ranged from 500 cells · mL⁻¹ - 29,950 cells · mL⁻¹ with an average of 7,885 cells · mL⁻¹. At the two site, 20 dominant genera of found. The dominant genera were 6 of Bacillariophyta, 6 of Cyanophyta, 7 of Chlorophyta and 1 of Cryptophyta. The most dominant genus among the phytoplankton was *Stephanodiscus* sp. (Total 59%, each 54% and 63%). The most dominant genus among the Cyanophyta was *Microcystis* sp., which had a cell abundance ratio of 17%. The results of two sites were 21% and 13%, and the upstream was higher than the downstream.

Keywords : Juksan-weir, phytoplankton, *Stephanodiscus*, water quality, Yeongsan River

서 론

영산강 수계는 국내 대형 4대강 중에 하나이며, 총 유역면적이 약 3,467 km², 본류의 유로 연장이 129.5 km로, 담양과 광주, 나주를 거쳐 서해로 흘러들어가는 우리나라 주요 강들 중 4번째로 큰 강이다(HRFCO 2013). 영산강 상류에는 담양댐, 광주댐, 장성댐, 나주댐 등 4개의 다목적댐이 건설되어 있으며(Shin *et al.* 2015), 용추봉에서 발원하여 오례강 및 황룡강과 합류한다. 영산강 유역은 1981년도에 하구둑이 하류에

건설되어 현재 농업용수와 농업용수로 사용되고 있다. 이후 영산강 중류에 2009년부터 보 건설이 추진되어 2011년에 승촌보와 죽산보가 건립되었고, 이로 인해 하천의 유량과 유속의 감소 및 수질의 변화 등으로 수질악화에 대한 우려가 높은 현실이다. 실제로 하구언이나 보는 수체의 흐름을 정체시켜 수질을 악화시키며 생물상의 변화를 초래하는 것으로 알려져 있고(Shin *et al.* 2015; Shin *et al.* 2016), 이를 증명하기 위한 모의실험장치를 이용한 조류 발생 연구도 진행되었다(Noh *et al.* 2015). 영산강은 광주와 나주시를 관통하며, 이 도시들의 인구집중으로 인한 도시화 및 산업화는 하천의 수질과 수생태계 환경을 악화시켰다(Woo 2010).

식물플랑크톤은 수중 먹이사슬 중 기초생산자의 역할을 수

* Corresponding author: Kyunghyun Kim, Tel. 062-970-3901,
Fax. 062-970-3999, E-mail. matthias@korea.kr

행하고 있으며 생태계 건강성(Health)과 온전성(Integrity)을 평가하는데 중요한 지표로 활용되고 있다. 그러나 식물플랑크톤이 대량 증식하게 되면 물의 외형적 모습의 변화 및 이취미와 조류독소의 문제를 초래하고, 상위 포식자에 부정적인 영향을 끼치게 되는데 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대량 증식이 일어나는 시기를 파악하는 것이 중요하다. 식물플랑크톤의 우점종과 종 조성에 대한 변화의 연구는 여러 수계 내에서 이루어지고 있다(Yu *et al.* 2014; Han *et al.* 2016).

영산강 수계에 관한 육수 생물학적 조사는 1974년부터 시작되었으며(Wui 1974), 영산호의 식물플랑크톤 연구(Kim and Choi 1988)와 영산강의 부착 규조류에 관한 연구(Choi *et al.* 1995) 등이 진행되었으나, 주로 하류와 부착조류에 집중되어 있었다. 이후 2003년에 영산강본류에 식물플랑크톤과 관련된 연구가 진행되었다(Kim 2003). 수질측정망을 통해 수질항목을 이용한 수질의 시공간적 변화에 관한 연구(Kang and An 2006; Son *et al.* 2012; Song *et al.* 2012), 수온에 따른 조류변화(Jeong *et al.* 2010), 수질과 식물플랑크톤의 계절적 변화(Son *et al.* 2013), 영산강 수계에서 겨울에 빈번하게 대발생하는 *Stephanodiscus*속에 관한 연구(Jeong *et al.* 2014) 등 식물플랑크톤 및 수질에 관한 연구가 진행되었다. 또한, 보 건설 중 또는 이후 승촌보와 죽산보 구간에서 어류 이동 및 어류 분포에 관한 연구(Ko *et al.* 2012; Park *et al.* 2012; Park and An 2014), 보 건설 전후의 수질 자료를 통한 조류 발생에 관한 분석(Shin *et al.* 2015) 등이 영산강수계 내에서 진행되었다.

본 연구의 목적은 영산강 수계에 위치한 죽산보 2개 지점에서 2010년 4월부터 2015년 12월까지 식물플랑크톤의 생물량과 유기물량 및 이화학적 환경요인을 조사하여 식물플

랑크톤의 종 조성과 계절에 따른 출현 종수, 개체수의 변화를 파악하고, 이후 수생태계 변화를 평가하는 기초자료를 제공하는데 있다.

재료 및 방법

1. 대상지점 및 조사시기

본 연구는 영산강 하류에 위치한 죽산보의 상류와 하류 두 개의 지점에서 실시하였다(Fig. 1). 죽산보는 전라남도 나주시 다시면 죽산리에 있는 다기능보로 유역면적 2,359 km²이며, 저수용량은 25,700,000 m³이다. 4개의 가동보로 구성되어 있으며, 어도는 좌안에 위치한다(K-water 2012). 조사는 두 개의 지점(Y1: 나주시 왕곡면, Y2: 나주시 다시면)을 대상으로 2010년 4월부터 2015년 12월까지 월 2회 또는 그 이상 실시하였다.

