

## 영산강 중류(승춘보)의 봄철 녹조류 *Eudorina elegans* 대발생과 붓물 펄스방류에 대한 육수학적 고찰

신재기\* · 강복규<sup>1</sup> · 황순진<sup>2,\*</sup>

한국수자원공사 낙동강남부권관리단, <sup>1</sup>환경부 수생태보전과, <sup>2</sup>건국대학교 보건환경과학과

**Limnological Study on Spring-Bloom of a Green Algae, *Eudorina elegans* and Weirwater Pulsed-Flows in the Midstream (Seungchon Weir Pool) of the Yeongsan River, Korea.** Shin, Jae-Ki\* (0000-0002-5380-5078), Bok-Gyoo Kang<sup>1</sup> (0000-0003-1947-2043) and Soon-Jin Hwang<sup>2,\*</sup> (0000-0001-7083-5036) (Office for Southern Region Management of the Nakdong River, Korea Water Resources Corporation (K-water), Busan 49300, Republic of Korea; <sup>1</sup>Aquatic Ecosystem Conservation Division, Water Environment Management Bureau, Ministry of Environment, Sejong 30130, Republic of Korea; <sup>2</sup>Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea)

**Abstract** This study was carried out to elucidate the development of unprecedented water-bloom caused by a single species of colonial green algae *Eudorina elegans* in the upstream area of the Seungchon weir located in the Yeongsan River from late April to May 2013. The Yeongsan River is typically regulated system and the waterbody is seriously enriched by both external and internal sources of nutrients. Seasonal algal outbreaks were highly probable due to various potential factors, such as the excessive nutrients contained in treated wastewater, slow current, high irradiation and temperature, in diatom (winter), green algae (spring) and blue-green algae (summer). Spring green-tide was attributed to *E. elegans* with level up to 1,000 mg m<sup>-3</sup> (> 50 × 10<sup>4</sup> cells mL<sup>-1</sup>). The bloom was exploded in the initial period of the algal development and after then gradually diminished with transporting to the downstream by the intermittent rainfall, resulting in rapid expansion of the distribution range. Although the pulsed-flows by the weir manipulation was applied to control algal bloom, they were not the countermeasures to solve the underlying problem, but rather there still was a remaining problem related to the impact of pulsed-flows on the downstream. The green-tide of *E. elegans* in this particular region of the Yeongsan River revealed the blooming characteristics of a colonial motile microalga, and fate of vanishing away by the succeeding episodic events of mesoscale rainfall. We believe that the results of the present study contribute to limno-ecological understanding of the green-tide caused by blue-green algae in the four major rivers, Korea.

**Key words:** *Eudorina elegans*, eutrophication, hypoxia, pulsed-flows, Seungchon weir pool, wastewater, water-blooms, Yeongsan River

Manuscript received 12 October 2016, revised 23 November 2016,  
revision accepted 14 December 2016  
\* Corresponding author: Tel: +82-10-3870-6121, Fax: +82-51-529-3168,  
E-mail: shinjaeki@gmail.com  
Tel: +82-2-450-3748, Fax: +82-2-456-5062,  
E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

### 서 론

우리나라 4대강 중의 하나인 영산강은 유로 연장이 가  
장 짧고 하상계수가 커서 과거부터 용수가 부족하였고, 이

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

로 인해 1970년대 중반부터 본류와 지류의 상류에는 댐을 축조하여 저수지를 조성하게 되었으며, 이때부터 수문학적 유량은 심각하게 조절되어 중·하류에는 하천수의 부족과 건천화에 더욱 취약하였다. 특히, 광주광역시를 중심으로 한 도시화, 산업화 및 인구집중화에 따른 물 수요 증가와 배수구조가 하천 수질과 수생태계의 물 환경을 더욱 악화시키는 형태로 변화시켰다(Woo, 2010). 이로 인해 하천수의 오염은 급속도로 가속화되었고, 그 결과인 녹조현상(green-tide)과 그 영향으로부터 자유롭지 못한 고질적인 문제점을 갖게 되었다. 영산강 수계는 현재 상류의 댐에서 실시간으로 하천 유지 유량을 일정량 흘려 보내고 있으나, 중·하류에 도달하였을 때 도시지역(광주광역시, 나주시)에서 발생하는 하폐수를 처리하여 배출하는 방류수와 합류되어 그 영향은 하구까지 이어지는 하도 구조를 가지고 있다. 따라서 상류와 하구의 댐과 방조제는 건설 후 시간이 경과되면서 하천의 수리수문(예, 유량과 유속 감소) 및 수질(예, 오염) 변화뿐만 아니라 식물플랑크톤과 부착조류를 포함하는 수생태계를 교란(예, 다양성 감소)시키는 주요 요인으로 작용하게 되었다(Cho *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2009). 그 예로서, 하구둑이 완공된 이후부터 인과 질소에 의한 부영양화가 심화되었고, 이로 인해 표층의 만성적 물꽃(water-blooms)과 저층의 빈산소(hypoxia) 현상은 지역의 물 환경 현안으로 대두되었다(Park *et al.*, 2001; Yoon *et al.*, 2003; KEI, 2005).

하천에서 조류의 번성은 조류 자체의 생물량 증가로 인한 문제점 이외에도 2차적으로 체내·외 대사물질인 독소와 이취미 등 심각한 환경문제를 야기할 수 있어(Palmer, 1980; Jones and Korth, 1995; Mohamed *et al.*, 2006), 조류 발생과 성장 증식의 영향인자를 탐구하는 것은 하천생태계의 관리 측면에서 매우 중요하다(Yang *et al.*, 2012). 유수생태계에서 조류 번성은 대개 풀(pool), 역류(backflow) 구간 및 전이대와 같이 물 흐름이 미약한 지역에서 우세하여(Reynolds, 1992; Dodds *et al.*, 1997; Dodds, 2007; Ahn *et al.*, 2012; CASFMRRP, 2014), 하천에서 유량은 조류 성장 또는 확산에 대한 중요한 영향인자로서 많은 관심을 받아 왔다(Maier *et al.*, 2001, 2004; Ha *et al.*, 2003; Jeong *et al.*, 2007). 그동안 국내의 녹조 관련 연구는 수질 농도나 대사물질의 현황, 단순 증감변동 및 원인생물의 분포조사에 집중되었고(Shin *et al.*, 2016a), 기후·수문을 고려한 심층 연구는 많지 않았으며(Kim *et al.*, 2016), 그나마 있어도 대부분 자세한 원인분석보다는 사후 수질모델 적용(Chong *et al.*, 2015) 수준에 머물렀다. 또한, 인간 활동의 다변화와 기후변화 영향(예, 가뭄과 홍수) 등을 통해 주요 수질 변수에 대한 불확실성이 가중되는 상태에서 예측 모

델링은 그 영향을 속단할 수 있기 때문에 조심스럽게 접근해야 할 필요성이 있었다(Thebault and Qotbi, 1999; Shin *et al.*, 2016a).

과거에 영산강에서 전개되었던 조류 발생 양상을 보면(<http://water.nier.go.kr/algaeinfo/>), 2009년 8월에 나주 지점에서 Chl-*a*가 317.0 mg m<sup>-3</sup>이었고, 2013년 8월(하순)에 죽산보 pool에서 205.2 mg m<sup>-3</sup>(남조류 20,400 cells mL<sup>-1</sup>)를 기록하여 다소 변동성은 있었지만, 부영양화에 의한 녹조 현상은 상존하는 상태로 볼 수 있었고, 최근 들어 지역 언론에서 보 월류수의 붓물(weir water)을 가리켜 ‘녹조폭포’라고까지 표현할 정도로 그 심각성이 부각되고 있는 실정이었다. 이러한 현상은 녹조 그 자체가 물 흐름에 의해 이송 또는 확산되는 한 형태로 볼 수 있었다(Whitehead and Hornberger, 1984). 또한, 2013년 5월에 승촌보 상류구간에서 대발생한 녹조현상을 경감시키는 방법으로 수문방류(가동보)와 월류(고정보)를 통해 테스트하였는데, 이것은 시기적으로 봄철 갈수기 또는 농번기에 상류 댐의 방류와 유역 내 유량 증대가 용이하지 않은 여건에서 보 구조물 조작에만 의존한 펄스유량(pulsed-flows)의 한 형태(Watts *et al.*, 2009)로서 다소 한계점이 없지 않았다.

우리나라의 경우, 펄스유량(일명, 증가방류)은 본류와 지류에 댐과 보를 가진 대하천에서 수질악화 또는 수질사고시에 간간히 이루어져 왔고, 현재에도 상류 댐과 연계하여 한강의 팔당호, 낙동강과 금강의 보에서 댐~보 또는 보~보 간에 사용되고 있으며, 특히 인공 구조물 보에 의해 유량이 조절되는 하천에서 일반적인 형태가 되었다. 그 예로서, 하천 유지 유량(maintenance flow) 또는 환경 유량(environmental flow)에 대한 댐 발전방류와 수문 개방의 여수로 방류가 대표적이다(Watts *et al.*, 2009). 그리고 유해물질의 수질오염사고, 녹조현상의 이상수질 및 염분도 상승의 염수침입 등에 대한 관리방안으로 통상 시행되었던 플러싱(flushing)(Ferreira *et al.*, 1997; Webster *et al.*, 2000; Robinson and Uehlinger, 2003; Ferris and Lehman, 2007; Flinders and Hart, 2009; Fovet *et al.*, 2012)과는 다소 의미적 차이가 있으나 포괄적으로 사용하는 용어로 이해할 수도 있겠다(Kondolf and Wilcock, 1996; Yu and Tan, 2006; Batalla and Vericat, 2009; Creaco and Bertrand-Krajewski, 2009; Watts *et al.*, 2009). 또한, 조절 하천에서 펄스유량의 적용은 사회, 경제 및 생태환경적 측면에서 긍정적 또는 부정적 문제점을 다양하게 수반하기 때문에 이에 대한 상호관계가 반드시 고려되어야 하겠다(Scheurer and Molinari, 2003).

영산강 수계를 대상으로 한 물 환경과 담수조류에 관한 선행연구는 1974년부터 시작되었으나(Kim, 2003), 다른 수



**Table 1.** General geographic and limnological features of dam reservoirs located in the Yeongsan River and the Boseong River systems.

Attribute/Reservoir	Damyang	Gwangju	Jangseong	Pyeonggrim	Naju	Yeongsan	Juam	Dongbok
	Yeongsan	Yeongsan (Jeungam)	Hwangryong	Hwangryong (Pyeonggrim)	Jiseok (Daecho)	Yeongsan	Boseong	Boseong
Elevation (EL.m)	124.0	76.0	91.0	116.0	65.0	1.4	115.0	171.0
Distance from Seungchon Weir (km)	50.8	—	—	—	—	75.0	—	—
Watershed area (km <sup>2</sup> )	66.0	41.3	122.8	19.9	104.7	3,371.0	1,010.0	189.0
Dam height (m)	46.0	25.0	36.0	37.3	31.0	19.5	58.0	44.7
Dam length (m)	306.0	505.0	603.0	390.5	496.0	4,350.0	330.0	188.1
Dam type	ICF	ER	ER	ECRD	ER	BM/CE	ER	CFRD
Flood water level (EL.m, FWL)	121.0	76.0	91.0	111.3	65.0	1.4	110.5	171.0
Normal high water level (EL.m, NHWL)	120.0	75.0	90.0	109.7	64.0	-1.4	108.5	168.0
Restricted water level (EL.m, RWL)	—	—	—	109.7	—	—	—	—
Low water level (EL.m, LWL)	—	—	—	91.6	—	—	85.0	150.0
Total impoundment (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	6,670	1,740	8,976	1,026	9,120	25,322	45,700	9,950
Available impoundment (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	6,480	1,524	8,480	805	8,780	18,090	35,200	9,170
Reservoir area (km <sup>2</sup> )	4.1	1.9	6.9	0.9	7.8	34.6	33.0	—
Year of construction	1976	1976	1976	2008	1976	1981	1992	1985

ICF: inclined core fill, ER: earth-rock, ECRD: central core rockfill dam, BM/CE: barrage and core earth, CFRD: concrete faced rockfill dam.

Choi *et al.*, 2013). 유로 연장은 136.0 km로서 국가, 지방 1급 및 지방 2급 하천이 각각 5개, 1개 및 34개로 구성되어 있고(Kim, 2003; Choi *et al.*, 2013; Jeong *et al.*, 2014), 동서간 최대 길이는 60.6 km이며, 남북 간 최대 길이는 89.9 km이다. 유역의 평균 폭은 26.7 km이고, 형태는 수지상의 직사각형이며, 평균 고도는 EL. 118.9 m이다(Son *et al.*, 2013). 주요 지류(유역면적)는 광주천(106.5 km<sup>2</sup>), 황룡강(564.3 km<sup>2</sup>), 지석천(657.2 km<sup>2</sup>), 고막원천(217.1 km<sup>2</sup>) 및 함평천(196.4 km<sup>2</sup>)이다. 연평균 강수량은 1,400~1,500 mm로서 6월~9월에 62%를 차지하여 계절적으로 편중되었고, 하상계수가 330으로서 유량 변동이 매우 커서 과거에는 홍수피해가 빈번하였다. 본류와 지류의 상류에는 1976년에 담양댐, 광주댐, 장성댐 및 나주댐이 건설되어 농업 또는 홍수조절용 저수지가 형성되었고, 2008년에 평림댐의 용수 전용 저수지가 추가되어 총 5개가 위치하고 있다(Fig. 1, Table 1). 또한, 하류에는 1981년에 완공된 하굿둑 방조제(Table 1)에 의해 해양 연안과 단절되어 완전 담수화되었으며(Yoon *et al.*, 2013), 2012년에는 4대강살리기사업의 일환으로 본류 하도를 횡단하는 승촌보(광주광역시 소재)와 죽산보(나주시 소재)의 다기능 보(multi-functional weir) 2개가 신규로 건설되었다(Fig. 1, Table 2).