2. 식물플랑크톤의 분류 및 이화학적 분석

식물플랑크톤의 계수 및 동정을 위해 50 mL tube에 담아 Lugol's solution 2%를 첨가하여 시료를 고정하였다. 고정된 시료를 24시간 정지한 후, 상등액을 제거하여 농축하거나 원수 그대로 측정하였다. 혼합된 시료 또는 원수를 혈구계수기 또는 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경(Nikon Eclipse Ni, Japan)으로 관찰하였으며, 식물플랑크톤은 남조류, 녹조류, 규조류, 편모조류의 4개의 그룹으로 구분하였고(Parmer 1962), 분류군별 세포수 분석 및 분류군 분석을 시행하였다(ME 2017). 현장측정 항목인 수온, pH, DO, 전기전도

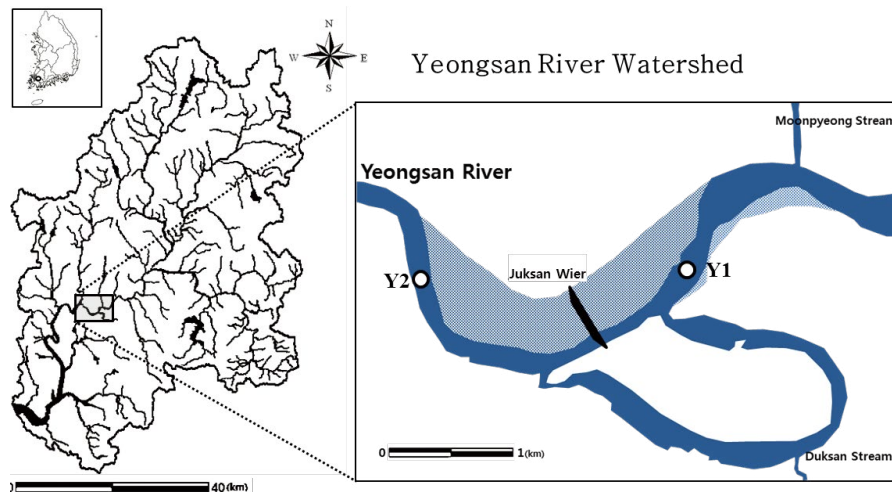


Fig. 1. Sampling site of Yeongsan River.

도는 다항목 수질 측정기(YSI 5700, YSI Inc., USA)를 이용하였으며, 현장에서 획득한 시료는 아이스박스에 냉장 보관하여 가능한 한 빨리 실험실로 옮긴 후 수질 분석을 실시하였다. T-N, T-P, BOD, COD, SS, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P 및 Chl-*a*는 수질오염공정시험기준(ME 2017)에 준하여 분석하였다. 수질자료는 지점별 변이를 파악하기 위하여 두 지점을 각각 분석하였다. 본 연구에서 식물플랑크톤과 수질요인들 간의 상관관계를 알아보는 통계분석은 SPSS ver. 12.0 프로그램을 사

용하여 Pearson's correlation 분석을 실시하였다. 기온, 강수량 등은 국가기후데이터센터의 광주 기상청(www.kma.go.kr) 자료를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 기상 및 이화학적 환경요인의 변화

기상청 국가기후데이터센터에서 확인한 2010년부터 2015년까지의 강수량, 평균기온의 월별 변화는 Fig. 2와 같다. 6년간 평균 강수량은 1355.7mm로, 최대값은 2012년 1626.8mm, 최저값은 2015년 1100.1mm로 그 차이가 526.7mm로 나타났다(Fig. 2). 6년 동안 6월에서 9월까지 강수량은 연강수량의 54%를 차지하는데 2015년에는 연강수량의 50% 미만인 42%로 조사되었다. 6년간 평균 기온은 14.1°C로 최대 14.6°C(2015년), 최저 13.7°C(2011년)로 나타났으며 연간 약 1°C의 기온차를 보였다.

영산강수계 2개 지점에서 6년간 수온, DO, pH, Chl-*a*, T-N, T-P, BOD, COD, SS, 탁도, NO₃-N, NH₃-N와 PO₄-P의 연별변화는 Table 1과 같다. 연평균 수온은 2010년을 제외한 2011년부터 2015년까지 16.5°C, 16.6°C로 두 지점의 값은 비

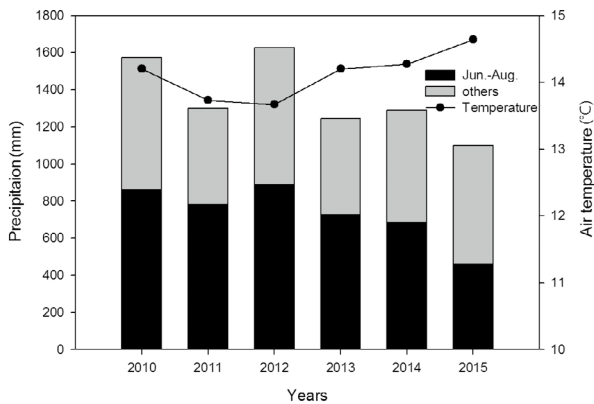


Fig. 2. Variation of annual total precipitation and temperature on Gwanguju.

Table 1. Monthly average of water environmental factors of Yeongsan River from April 2010 to December 2015

	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	Y1	Y2	Y1	Y2	Y1	Y2	Y1	Y2	Y1	Y2	Y1	Y2
Temp (°C)	21.0	20.8	16.8	16.6	16.1	16.7	16.5	16.5	16.3	16.3	17.0	17.0
DO (mg · L ⁻¹)	8.1 (Ia)	8.4 (Ia)	10.0 (Ia)	9.7 (Ia)	11.6 (Ia)	11.4 (Ia)	10.7 (Ia)	10.4 (Ia)	10.2 (Ia)	10.0 (Ia)	9.8 (Ia)	9.2 (Ia)
pH	7.3 (Ib)	7.3 (Ib)	7.7 (Ib)	7.5 (Ib)	8.0 (Ib)	7.9 (Ib)	7.6 (Ib)	7.8 (Ib)	7.7 (Ib)	7.8 (Ib)	7.5 (Ib)	7.3 (Ib)
Chl- <i>a</i> (mg · m ⁻³)	29.2	32.4	49.1	40.2	60.2	59.7	35.5	38.2	28.9	28.7	51.0	44.4
T-N (mg · L ⁻¹)	4.129	4.063	4.734	4.483	4.673	4.477	4.111	3.957	4.434	4.455	4.191	4.094
T-P (mg · L ⁻¹)	0.258 (IV)	0.238 (IV)	0.267 (IV)	0.259 (IV)	0.182 (III)	0.171 (III)	0.097 (III)	0.109 (III)	0.115 (III)	0.129 (III)	0.108 (III)	0.123 (III)
BOD (mg · L ⁻¹)	4.1 (III)	4.0 (III)	5.3 (IV)	5.1 (IV)	5.1 (IV)	5.2 (IV)	3.5 (III)	3.6 (III)	3.9 (III)	4.3 (III)	3.7 (III)	4.4 (III)
COD (mg · L ⁻¹)	8.1 (IV)	8.1 (IV)	8.9 (IV)	8.4 (IV)	9.1 (V)	9.1 (V)	7.5 (IV)	7.6 (IV)	7.5 (IV)	7.6 (IV)	7.1 (IV)	7.1 (IV)
SS (mg · L ⁻¹)	36.8	48.5	38.3	40.8	14.3	25.1	13.4	29.2	18.6	24.1	10.0	19.8
Turbidity (NTU)	45	78	41	58	14	21	12	20	11	17	10	44
NO ₃ -N (mg · L ⁻¹)	2.703	2.708	2.323	2.294	2.400	2.404	2.214	2.231	2.241	2.261	1.830	1.871
NH ₃ -N (mg · L ⁻¹)	0.541	0.460	1.363	1.376	1.378	1.099	1.053	0.932	1.307	1.196	1.273	1.097
PO ₄ -P (mg · L ⁻¹)	0.152	0.124	0.136	0.117	0.108	0.082	0.038	0.035	0.040	0.038	0.033	0.027

Temp: Water Temperature, DO: Dissolved Oxygen, Chl-*a*: Chlorophyll-*a*, T-N: Total Nitrogen, T-P: Total Phosphorus, BOD: Biological Oxygen Demand, SS: Suspended Solid, COD: Chemical Oxygen Demand.

숫하게 나타났으며, 2011년부터 2014년까지는 큰 변화가 없었고, 2015년은 전년에 비해 소폭 상승하였다. 수온의 최대, 최소값은 Y1, Y2 두 지점에서 32.0°C, 31.7°C 및 2.8°C, 2.0°C로 각각 나타났으며, 최고수온은 두 지점 모두 2013년도에 기록되었다. 용존산소는 3.7~17.6 mg · L⁻¹의 범위로 겨울에는 높고 여름에 낮아지는 경향을 보였으며, 2012년을 제외하고는 하절기에 8 mg · L⁻¹ 이하의 값을 기록하였다. 평균 용존산소는 10.0 mg · L⁻¹로 기록되었으며, 6년간의 연평균은 환경부 수질환경기준 Ia 등급을 유지하였다. pH는 6.2~9.1의 범위로 나타났으며 평균 7.6으로 이전 연구인 6.7과 7.4와 유사하게 나타났다(Kim 2003; Son *et al.* 2013). 연간 pH의 변화는 2010년부터 2012년까지 지속적으로 높아지다가 점차 2011년 수준으로 감소하였으며 두 지점 모두 일정한 양상을 보였다. T-N은 1.749~9.916 mg · L⁻¹의 범위로 1월부터 9월까지 계속 낮아지나 9월 이후 높아지는 경향을 보였다. T-P는 두 지점 평균 0.158 mg · L⁻¹이며, 0.023~0.695 mg · L⁻¹의 범위로 2011년과 2012년 겨울과 봄에 최고 0.570 mg · L⁻¹, 0.695 mg · L⁻¹으로 높게 나타났으며, 2012년~2015년까지 평균 0.106 mg · L⁻¹, 0.120 mg · L⁻¹로 이전에 비해 낮아지는 경향을 보였다. 이는 2012년 10월 총인 처리시설의 건립으로 인한 영향으로 보인다. BOD는 두 지점 평균 4.3 mg · L⁻¹이며, 1.3~11.6 mg · L⁻¹의 범위로 2011년을 제외하고 일반적으로 7월에 높은 수치를 기록하였다. COD는 두 지점 평균 7.9 mg · L⁻¹이며, 2.5~16.4 mg · L⁻¹의 범위로 기록되었다. SS와 탁도는 2010년과 2011년을 제외하고는 변화가 크게 나타나지 않았다. 2010년과 2011년에는 공사에 의해 평균값이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 하류로 갈수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 2012년 이후에는 변화가 미

미하나 강우에 의해 7, 8월에 증가하는 것을 확인할 수 있었다. NO₃-N은 두 지점 평균 2.290 mg · L⁻¹이며, 0.789~4.530 mg · L⁻¹의 범위로 동절기에는 높고 하절기에는 감소하는 양상을 보였으며, 2010년 이후 두 지점 모두 지속적으로 감소하였다. NH₃-N은 두 지점 평균 1.090 mg · L⁻¹로, 0.026~5.737 mg · L⁻¹의 범위로 NO₃-N과 마찬가지로 겨울철에는 높고 여름철에 감소하는 양상을 보였으며, 상류지점이 하류지점에 비해 높은 값을 보였다. PO₄-P은 두 지점 평균 0.078 mg · L⁻¹로, 0.001~0.384 mg · L⁻¹의 범위로 기록되었고, 2012년 이후 계속 감소하였다. 이는 T-P와 마찬가지로 유사한 증감 패턴을 보였고, 총인 처리시설의 건립으로 인한 것으로 사료된다. 보 건설 이후 PO₄-P와 같은 영양염이 감소되었음에도 불구하고, 그와 동시에 탁도가 감소하여 수계에서 조류의 발생을 일으킨다(Shin *et al.* 2015). 영산강은 유역면적이 다른 수계에 비해 비교적 작아, 강우의 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있었으며, 점 오염원이 본류 인근에 위치하여, 이화학적 변화가 빠르게 일어나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 유추해 볼 때 영산강 수계의 조류는 물리적인 요인보다 이화학적 수질환경요인 변화에 의해 조류의 군집 구조와 현존량이 변하는 것을 추측할 수 있다.

2. 식물플랑크톤 군집 구성 및 우점속의 변화

영산강수계 죽산보에서 식물플랑크톤은 종수의 변화는 Fig. 3과 같으며 총 288 분류군이 출현하였다. 녹조류가 153 분류군(53%)으로 가장 많이 출현하였으며 규조류가 74 분류군(26%), 남조류는 17 분류군, 은편모조류 및 기타조류는 45 분류군(16%)으로 녹조류와 규조류의 분류군이 전체 분류군

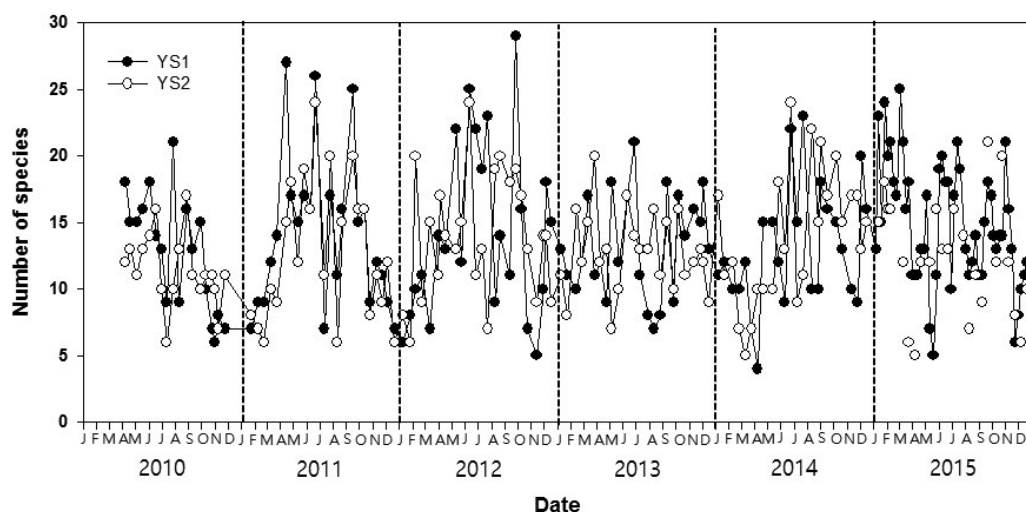


Fig. 3. Monthly variation of number of species in Yeongsan River from April 2010 to December 2015.