본 연구의 주요 대상지는 영산강 중류 구간(광주천 합류 전 본류~승촌보)이었고, 승촌보는 행정구역상 광주광역시 남구 승촌동에 위치하고 있다(Fig. 1). 최상류에 위치하고 있는 담양댐으로부터 약 51 km 하류에 있고, 유역면적은 1,327 km<sup>2</sup>이며, 저수용량은 9.0 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이다(Table 2). 보 구조는 콘크리트 중력식 고정보(길이 304.5 m, 월류부

표고 EL. 7.5 m) 3개와 트러스형 리프트게이트(승강식) 가동보(길이 180.0 m, 월류부 표고 EL. 2.5 m) 4개로서 총 7개의 보가 일체형으로 연결되어 있다(Table 2). 또한, 소수력 발전설비(발전량 800 kw, 최대유량 28 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)와 어도(좌안의 조립형 아이스하버식 1개와 구하도의 볼랜드식 1개)가 각각 있어 다기능으로 운영 및 관리되고 있다(KWRI, 2012; EUICF, 2013).

영산강 유역에서 광주광역시의 하수처리구역은 146.4 km<sup>2</sup>(행정구역의 29.2%)이며 대상인구는 1,467천명(하수도 보급율 98.6%)이다(GMC, 2014). 승촌보 유역에는 총 2개의 하수처리장(광주제1, 광주제2)이 위치하고 있다(Fig. 1, Table 2). 광주제1하수처리장은 1985년 10월부터 1991년 6월까지 1단계 30 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> 규모로 영산강 본류와 광주천이 합류하는 직전 지점의 우안(광주광역시 서구 천변우하로)에 건설되었고, 2단계는 1993년 9월부터 1997년 12월까지 30 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> 규모로 증설되어 총 60 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>의 처리능력을 갖추고 있다(Table 2). 그리고 고도처리와 총인처리 시설은 2008년 12월과 2012년 10월에 각각 추가하였다. 광주제2하수처리장(보에서 상류 4 km 지점)은 1995년 7월부터 1998년 10월까지 1단계 6 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> 규모로 영산강 본류와 황룡강이 합류하는 직후 지점의 좌안(광주광역시 광산구 송대길)에 건설되었고, 2단계는 1998년 4월부터 2001년 12월까지 6 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> 규모로 증설되어 총 12 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>의 처리능력을 갖추고 있다(Table 2). 그리고 고도처리와 총인처리는 2012년 10월에 추가하여 현재 가동 중에 있다. 이렇게 하여 승촌보 상류역에는 일 최대 72 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>의 하수처리수가 유입되고

**Table 2.** General geographic and limnological features of two weir pools constructed on the Yeongsan River system. DYR: Damyang Reservoir, CG: concrete gravity, F: fixed, M: movable, FWL: flood water level.

Attribute/Weir	Seungchon	Juksan
River system	Yeongsan	Yeongsan
Elevation (EL.m)	11.6	7.1
Longitudinal distance from DYR (km)	50.8	69.9
Watershed area (km <sup>2</sup> )	1,997	2,359
Weir type	3 Fixed (CG), 4 Movable gate (Truss-lift)	4 Movable gate (Shell)
Weir length (m)	484.5 (304.5 (F), 180.0 (M))	172.0
Weir height (EL.m)	7.5(F), 2.5(M)	-3.63
Building road bridge (m)	B 12.5 × L 568.6 (EL.13.8~EL14.9)	B 5.3 × L 622.0 (EL.8.7)
Flood water level (EL.m, FWL)	11.6	7.1
Flood quantity (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	4,120	6,710
Normal operating water level (EL.m)	7.5	3.5
Impoundment (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	900	2,570
Fish-ladder type and length (m)	Assembled Ice-harbor (B 14.2 × L 164.9) Borland (B 0.8 × L 120.5)	Ice-harbor (B 5.0 × L 104.0)
Hydropower generation (kw)	8,000	1,220
Treated wastewater effluent (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	720,000	16,000
Year of construction	2012	2012

있다. 그리고, 광주효천하수처리장은  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 의 규모로서 최종 처리수가 승촌보 하류의 좌안으로 유입되는 지석천의 지류에 배출되고 있다(GMC, 2014).

## 2. 강수량 및 유량 자료조사

강수량과 유량은 승촌보 유역에 있는 기상청 광주기상대와 한국수자원공사 영섬통합물관리센터에서 관측한 일 누적자료 또는 평균값을 이용하였다. 유량은 유입량과 방류량으로 구분하였다. 유입량은 상류 하천(댐, 환경용수) 유입과 하수처리장 배출량으로 구분하였고, 방류량은 보, 소수력발전 및 어도로 각각 나누어 분석하였다.

## 3. 현장조사 및 실험분석

현장조사는 2013년 4월 27일부터 5월 31일까지 수행하였고, 이 중에서 5월 9일과 13일에는 *E. elegans*의 분포 특성을 관찰하기 위해 하천~보 구간에서 일 모니터링과 수심별 조사를 하였으며, 또한, 상류 구간(광주천 합류점~황룡강 합류점)은 하상조사도 추가하였다. 보 구간은 서창교(SEO, 보에서 상류 8 km 지점), 승용교(SEY, 보에서 상류 1 km 지점) 및 승촌보(SEC)의 3개 지점에서 조사하였고, SEC는 중앙(center, C), 좌안(left, L), 우안(right, R) 및 하류(downstream, D)로 각각 구분하였다.

수질분석을 위해 표층(30 cm 깊이) 시료를 이용하였고, 하천의 경우 하상에서 흐르는 물을 직접 채수하였으며, 보 pool의 경우 하폭과 수심을 고려하여 하천 양안에 횡단으

로 로프를 설치하여 고무보트(상류)를 이용하거나 소형 선박(중·하류)을 이용하였다. 채수한 시료는 아이스박스에 담아 보관한 후 차량을 이용하여 12시간 이내에 실험실로 옮겼고, 즉시 전처리 및 분석하였다(Rump and Krist, 1988; APHA, 2012). 수온과 DO는 YSI-550A meter와 YSI-6600 UMG meter를 이용하여 현장에서 측정하였다. 용존반응성인(soluble reactive phosphorus, SRP)은 GF/F filter paper로 여과한 후 ascorbic acid methods로 분석하였다(Rump and Krist, 1988). Chlorophyll-*a* (Chl-*a*) 농도는 시료를 Whatman GF/F에 여과한 후 90% ethanol로 비등 추출하는 Nusch (1980)법으로 정량하였고, 식물플랑크톤의 분류군별 광합성색소량을 시공간적 총량으로 정량할 수 있는 Fluoro-probe meter (bbe company, Germany)를 병행하여 사용하였다.

식물·동물플랑크톤 시료는 1 리터씩을 채수한 후 Lugol's와 중성 formalin 용액으로 각각 고정하였다(APHA, 2012). 고정된 시료는 육안으로도 식별될 정도로 세포밀도가 매우 높았기 때문에 별도로 농축은 하지 않았다. 광학현미경의 200~400× 또는 1,000× 배율하에서 검경 관찰하였고, 현존량은 100~200× 배율에서 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 계수하였다(APHA, 2012). 또한, 원수의 생 시료를 가지고 운동성도 관찰하였다. 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 동정에는 Hirose *et al.* (1977), Prescott (1982)와 Thorp and Covich (2001) 문헌을 각각 참고하였다. 자료의 기초 통계처리는 SYSTAT<sup>®</sup> 8.0 프로그램(SPSS, 1998)을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 강우 및 유량 변동 분석

2013년 5월 6일~25일 동안에 강수량의 범위와 평균값은 각각 0.1~16.4 mm, 3.9 mm이었다(Fig. 2, Table 3). 월중 강수일(강수율)은 12일(38.7%)이었고, 총 강수량은 88.4 mm이었다. 10 mm 이상 강수일은 5월 10일과 19일에 각각 15.5 mm, 16.4 mm이었다고, 이 기간 이외 4월 23일에 24.0 mm와 5월 27일에 45.5 mm가 선행 또는 후행하여 내렸다. 총 유입량의 범위와 평균값은 각각 7.0~43.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 15.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이었다(Table 3). 승촌보를 기준으로, 유입량은 하수처리 방류수와 환경용수를 포함하는 상류 댐 방류량과 이를 제외한 유역(상류댐~승촌보 구간)의 유입량으로 구분될 수 있다(Table 3). 상류 하천 유입량의 범위와 평균값은 각각 10.1~11.8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 10.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이었다. 이 중에서 댐 방류량의 평균값(범위)은 2.4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (2.4~3.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)로서 거의 일정하였고, 하수처리수 방류량(환경용수)의 범위와 평

균값은 각각 7.4~8.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 7.8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>와 0.4~0.5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 0.4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이었다. 댐 방류와 하수처리수의 유량은 각각 26.4%, 73.6%를 차지하였다. 또한, 그 외 유역 유입량의 범위는 -3.3~32.7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이었고, 평균값은 5.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이었다(Table 3). 총 유입량에서 상류 댐 방류량과 유역 유입량이 차지하는 비율은 각각 61.6%, 38.4%이었다. 그리고 강우가 있는 직후에 급증하는 경향이 현저하였고, 유역 유입량에 의해 총 유입량의 증감변동과 그 폭이 결정됨을 알 수 있었다(Shin *et al.*, 2016a). 승촌보를 기준으로, 5월 8일~17일 사이에 총 유입량이 감소하면서 유역 유입량이(-)의 값을 보이는 시기도 있었는데 이것은 단기적인 현상으로서 봄 가뭄에 의한 하천수의 이용 증가와 고온에 의한 증발산이 컸기 때문으로 사료되었다(Fig. 2). 5월 23일~25일에 총 유입량의 증가는 붓물의 표층수를 월류시키기 위하여 인위적으로 보 기준으로 수위만을 조절하여 높인 것이었고, 그만큼 저수량을 채운 데서 기인하는 것이었다. 보의 pool은 저수능력이 크지 않기 때문에 제한관리수위 이상에서 구조물의 별도 조작 없이는 유입량이 소수력 발전과 어도를 통해 방류되어 일정 수위를 유지하는 형태를 갖추고 있다.

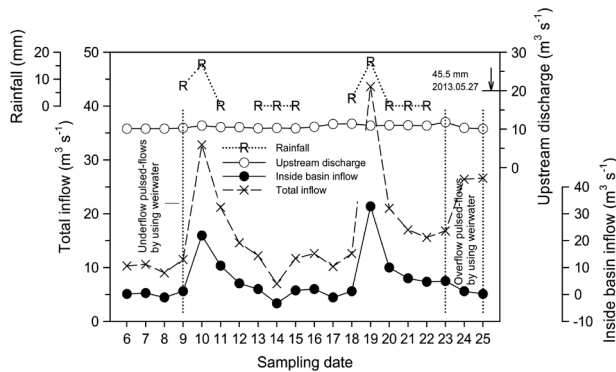


Fig. 2. Daily variations of rainfall and inflows in the Seungchon weir pool of the Yeongsan River from May 6 to 25, 2013.

2. 녹조류 *E. elegans* 번성의 생태학적 특성

SEO, SEY 및 SEC에서 수온의 범위와 평균값은 각각 20.0~28.3°C, 15.5°C, 15.5~28.4°C, 19.8°C 및 15.5~27.8°C, 20.5°C이었다(Fig. 3, Table 4). SEO에서 5월 9일에 21.0°C이었는데 5월 24일에 28.3°C로서 7.3°C가 증가하였다. SEY와 SEC에서는 증감을 반복하는 양상이었다. 봄철에서 여름철로 이행하기 직전에 일사량과 및 최고기온 요인이 큰 폭으로 증가하면서 그 영향에 의해 시공간적으로 수온이 동시에 크게 상승하는 것이었고(Fig. 3의 i1~i4),

Table 3. Descriptive statistics for hydrometeorological factors determined in the upstream region and the Seungchon weir pool in the Yeongsan River from May 6 to 25, 2013.

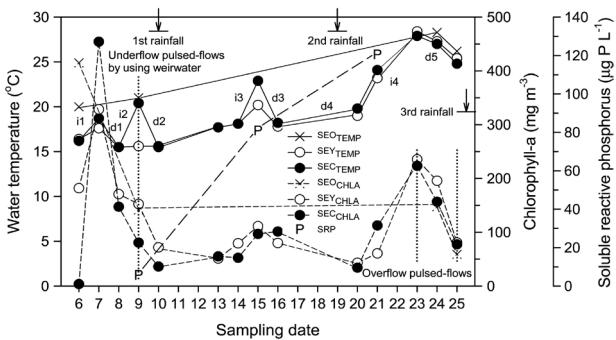
Item	Seungchon weir pool of the Yeongsan River			
	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
Air temperature (°C)	25.7	4.0	17.3	32.1
Day length (hrs)	8.1	4.8	0.0	12.8
Wind velocity (m s <sup>-1</sup> )	1.9	0.5	1.2	3.3
Rainfall (mm)	3.9	6.4	0.1	16.4
Total inflow (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	15.6	9.2	7.0	43.6
Inside basin inflow (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	5.0	8.6	-3.3	32.7
Upstream inflow (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	10.6	0.5	10.1	11.8
- Dam discharge (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	2.4	0.2	2.4	3.0
- Environmental water (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0.4	0.1	0.4	0.6
- Treated wastewater effluent (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	7.8	0.4	7.4	8.4

그 사이사이에 간헐적인 봄 강우가 있는 후에는 급감(Fig. 3의 d2, d4)하였거나 증가 폭이 크지 않았는데(Fig. 3의 d1, d3, d5), 전술한 기후 요인이 소강되었거나 수체의 흐름 등 물리적 작용이 있었기 때문이었다. 조사기간 동안 수온은 봄별에 의해 점진적으로 상승하는 계절적 영향이 뚜렷하였다. 또한, 수심이 얇은 상류의 SEO에서 비교적 높았고, 보 pool에서는 SEY보다 SEC가 조금 높았는데 SEY가 황룡강 지류의 유입수와 광주제2하수처리장 방류수의 영향을 우선 받기 때문이었다(Fig. 1 참조). 그러나 두 지점의 차이는 크지 않았고, 시기에 따라 증감하는 양상을 보였다.