의 약 80%로 Choi *et al.* (1995), Jeong *et al.* (2010), Son *et al.* (2013)의 영산강을 대상으로 한 연구 결과와 유사한 종 구성을 보였으며, 기존 국내 주요 하천을 대상으로 한 Han *et al.* (2016)의 종 구성과도 비슷한 결과를 확인할 수 있었다. 연도별 종 조성은 2010년 총 83 분류군으로 남조류 7 분류군(8%), 규조류 27 분류군(33%), 녹조류 34 분류군(41%), 기타 분류군은 15 분류군(18%)이 확인되었고, 2011년은 총 114 분류군으로 남조류 9 분류군(8%), 규조류 27 분류군(24%), 녹조류 61 분류군(54%) 기타 분류군은 17 분류군(15%)이 확인되었다. 2012년은 총 114 분류군으로 남조류 9 분류군(8%), 규조류 57 분류군(22%), 녹조류 62 분류군(54%), 기타 분류군은 18 분류군(16%)이 확인되었고, 2013년은 총 115 분류군으로 남조류 10 분류군(9%), 규조류 32 분류군(28%), 녹조류 57 분류군(50%) 기타 분류군은 16 분류군(14%)이 확인되었다. 2014년은 총 131 분류군으로 남조류 8 분류군(6%), 규조류 39 분류군(30%), 녹조류 65 분류군(50%) 기타 분류군은 19 분류군(15%)이 확인되었고, 2015년에는 총 163 분류군으로 남조류 7 분류군(4%), 규조류 49 분류군(30%), 녹조류 76 분류군(47%) 기타 분류군은 31 분류군(19%)으로 확인되었다. 2010년 이후 2011년 녹조류의 종 수가 34종에서 61종으로 약 두배 증가하여 나타났으며, 이후 비슷한 수준을 보이다 2015년에는 2010년에 비해 총 종수가 약 두배 증가하는 등 전반적으로 다양한 종 출현양상을 보였으며 이는 조사 횟수 및 계절에 의한 차이로 사료된다.

6년간 종수는 겨울과 봄에는 규조류의 우점도의 증가로 종수가 적게 나타나다가 4월 이후 녹조류와 기타조류가 우점하며 우점도가 낮아지며 종수가 증가하며, 종수의 변화는 우점도에 따라 달리 나타났다. 여름이 되면 남조류의 우점으로 종의 수가 적게 조사되다가 이후 가을 다시 종수가 많아지는 것을 확인할 수 있다. 두 지점의 값을 보면 우점도가 비교적 낮은 상류지점인 Y1의 종수가 많게 기록된 것을 확인할 수 있다. 조사지점별 출현 종수는 Y1지점에서는 4종(2014년 4월)~29종(2012년 9월), Y2지점에서 5종(2015년 4월)~24종(2014년 6월)의 범위를 보였다.

6년간 우점속은 *Cyclotella*속, *Stephanodiscus*속, *Aulacoseira*속, *Skeletonema*속, *Nitzschia*속, *Synedra*속, *Melosira*속 등의 규조류와 *Pandorina*속, *Micractinium*속, *Actinastrum*속, *Pediastrum*속, *Coelastrum*속, *Eudorina*속, *Dityosphaerium*속 등의 녹조류, *Aphanizomenon*속, *Phormidium*속, *Merismopedia*속, *Microcystis*속 등의 남조류, *Cryptomonas*속의 은편모조류가 우점하는 것으로 조사되었고(Table 2), 그 중에 *Stephanodiscus*속, *Aulacoseira*속의 우점하는 시기가 가장 많았다. 유해성 남조류의 우점 시기는 해마다 변동되어 나타났으며, 6년간 남조류의 현존량 비율은 13%로 수온이

25°C 이상인 늦여름인 경우에 우점속으로 기록되었고, 현존량 비율은 2015년에 최대 95%로 나타났다.

두 개의 지점에서는 여름을 제외하고 대부분 규조류가 우점하였고, 6~8월 사이에 규조류, 녹조류, 남조류가 혼재하여 우점하였다. 주요 우점종을 보면 1월과 2월에는 주로 *Stephanodiscus*속이었으며, 1월에는 최저 52%, 최고 96%의 비율로 우점하였다. 겨울과 봄에는 규조류인 *Stephanodiscus*속과 *Cyclotella*속, *Skeletonema*속이 우점하였으며 그 이후에는 은편모조류인 *Cryptomonas*속이 우점하였다. 이와 같은 결과는 남조류와 녹조류는 다른 군집에 비해 높은 수온을 선호하여 봄과 여름철에 우점하고, 규조류는 낮은 수온에서 경쟁력을 갖고 겨울에 우점한다는 결과와 일치하였다(Jeong *et al.* 2014; Han *et al.* 2016; Ryu *et al.* 2016; Seo *et al.* 2018). Y1지점에서는 총 조사기간인 68개월 중 규조류가 37개월(57%)을 우점하였다. 5월에는 녹조류가 우점하였고, 7월과 8월에는 녹조류와 남조류가 우점하였으며, 9월에는 남조류인 *Anabaena*속, *Microcystis*속과 *Aphanizomenon*속 등의 남조류가 우점하였다. Y2지점에서는 총 조사기간 중 43개월(63%)이 규조류가 우점하나 대부분 *Stephanodiscus*속과 *Aulacoseira*속으로 기록되었다. 2010년은 남조류의 우점기간이 다른 해에 비해 길게 나타났지만, 2015년은 은편모조류인 *Cryptomonas*속이 우점하는 4월을 제외하고 모두 규조류가 우점하였다.