식물플랑크톤 생물량의 Chl-a 농도는 SEO, SEY 및 SEC에서 범위와 평균값이 각각 59.0~415.0 mg m<sup>-3</sup>, 190.7 mg m<sup>-3</sup>, 43.2~328.5 mg m<sup>-3</sup>, 131.7 mg m<sup>-3</sup> 및 3.6~454.2 mg m<sup>-3</sup>, 116.6 mg m<sup>-3</sup>이었다(Fig. 3, Table 4). 5월 6일에 SEO, SEY 및 SEC에서 각각 415.0 mg m<sup>-3</sup>, 181.9 mg m<sup>-3</sup> 및 3.6 mg m<sup>-3</sup>로서 종적 구배를 이루었고, 이 날을 기준으로 1일 후에 SEY와 SEC에서 각각 328.5 mg m<sup>-3</sup>와 454.2 mg m<sup>-3</sup>로서 우선순위가 역전되었다(Fig. 3). 2일 후에는 두 지점의 평균값이 159.2 mg m<sup>-3</sup>로서 상호 가까운 수준으로 근접되었고, 3일 후에 SEO와 SEY의 평균값은 147.0 mg m<sup>-3</sup>이었으나, SEC는 80.7 mg m<sup>-3</sup>로서 훨씬 더 감소하였다(Fig.

3). SEC가 보다 감소한 것은 보에서 국부적으로 소규모 저층 방류(0.5 m 수문 개방)를 하였기 때문이었다. 4일~7일 후에는 전 정점이 거의 일치하는 값(평균 53.2 mg m<sup>-3</sup>)을 나타내었다. 이 시기에 유역에서 23.0 mm의 강우가 있었는데 그 영향이었고, 그 효과는 3일 정도 유지되었다(Fig. 3). 1차 강우 후 SEY와 SEC에서 각각 111.3 mg m<sup>-3</sup>와 101.3 mg m<sup>-3</sup>로 또 다시 증가하였다가 2차 강우(5월 19일) 후에 평균값이 38.7 mg m<sup>-3</sup>로 감소하였다. 그리고 2차 강우가 있는지 4일 후에 두 지점(SEY, SEC)에서 평균값이 229.6 mg m<sup>-3</sup>로 다시 급증하였고, 이후에 79.2 mg m<sup>-3</sup>로 급감하였다(Fig. 3). 강우 후에 Chl-a 농도의 감소 양상이 현저하였고(Phlips *et al.*, 2007), 4일~5일이 지날 때쯤에 다시 증가하는 경향을 보였다. 끝으로, 5월 27일에 3차 강우가 45.5 mm 내린 후 유량 증가에 의해 붓물은 하류로 유하되었고, 그 결과 승춘보 pool의 상·하류 구간에서 전개되었던 *E. elegans*의 봄철 대증식 현상은 소멸되었다.

SEC에서 측정된 SRP의 범위와 평균값은 각각 5.7~120.5 µg PL<sup>-1</sup>, 69.0 µg PL<sup>-1</sup>이었다(Fig. 3, Table 4). SEC에서 5월 9일에 5.7 µg PL<sup>-1</sup>로서 낮은 값이었으나, 5월 15일과 5월 21일에 각각 80.9 µg PL<sup>-1</sup>, 120.5 µg PL<sup>-1</sup>로서 증폭되었다(Fig. 3). 5월 초순에 낮은 값을 보인 것은 선행한 식물플랑크톤의 대발생 단계에서 흡수 이용된 결과로 볼 수 있었고(Shin *et al.*, 2016), 중순에 급증한 것은 1차 강우에 의한 유입수와 녹조 쇠퇴 및 저질층 용출의 복합적 영향으로 볼 수가 있었다. 그리고 이러한 형태는 하순에 2차 강우에 의해 추가 증가가 있었다. 1·2차의 SRP 증가율은 각각 12.5 day<sup>-1</sup>, 6.6 day<sup>-1</sup>로서 선행 1차 강우에 의한 증가가 조금 더 컸었다.



**Fig. 3.** Spatial and temporal fluctuations of water temperature, chlorophyll-a and soluble reactive phosphorus (SRP) in the upstream part and the Seungchon weir pool of the Yeongsan River from May 6 to 25, 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge and SEC: the Seungchon weir. TEMP: temperature, CHLA: chlorophyll-a.

**3. 보 구조물 조작에 의한 붓물 펄스유량과 녹조현상 변동**

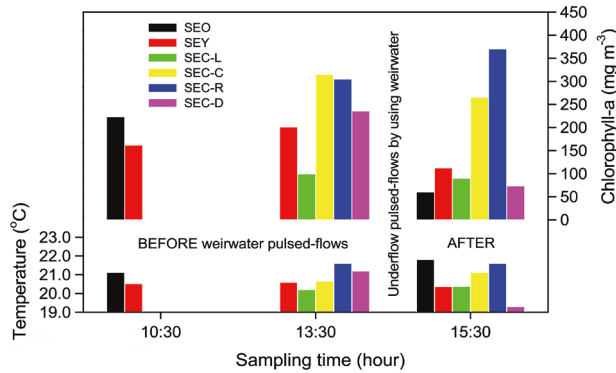
승춘보 pool에서 *E. elegans* 대발생으로 인해 현안이 된 녹조현상을 경감 또는 해소시키고자 보 내의 저수량을 이용한 인위적인 붓물 조절방류가 5월 9일과 5월 23일~25일에 각각 한 차례씩 있었다. 이때 구조물 조작의 형태가 달랐는데, 5월 9일은 승강식 가동보 수문을 개방(0.5 m)한 저층 방류(underflow)이었고, 5월 23일~25일은 수위를 높

**Table 4.** Descriptive statistics for water quality determined in the upstream region and the Seungchon weir pool in the Yeongsan River from May 6 to 25, 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge, SEC: near Seungchon weir and Mean ± standard deviation (minimum~maximum).

Item	SEO	SEY	SEC
Temperature (°C)	23.9 ± 4.0 (20.0~28.3)	19.8 ± 4.4 (15.5~28.4)	20.5 ± 4.2 (15.5~27.9)
Chlorophyll-a (mg m <sup>-3</sup> )	190.7 ± 154.9 (59.0~415.0)	131.7 ± 83.0 (43.2~328.5)	116.6 ± 112.8 (3.6~454.2)
Soluble reactive phosphorus (µg L <sup>-1</sup> )	-	-	69.0 ± 58.3 (5.7~120.5)



여 월류시킨 표층방류(overflow)이었다. 저층 방류에 의한 요인의 증감 변동은 하루 중에 이루어진 것으로서 방류 전(10:30~13:30)과 후(15:30)로 구분하여 비교하였고, 그 결과는 Fig. 4 및 Table 5와 같다. 방류 후에 수온은 최상류 SEO에서 0.7°C 높아졌고, pool 내 중간지점인 SEY는 조



**Fig. 4.** Spatial and temporal distributions of water temperature and chlorophyll-*a* concentration at before and after small-scale underflow pulsed-flows by using weirwater in the upstream part and the Seungchon weir pool of the Yeongsan River in May 9, 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge and SEC: near Seungchon weir. L: left side, C: center, R: right side, D: downstream.

금 감소(0.2°C)하였으며, SEC는 중앙(C)에서 조금 증가한 반면에 양안(L, R)에서는 비슷하였다(Fig. 4). 보의 하류(D)는 1.9°C 차이로서 다른 지점들에 비해 많이 감소하였다. 전 지점에서 시공간적으로 수온이 증가한 것은 수심 감소와 수체 유동이 주요하였고, 반대로 감소한 것은 보의 수문 개방을 통해 증층 또는 저층수를 방류하였기 때문이었다(Thornton *et al.*, 1990). 이것은 SEC에서 측정한 수심별 수온 결과 값(표층: 평균 20.5°C, 저층: 18.0°C)과 일치하였다(unpublished data). Chl-*a* 농도는 방류 전에 SEY에서 오전(10:30)에 비해 오후(13:30)에 39.3 mg m<sup>-3</sup> 정도 증가하였는데, 이러한 현상은 조사기간 중 상류의 SEO에서도 47.1 mg m<sup>-3</sup> 정도 더 높게 관찰되었다(Table 6). 방류 후에 SEO 162.9 mg m<sup>-3</sup> (73.0%)가 감소하였다. 보의 pool 내 SEY에서는 68.7 mg m<sup>-3</sup> (37.9%)가 감소하였고, SEC는 좌안(L)과 중앙(C)에서 각각 9.8 mg m<sup>-3</sup> 또는 49.1 mg m<sup>-3</sup> (15.6%) 정도 감소하였으나, 우안(R)은 65.1 mg m<sup>-3</sup> (17.6%)만큼 더 증가하였다(Fig. 4, Table 5). SEC-L, C, R의 Chl-*a* 총량으로 볼 때, 방류 전(718.6 mg m<sup>-3</sup>)보다 후(724.8 mg m<sup>-3</sup>)에 오히려 6.2 mg m<sup>-3</sup> (0.9%) 정도로 조금 더 증가한 결과를 나타냈다. 그리고 보 하류(D)는 162.2 mg m<sup>-3</sup> (67.8%)으로서 크게 줄었다(Fig. 4, Table 5).

SEO와 SEY에서 Chl-*a* 농도가 감소한 것은 보의 수문

**Table 5.** Comparison between before and after underflow pulsed-flows by using weirwater determined in the upstream region and the Seungchon weir pool in the Yeongsan River at May 9, 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge, SEC: near Seungchon weir and Mean (minimum~maximum).

Item	Before underflow pulsed-flows by weirwater (10:30~13:30 May 9, 2013)						After underflow pulsed-flows by weirwater (15:30 May 9, 2013)					
	SEO	SEY	SEC-L	SEC-C	SEC-R	SEC-D	SEO	SEY	SEC-L	SEC-C	SEC-R	SEC-D
Water temperature (°C)	21.1	20.6	20.2	20.7	21.6	21.2	21.8	20.4	20.4	21.1	21.6	19.3
Chlorophyll- <i>a</i> (mg m <sup>-3</sup> )	223.0	181.3	99.5	314.3	304.7	235.7	60.1	112.6	89.7	265.3	369.8	73.5
		(161.6~200.9)										

**Table 6.** Comparison between ante meridiem and post meridiem of water quality determined in the upstream region and the Seungchon weir pool in the Yeongsan River during May 6 to 25, 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge, SEC: near Seungchon weir and Mean ± standard deviation (minimum~maximum).

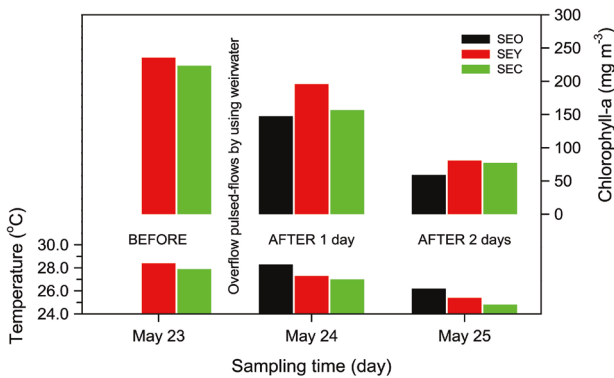
Item	Ante meridiem (May 6~25, 2013)			Post meridiem (May 6~25, 2013)		
	SEO	SEY	SEC	SEO	SEY	SEC
Water temperature (°C)	23.6 (21.0~26.2)	19.4 ± 5.9 (14.8~28.4)	20.2 ± 5.2 (15.5~27.9)	28.3	19.7 ± 3.5 (15.6~27.3)	20.1 ± 3.6 (15.5~27.0)
Chlorophyll- <i>a</i> (mg m <sup>-3</sup> )	100.3 (59.0~141.5)	123.7 ± 75.2 (37.8~235.6)	111.9 ± 61.9 (70.3~223.5)	147.4	125.4 ± 86.9 (43.2~328.5)	106.8 ± 130.9 (3.6~454.2)
Soluble reactive phosphorus (µg L <sup>-1</sup> )	-	-	5.7	-	-	100.7 (80.9~120.5)



조작에 의해 수체가 하류로 이송 또는 확산되었기 때문이었다. SEC-L~R은 총 4개의 수문 중 2개만 조작하여 하부 개방 후 저층 방류를 하였기 때문에 방류 영향권 내의 일부 소량은 배출되었을 것이나(Cho and Kim, 2010), 표층수의 총량 농도는 오히려 증가한 것을 볼 때 좌안(L)~중앙(C)부의 조체(藻體)가 우안(R) 쪽으로 쓸림 현상이 있었거나 상층에서 농축된 효과가 다소 전개되었던 것으로 볼 수가 있었다(Choi *et al.*, 2016; Shin *et al.*, 2016a). 그러나 이에 대한 자세한 것은 향후 수리학적 분석 검토가 추가로 있어야 하겠다. 이때 고광·고온 기상조건에서 풍량은 평균  $2.0 \text{ m s}^{-1}$  미만 수준으로서 강한 바람으로 보기는 어려웠다(Table 3 참조). SEC-D는 방류조작에 의한 유속증가와 희석작용으로써 그 하류로 이동하였고, 단기 및 부분개방으로 인해 방류구의 전단 흐름부에만 영향을 주었으며, 보 하류의 전 수역을 세척(wash-out)하지는 못하였다.