영산강에서 출현한 *Stephanodiscus*속은 기온과 평균수온이 낮은 기간에 우점도 및 현존량이 증가하며, 기온과 평균수온이 증가한 4월에 우점도 및 현존량이 감소하는 것으로 알려져 있는데(Jeong *et al.* 2014), 죽산보 두 개의 지점의 결과를 보면, 수온인 약 3~13°C로 나타나는 1월부터 3월까지 *Stephanodiscus*속이 우점하였고, 이는 Jung *et al.* (2011)의 수온별 배양실험의 결과와 유사하며, 낙동강 수계에서 8~12°C 범위에서 최대 밀도가 보이는 봄철 수화(Spring blooming) 현상과 비슷하게 나타났다(Yu *et al.* 2014). *Stephanodiscus*속의 우점시 Chl-*a* 농도도 높게 증가하였으며, 우점비율은 최저 31%에서 최고 96%까지 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 식물플랑크톤의 현존량의 변화

영산강수계 죽산보 2개의 지점의 5년 평균 현존량은 7,855 cells · mL⁻¹이다. 6년 동안 측정된 현존량을 살펴보면 Y1지점은 450~47,800 cells · mL⁻¹였으며, Y2지점은 325~82,350 cells · mL⁻¹로 나타났다(Fig. 4). Y1지점의 연별 평균 현존량은 4,387~14,677 cells · mL⁻¹로 조사되었으며, 2012년의 평균현존량이 14,677 cells · mL⁻¹로 높게 나타났다. Y2지점의 연별 평균 현존량은 3,361~17,347 cells · mL⁻¹로 조사되었고, Y1

Table 2. Dominant genus in Juksan-weir of Yeongsan River from 2010 to 2015

	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	Dominant species.	DR ^a (%)	Dominant species.	DR (%)	Dominant species.	DR (%)	Dominant species.	DR (%)	Dominant species.	DR (%)	Dominant species.	DR (%)
1	—	—	<i>Stephanodiscus</i>	85	<i>Stephanodiscus</i>	96	<i>Stephanodiscus</i>	75	<i>Stephanodiscus</i>	75	<i>Stephanodiscus</i>	52
2	—	—	<i>Cyclotella</i>	74	<i>Stephanodiscus</i>	91	<i>Stephanodiscus</i>	71	<i>Stephanodiscus</i>	87	<i>Stephanodiscus</i>	76
3	—	—	<i>Stephanodiscus</i>	51	<i>Stephanodiscus</i>	89	<i>Stephanodiscus</i>	78	<i>Cryptomonas</i>	45	<i>Stephanodiscus</i>	75
4	<i>Cyclotella</i>	28	<i>Cyclotella</i>	50	<i>Stephanodiscus</i>	51	<i>Cryptomonas</i>	30	<i>Cryptomonas</i>	36	<i>Cryptomonas</i>	67
5	<i>Microactinium</i>	44	<i>Phormidium</i>	13	<i>Stephanodiscus</i>	20	<i>Coelastrum</i>	66	<i>Eudorina</i>	26	<i>Aulacoseira</i>	34
6	<i>Aphanizomenon</i>	36	<i>Actinastrum</i>	19	<i>Coelastrum</i>	16	<i>Aulacoseira</i>	25	<i>Eudorina</i>	18	<i>Aulacoseira</i>	14
7	<i>Pandorina</i>	44	<i>Actinastrum</i>	20	<i>Phormidium</i>	24	<i>Aulacoseira</i>	26	<i>Merismopedia</i>	40	<i>Microcystis</i>	30
8	<i>Aulacoseira</i>	28	<i>Pediastrum</i>	37	<i>Microcystis</i>	43	<i>Aulacoseira</i>	24	<i>Pediastrum</i>	25	<i>Microcystis</i>	70
9	<i>Anabaena</i>	25	<i>Merismopedia</i>	27	<i>Anabaena</i>	32	<i>Microcystis</i>	33	<i>Skeletonema</i>	34	<i>Microcystis</i>	24
10	<i>Actinastrum</i>	41	<i>Cyclotella</i>	23	<i>Aulacoseira</i>	25	<i>Aulacoseira</i>	54	<i>Cryptomonas</i>	16	<i>Aulacoseira</i>	25
11	<i>Aphanizomenon</i>	27	<i>Coelastrum</i>	42	<i>Aulacoseira</i>	63	<i>Aulacoseira</i>	39	<i>Cyclotella</i>	28	<i>Aulacoseira</i>	23
12	—	—	<i>Cyclotella</i>	89	<i>Cyclotella</i>	30	<i>Skeletonema</i>	51	<i>Cyclotella</i>	54	<i>Cryptomonas</i>	23
1	—	—	<i>Stephanodiscus</i>	69	<i>Stephanodiscus</i>	98	<i>Stephanodiscus</i>	94	<i>Stephanodiscus</i>	80	<i>Stephanodiscus</i>	63
2	—	—	<i>Stephanodiscus</i>	90	<i>Stephanodiscus</i>	94	<i>Stephanodiscus</i>	49	<i>Stephanodiscus</i>	90	<i>Stephanodiscus</i>	48
3	—	—	<i>Stephanodiscus</i>	55	<i>Stephanodiscus</i>	97	<i>Stephanodiscus</i>	73	<i>Cryptomonas</i>	52	<i>Stephanodiscus</i>	34
4	<i>Cyclotella</i>	50	<i>Stephanodiscus</i>	26	<i>Stephanodiscus</i>	52	<i>Anabaena</i>	25	<i>Cryptomonas</i>	26	<i>Cryptomonas</i>	33
5	<i>Anabaena</i>	38	<i>Dictyosphaerium</i>	42	<i>Synedra</i>	17	<i>Coelastrum</i>	47	<i>Coelastrum</i>	45	<i>Aulacoseira</i>	39
6	<i>Oscillatoria</i>	24	<i>Actinastrum</i>	19	<i>Pediastrum</i>	24	<i>Aulacoseira</i>	20	<i>Cryptomonas</i>	30	<i>Aulacoseira</i>	26
7	<i>Actinastrum</i>	20	<i>Actinastrum</i>	49	<i>Merismopedia</i>	26	<i>Microcystis</i>	39	<i>Aulacoseira</i>	15	<i>Aulacoseira</i>	25
8	<i>Aulacoseira</i>	23	<i>Aulacoseira</i>	24	<i>Microcystis</i>	44	<i>Aulacoseira</i>	16	<i>Merismopedia</i>	43	<i>Aulacoseira</i>	28
9	<i>Nitzschia</i>	16	<i>Cyclotella</i>	45	<i>Anabaena</i>	33	<i>Coelastrum</i>	21	<i>Coelastrum</i>	20	<i>Aulacoseira</i>	30
10	<i>Aphanizomenon</i>	17	<i>Microcystis</i>	27	<i>Aulacoseira</i>	44	<i>Aulacoseira</i>	68	<i>Aulacoseira</i>	19	<i>Aulacoseira</i>	49
11	<i>Aphanizomenon</i>	58	<i>Cyclotella</i>	44	<i>Aulacoseira</i>	38	<i>Aulacoseira</i>	53	<i>Skeletonema</i>	29	<i>Aulacoseira</i>	73
12	—	—	<i>Cyclotella</i>	93	<i>Melosira</i>	32	<i>Skeletonema</i>	45	<i>Skeletonema</i>	31	<i>Aulacoseira</i>	49

^aDominant ratio

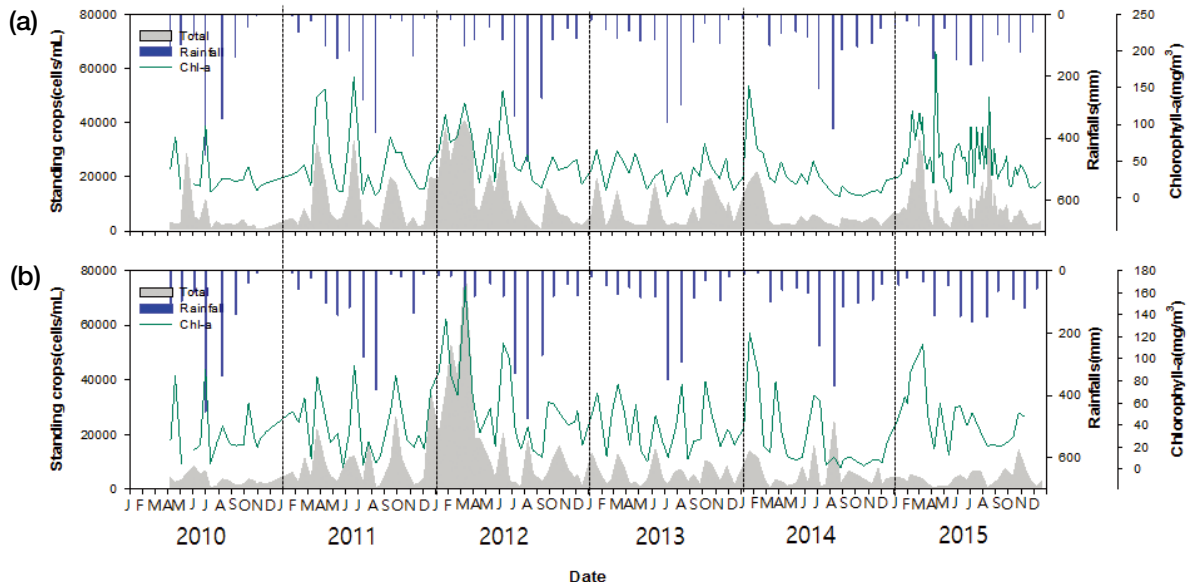


Fig. 4. Temporal variation of phytoplankton, concentration of chlorophyll-a and monthly preparation (a: Y1, b: Y2).

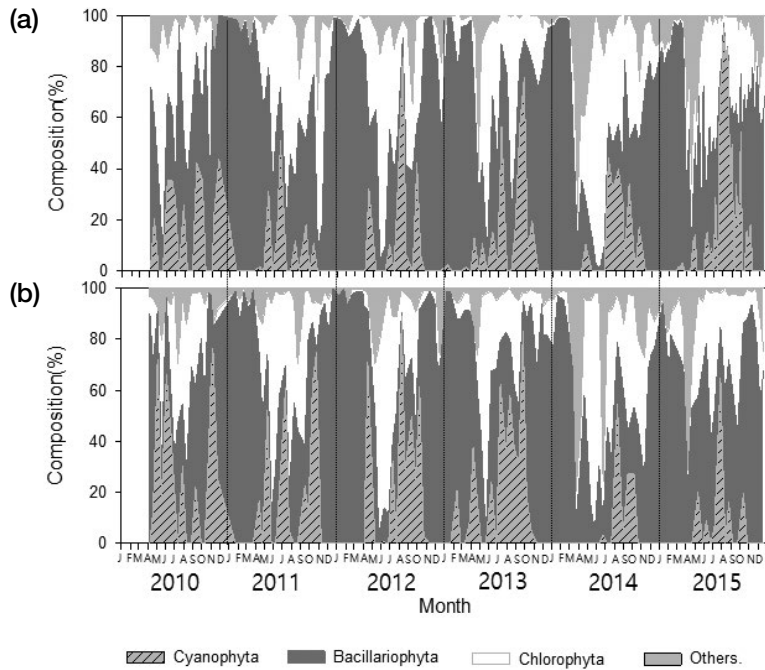


Fig. 5. Phytoplankton composition of Yeongsan River during monitoring (a: Y1, b: Y2).

지점과 마찬가지로 2012년에 가장 많은 수 ($17,347 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$)로 기록되었다. 이는 모두 1월부터 3월까지 *Stephanodiscus*속의 대발생에 의한 것으로 죽산보의 담수화가 시작되면서 수환경이 변화되어 수온이 낮아지면서 식물플랑크톤의 증식이 유리한 조건으로 변화가 이루어진 것이 원인으로 사료되며 겨울철에 규조류가 높은 현존량을 유지한다는 금강

에서 보고된 군집동태(Han *et al.* 2016) 결과와 유사하게 나타났다.