또한, 5월 23일부터 5월 25일까지 3일 동안 표층수 월류에 의한 펄스유량 방류의 결과는 Fig. 5 및 Table 7과 같다. 이

것은 보를 기준으로 유입량의 증가와 보 구조물의 방류가 전혀 없는 상태(소수력발전 가동중지 포함)에서 단순히 운영 수위만 상승시킨 후 고정보를 통해 붓물을 월류시키는 형태이었다. 따라서 보 수위를 증가시키는 선행 기간이 요구되었고, 이에 의해 담수-방류 기간이 각각 1일씩 소요되었다. 방류 전 1일째에 SEO와 SEC에서 평균 수온은  $28.2^\circ\text{C}$ 이었고, 상류에서 조금 더 높았다. 방류 중 2일과 방류 후 3일째에는 SEO, SEY 및 SEC에서 각각  $28.3^\circ\text{C}$ ,  $27.3^\circ\text{C}$  및  $27.0^\circ\text{C}$ ,  $26.2^\circ\text{C}$ ,  $25.4^\circ\text{C}$  및  $24.8^\circ\text{C}$ 로서 1일째에 비해 다소 하강되었고, 하류로 갈수록 감소되는 양상이 뚜렷하였다(Fig. 5). SEO, SEY 및 SEC에서 수온은 방류 후에 각각 7.4%, 10.6% 및 11.1% 감소하였다. Chl-*a* 농도는 1일째에 평균값이  $229.6 \text{ mg m}^{-3}$ 이었고, 방류 중 2일째와 방류 후 3일째에는 각각  $166.8 \text{ mg m}^{-3}$ 와  $72.4 \text{ mg m}^{-3}$ 이었다(Fig. 5). 그 결과, 1~2일 사이에는 평균값으로 볼 때 27.3%가 줄었으나, 2~3일에는 56.6%가 감소하였고, 방류 전(5월 23일)과 후(5월 25일)의 비교에서 68.5%가 감소되었다.



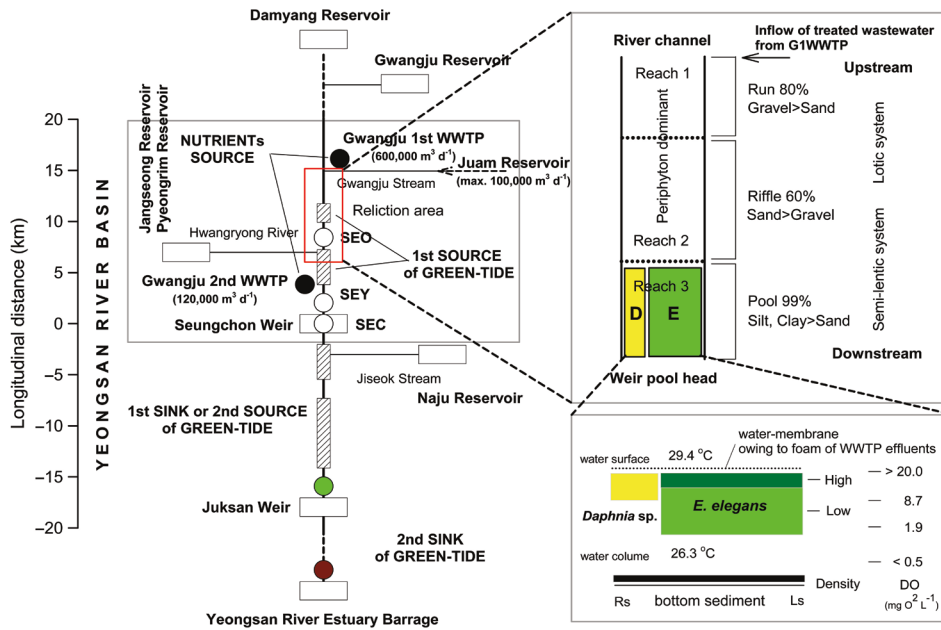
**Fig. 5.** Spatial and temporal distributions of water temperature and chlorophyll-*a* concentration at before and after small-scale overflow pulsed-flows by using weirwater in the upstream part and the Seungchon weir pool of the Yeongsan River from May 23 to 25, 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge and SEC: near Seungchon weir.

#### 4. 영산강의 녹조현상과 펄스유량 방류의 육수학적 고찰

영산강 중·하류 구간의 수질은 4대강에서 가장 오염되어 부영양화와 녹조현상(2차 영향 포함)이 심각한 상태에 있다(Shin, 2013). 이러한 데에는 무엇보다도 구조적 취약성이 강하기 때문이다. 1976년 이후 현재까지 본류 및 지류의 하천 상류에 농업 및 용수 전용 댐(5개)과 보(약 1,280개, Kim and Jang, 2011)들이 대량 건설되었고, 유량이 인위적으로 조절되어 유황 패턴이 크게 변화되었을 뿐만 아니라 유역 내 대도시에 필요한 각종 용수는 다른 수계(보성강의 주암댐과 동북댐)로부터 유역 변경을 통해 취수하여 공급받고 있으며, 그 하폐수는 최종 영산강으로 배출되는 독특한 물 이용 구조를 갖고 있다(Fig. 6). 또한, 여름철 몬순 우기를 제외하고 하천유량은 대부분 P·N 영양염을 풍부하게 함유한 하수처리수에 전적으로 의존되어 만성적인 수질 악화는 불가피하였다. 그리고 기존에 상류

**Table 7.** Comparison between before and after overflow pulsed-flows by using weirwater determined in the upstream region and the Seungchon weir pool in the Yeongsan River during May 23 to 25, 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge, SEC: near Seungchon weir and Mean (minimum~maximum).

Item	Before overflow pulsed-flows by weirwater (May 23, 2013)			After overflow pulsed-flows by weirwater (May 24~25, 2013)		
	SEO	SEY	SEC	SEO	SEY	SEC
Water temperature (°C)	—	28.4	27.9	27.3 (26.2~28.3)	26.3 (25.4~27.3)	25.9 (24.8~27.0)
Chlorophyll- <i>a</i> (mg m <sup>-3</sup> )	—	235.6	223.5	103.2 (59.0~147.4)	138.4 (80.9~195.8)	117.1 (77.4~156.7)



**Fig. 6.** Schematic diagram illustrated the spring-bloom of *Eudorina elegans* occurred in the upstream part and the Seungchon weir pool of the Yeongsan River during May 2013. SEO: Seochang bridge, SEY: Seungyong bridge and SEC: near Seungchon weir, WWTP: wastewater treatment plant. E: *Eudorina elegans*, D: *Daphnia* sp., Rs: right side, Ls: left side.