Y1지점에서 매년 최대현존량을 기록한 달은 2010년과 2011년에는 녹조류와 남조류가 우점하는 5월과 6월이었고, 2012년부터 2015년까지는 규조류인 *Stephanodiscus*속이 우점하는 1월~3월에 관찰되었다. 영산강 두 개의 지점은 주로

Table 3. Correlation coefficient (r) of phytoplankton and chlorophyll a (Chl-a) and chemical parameters (n = 134-163)

	Chl-a	WT ^a	pH	DO	EC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	Turbidity	NO ₃ -N	NH ₃ -N	PO ₄ -P
Y1	Cyanophyta	0.377**	0.187*	-0.174*	-0.139	0.010	0.122	-0.013	-0.246**	-0.065	0.016	-0.249**	-0.212**	-0.129
	Bacillariophyta	0.541**	-0.505**	0.621**	0.455**	0.468**	0.318**	0.019	0.547**	0.308**	-0.080	0.430**	0.420**	0.224**
	Chlorophyta	0.339**	0.413**	-0.200*	-0.066	0.342**	0.429**	0.055	-0.169*	0.049	0.054	-0.304**	-0.113	-0.041
	Others	0.363**	-0.092	0.067	0.140	0.147	0.037	-0.128	0.162*	-0.033	-0.105	0.001	0.240**	-0.048
	Total	0.778**	-0.185*	0.384**	0.431**	0.348**	0.543**	0.467**	0.012	0.358**	0.259**	-0.062	0.019*	0.285**
Y2	Cyanophyta	-0.050	0.159	-0.089	-0.233**	0.009	0.112	-0.012	-0.285**	-0.138	-0.052	-0.182*	-0.278**	-0.121
	Bacillariophyta	0.592**	-0.378**	0.494**	0.294**	0.282**	0.353**	-0.023	0.377**	0.297**	-0.088	0.306**	0.252**	0.237**
	Chlorophyta	0.126	0.399**	0.082	-0.178*	-0.164	0.273**	0.216*	-0.202*	-0.034	-0.060	-0.303**	-0.148	-0.098
	Others	0.161	0.030	0.096	0.012	0.078	0.267**	0.181*	-	-0.009	-0.074	-0.058	0.069	-0.077
	Total	0.606**	-0.211*	0.464**	0.423**	0.207*	0.361**	0.432**	-0.036	0.265**	0.248**	-0.118	0.186*	0.158

^aWater temperature
*0.01 ≤ p < 0.05, **p < 0.01

규조류의 비가 59%, 65%로 각각 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5). 12월부터 4월까지 규조류인 *Stephanodiscus* 속 또는 *Skeletonema*속이 높은 현존량을 기록하였으며, 이후 여름에는 녹조류에서 남조류가 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 6년의 조사기간 중 80 mg · m⁻³ 이상의 높은 Chl-a는 Y1 지점에서 22회, Y2지점에서 15회 기록되었으며, 이때 대부분 우점하는 종은 규조류인 *Stephanodiscus*속과 *Cyclotella*속, 남조류인 *Anabaena*속, *Microcystis*속, *Aphanizomenon*속과 *Merismopedia*속, 은편모조류인 *Cryptomonas*속이었다. 2015년에는 *Microcystis*속의 대발생이 나타났는데 수온의 상승(25°C 이상)과 장마기간인 6월~8월 강수량 감소(500 mm 이하)에 의한 유량의 감소에 기인한 것으로 사료된다.

현존량의 비율을 보면 Y1지점은 6년간 164회 조사 중에 규조류 97회(59%), 녹조류 41회(25%), 남조류 17회(10%), 기타 9회(6%)로 비율로 높았으며, Y2지점은 총 137회 조사 중 규조류 86회(63%), 녹조류 28회(20%), 남조류 19회(14%), 기타 4회(3%)의 비율로 기록되었고, 두 지점이 규조류와 남조류의 현존량이 높게 나타나는 시기는 전체 기간 중 80% 이상을 차지하는 것으로 나타났다.

4. 환경 여건과의 상관성

죽산보의 두 개의 지점 자료에 대한 상관분석 결과 두 지점의 식물플랑크톤 현존량은 Chl-a, pH, DO, 전기전도도, BOD, COD, T-N, T-P와 유의한 양의 상관성을 보였으며, 수온과 탁도는 음의 상관관계를 나타냈다(Table 3). 상류인 Y1지점의 각 식물문은 Chl-a와 유의한 양의 상관성을 보였다. pH는 남조류 및 규조류와 양의 상관성을 보였으며, 이는 규조류와 남조류의 대발생이 pH에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. T-N, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P는 남조류, 녹조류와 음의 상관성을 보였으나, 규조류와는 유의한 양의 상관성을 보였다. 일반적으로 NO₃-N은 규조류의 세포밀도와 유사한 증감패턴으로 높은 양의 상관성을 보이는 것(Berg et al. 2003)과 죽산보의 연구 결과와 유사한 결과를 보였다(Seo et al. 2018). Y2 지점의 각 식물문은 Chl-a와 거의 상관성이 없이 나왔으며, 규조류만이 유의한 양의 상관성을 보였다. 수온은 남조류 및 녹조류와 유의한 양의 상관성을 보였으며, pH는 규조류와 가장 큰 유의한 상관성을 보였다. Chl-a와 수온의 상관성 결과로 Y2지점은 규조류가 대부분 우점한다는 것을 추측할 수 있었다. 수온은 두 지점에서 남조류, 녹조류와 유의한 양의 상관성을 보였으나 규조류와는 음의 상관성을 보였으며, 낙동강의 수온과의 상관성 결과인 남조류는 수온과 양의 상관성을 보이며, 규조류는 음의 상관성을 보이는 결과와 유사하였다(Yu et al. 2014). 이는 남조류와 녹조류는 수온이 높아지는

시기에 나타나며, 규조류는 수온이 낮아지는 겨울에 높게 나타나는 것을 추측할 수 있다. SS와 탁도는 두 지점 모두 거의 음의 상관성을 보였으며 규조류는 두 지점 모두 대부분의 수질과 양의 상관성을 보였으며 수온과 SS, 탁도만 음의 상관관계를 보였다. 질산염, 암모늄, 인산염은 규조류와 유의한 양의 상관성을 보였으며, 녹조류와 남조류는 음의 상관성을 보였다.

적 요

2010년 4월부터 2015년 12월까지 영산강 본류에 위치해 있는 죽산보의 상, 하류의 수질 및 식물플랑크톤 변화 양상을 파악하기 위해 연구를 수행하였다. 동일한 기간 동안에 두 지점 모두 평균 수온은 17.3°C로 기록되었으며, 2011년부터 2014년까지는 약 16.3°C를 유지하다가 2015년에 17°C로 약 0.7°C 상승되었다. 조사기간 동안 식물플랑크톤의 종 조성은 총 288 분류군으로 남조류 17 분류군, 규조류 74 분류군, 녹조류 154 분류군 및 기타조류 15 분류군으로 조사되었다. 두 지점의 개체군 밀도는 500~29,950 cells · mL⁻¹으로 조사되었으며, Y1지점은 850~29,725 cells · mL⁻¹, Y2지점은 500~29,950 cells · mL⁻¹으로 조사되었다. 두 지점의 평균 개체군 밀도는 Y1지점이 8,180 cells · mL⁻¹, Y2지점이 7,530 cells · mL⁻¹으로 상류지점의 평균 밀도가 더 높게 조사되었다. 우점종은 규조류인 *Stephanodiscus*속, *Aulacoseira*속이 높게 나타났다. *Stephanodiscus*의 우점 빈도는 59%였고, *Aulaocseira*속의 우점빈도는 22%였다. 남조류의 전체속의 우점빈도는 17%였고, Y1지점이 19%로 Y2지점보다 2% 높게 나타났다. 그 중에 *Microcystis*속의 우점 빈도가 6%였고, Y1지점이 7%로 하류인 Y2지점보다 2% 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. Y1지점의 현존량 비율은 규조류가 전체의 52%, 녹조류가 24%, 남조류가 21%였고, Y2지점은 규조류 65%, 녹조류 18%, 남조류 13%로 상류 지점인 Y1지점의 남조류 현존량 비율이 더 높게 나타난 것을 볼 수 있었다. 본 연구는 식물플랑크톤의 천이 현상 및 수질요인들과의 변화에 따른 원인을 파악하고 영산강 죽산보의 특성에 대해 신뢰성 있는 데이터를 제공하기 위해 수행되었으며, 이후 수생태계 변화를 평가하는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-05-01-005).

REFERENCES

- Berg GM, M Balode, I Purina, S Bekere, C Bechemin and SY Maestrini. 2003. Plankton community composition in relation to availability and uptake of oxidized and reduced nitrogen. *Aquat. Microb. Ecol.* 30:263-274.
- Choi MK, BH Kim and KC Choi. 1995. Freshwater algae in the upstream of the Yongsan River System (1) - on the drinking water supplying area of Kwangju Districts -. *Korean J. Sanitation* 10:45-65.
- Han SR, K Cho, JH Yoon, JJ Lee, SA Yoo, IC Choi, HJ Joo, SU Cheon and BJ Lim. 2016. Phytoplankton community structure of midstream of Geum River on 2014 and 2015. *Korean J. Ecol. Environ.* 49:375-384.
- HRFCO. 2013. List of Rivers of South Korea. Han River Flood Control Office. Ministry of Environment, Korea.
- Jeong B, Y Kim, SW Jung, H Lee and Y Shin. 2014. Temporal variation and identification of a Centric Diatom, *Stephanodiscus* spp. during winter-spring blooms in the Yeongsan River. *Korean J. Ecol. Environ.* 47:273-281.
- Jeong EJ, JE Na, GM Kim, SS Shim and HY Lee. 2010. Water temperature and community of phytoplankton in Yongsan River, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 28:56-63.
- Jung SW, HM Joo, YO Kim, JH Lee and MS Han. 2011. Effects of temperature and nutrient depletion and reintroduction on growth of *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae): implication for the blooming mechanism. *J. Freshw. Ecol.* 26:115-121.
- 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 GY and JI Choi. 1988. Standing crops of phytoplankton in Lake Yongsan. *Algae* 3:183-192.
- Kim YJ. 2003. Dynamics of phytoplankton community in Youngsan River. *Algae* 18:207-215.
- Ko DG, JW Choi, BJ Lim, JH Park and KG An. 2012. Fish distribution, compositions and community structure characteristics during Juksan-Weir construction in Yeongsan River watershed. *Korean J. Ecol. Environ.* 26:892-901.
- K-water. 2012. Development of methods for optimal algae control reflecting the algae growth characteristics of weirs in four major rivers. Korea Water Resources Corporation.
- ME. 2017. Standard method for water and wastewater. Ministry of Environment, Korea.
- Noh S, Y Shin, H Choi, J Lee, J Lee and D Rhew. 2015. Characteristics of algae occurrence on environmental changes. *J. Environ. Impact Assess.* 24:278-286.
- Park CS and KG An. 2014. Fish passage assessments in the fishway of Juksan Weir constructed in the downstream area of

- Yeongsan River watershed. *J. Environ. Sci. Int.* 23:1513–1522.
- Park CS, JW Choi, JH Lee, BJ Lim, JH Park and KG An. 2013. Fish compositions and distribution characteristics in the upstream and downstream region of Seungchon Weir. *J. Korean Soc. Water Environ.* 29:196–203.
- Parmer M. 1962. *Algae in water supplies: an illustrated manual on the identification, significance, and control of algae in water supplies.* U.S. Department of Health, Education and Welfare. Public Health Service. Division of water supply and pollution control.
- Ryu HS, HK Park, HJ Lee, RY Shin and SU Cheon. 2016. Occurrence and succession pattern of cyanobacteria in the upper region of the Nakdong River: Factors influencing *Aphanizomenon* Bloom. *J. Korean Soc. Water Environ.* 32: 52–59.
- Seo KA, JE Na, HS Ryu and K Kim. 2018. Characteristics of nitro-nutrients and phytoplankton dynamics in the Yeongsan River after weir construction. *J. Korean Soc. Water Environ.* 34:424–431.
- Shin JK, BK Kang and SJ Hwang. 2016. Limnological study on spring-bloom of a green algae, *Eudorina elegans* and weir-water pulsed-flows in the midstream (Seungchon weir pool) of the Yeongsan River, Korea. *Korean J. Ecol. Environ.* 49: 320–333.
- Shin Y, H Yu, H Lee, D Lee and G Park. 2015. The change in patterns and conditions of algal blooms resulting from construction of weirs in the Yeongsan River: long-term data analysis. *Korean J. Ecol. Environ.* 48:238–252.
- Son M, JH Park, C Lim, S Kim and BJ Lim. 2013. Seasonal changes of phytoplankton community and water quality in Yeongsan River watershed. *Korean J. Environ. Biol.* 31: 105–112.
- Song E, S Jeon, E Lee, D Park and Y Shin. 2012. Long-term trend analysis of chlorophyll-a and water quality in the Yeongsan River. *Korean J. Limnol.* 45:302–313.
- Woo H. 2010. Trends of ecological river engineering in Korea. *J. Hydro-Environ. Res.* 4:269–278.
- Wui IS. 1974. The biological estimation of water pollution levels on the benthos fauna of the Yeong-san River. *Korean J. Ecol. Environ.* 7:29–43.
- Yu JJ, HJ Lee, KL Lee, HS Lyu, JW Whang, LY Shin and SU Chen. 2014. Relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong River, Korea. *Korean J. Ecol. Environ.* 47:547–257.

Received: 10 October 2018

First Revised: 22 November 2018

Second Revised: 7 December 2018

Revision accepted: 10 December 2018