와 하구에 각각 댐과 독이 건설된 구조에서 2012년부터 2개의 보가 추가되어 유수대가 그만큼 축소되었을 뿐만 아니라 수생태계의 구조와 기능도 동시에 변화한 것으로 사료되었다. 그 예로서, 하구 담수호인 영산호에서만 계절적 영향으로 빈번하게 관찰되던 녹조 및 적조현상은 중류 수역에서도 대발생하는 생물학적 이상수질 사고를 겪게 되었다 (<http://water.nier.go.kr/algaeinfo/>). 그러나 이것은 기존에 오염원의 배수구조 형태에서 이미 예상되었던 내용이었다.

승촌보 상하류 구간(광주천합류점-승촌보 직하류)을 중심으로 볼 때, 광주제1·2하수처리장은 영산강의 중하류 구간에서 연중 P와 N 영양염의 최대 공급원으로 작용하였고(GIST, 2006), 더욱이 동계와 춘계의 갈수기에는 절대적이었다(Yoon *et al.*, 2013; Jeong *et al.*, 2014). 황룡강과 합류하기 전에는 본류에서  $6.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $60 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ )의 하수처리수가 지속적으로 유하되고, 합류 후에는  $1.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $12 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ )가 보에 직접 방류되고 있다(Fig. 6). 그러나 4대강살리기사업을 하면서 녹조(남조류) 및 적조(규조류)현상을 경감하기 위하여 하수도처리와 총인처리를 통해 질적 향상을 도모하였으나 여전히 미흡한 수준(연평균  $81 \sim 161 \mu\text{g PL}^{-1}$ , 평균값  $127.3 \mu\text{g PL}^{-1}$ )에 있다(GMC, 2014). 그 이유는 영산강을 포함한 우리나라의 대하천 수질관리는 과거부터 BOD (biological oxygen demand) 중심

에 치중된 정책을 펼쳐왔으며, 아직도 그 틀에서 과감하게 벗어나지 못하여 오랫동안 조류 문제를 심하게 겪고 있음에도 불구하고 P와 N의 제한 또는 과잉 배출되는 영양염의 저감 노력이 부족하였기 때문이다.

또한, 녹조방지대책으로 광주천에 환경용수로서 다른 수계의 주암댐 물을 최대  $1.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) 공급하고 있지만 그 양은 하수처리수의 13.9%에 불과해 이 또한 큰 도움은 되지 못하고 있다. 그 결과는 하천~보 전이대(유속 급감, pool 유지)로서 녹조현상의 상시 우심지역 또는 1차 발생 근원지(source)로 지목하고 있는 서창교(SEO) 수역에서 Chl-*a* 수준(평균값  $191 \text{ mg m}^{-3}$ , 최대값  $415 \text{ mg m}^{-3}$ )에 의해 역력히 볼 수 있다(Fig. 6). 이것은 하천의 유입량 흐름에 의해 보(SEC)의 내부로 이송 확산되고 더욱 증폭되어 보 pool 하류로 유하 이동하게 된다. 그 하류(죽산보)는 1차 저장고(sink)이면서 2차 배양지(source)가 될 수 있고, 최종적으로 하구호(sink)에까지 연속적인 악영향을 미치게 되는 것이다(Fig. 6). 이러한 결과는 빗물에 의해 흙탕물의 탁수환경이 조성되는 장마 또는 풍수기를 제외하고는 연중 지속적으로 크고 작은 규모의 조류가 번성하는 전개 과정을 반복할 수 밖에 없는 것이다(Shin *et al.*, 2015).

SEO 수역에서 봄철에 *E. elegans*가 대발생한 것은 다른 아닌 구조적으로 최악의 여건하에서 야기된 육수생태학적

현상이었다(Fig. 6). 하천 구간(1~2)은 우수환경인 반면에 보 구간(3)은 정수환경이어서 물 흐름이 급감되어 수중 영양염이 집중되는 수역에 해당하였으며, 조류가 번성하기에 최적 조건을 갖추기 시작하는 곳(Shin *et al.*, 2016a)으로 볼 수가 있었다. *E. elegans*가 최고 번성한 때에, 수표면에는 하수처리수의 거품에 기인하는 투명한 수막이 얇게 형성(Shin *et al.*, 2016b, c)되어 있었고, 그 아래에서 조류가 고밀도( $> 50 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>)로 집적되어 있었으며, 수심이 깊어질수록 농도가 감소하였으나 2.5 m까지는 비교적 높은 밀도( $> 2 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>)로 분포하였다. 이때 수중 DO는 상하층에서 큰 차이( $> 19.5$  mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>)를 보였고, 저층은 빈산소(hypoxic) 또는 무산소(anoxic) 상태이었으며, SRP의 평균값은 1,150.3 µg PL<sup>-1</sup>를 기록하였다. 이것은 하수처리수의 평균값보다 약 9배 정도 높은 수준이어서 이 시기에 외적 영향뿐만 아니라 내적 부하도 매우 심각한 상태로 볼 수 있었다. 이러한 현상은 대청호의 소옥천, 충주호의 제천천 및 팔당호의 경안천 하구에서(Shin *et al.*, 2003, 2016a) 저수지의 수위가 최저로 감소하였거나, 최고 수위로 이행하면서 분류 유량이 지류보다 많을 때 역류(backflow)되어 녹조현상이 농축 심화된 상태에서 국지적으로 흔히 관찰할 수 있는 내용이다(Reynolds, 1992; Watts *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2016a). SEO에서 봄철 *E. elegans*의 번성은 승촌보 건설 후 담수(impoundment) 초기에 나타난 현상으로서 물 환경 변화의 과정으로 볼 수 있었고, 향후 이에 대한 육수생태학적 관찰이 뒤따라야 하겠으며, 오염 부하로 볼 때 시공간적 녹조현상은 지속될 것으로 예상되었다.

보 구조물 조작에 의해 이루어지는 펄스유량에 의한 녹조현상의 경감은 유량이 부족한 갈수기의 계절적 상황에서 최소유량으로 효율성을 제고하였던 시도로서 볼 수 있었다. 그러나 단지 점(보) 또는 일부 구간(보 상류)의 문제점 해결을 위한 도구(tools)이었지 결코 하류 하천의 여건까지 고려한 거시적인 것은 아니었으며, 상류의 하수처리수 영향 하에서 고농도의 조류 생물량을 조절하는 데에 다소 한계를 포함하고 있었다. 5월 초에 있었던 승강식 가동보 수문의 하부 개방 방류는 수심이 얕지만 저층수가 배제되는 방식으로서 표층에 밀집된 조류를 이송시키기에는 수리학적으로 상당한 어려움이 있었고, 그 결과 수체의 유동에 의해 보 pool 내 상부 층에서 국지적 쏠림 현상이 유발되었던 것이다(Watts *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2016). 반면에 5월 하순에 있었던 어도를 제외한 모든 보 구조물의 방류시스템 운영을 중지한 상태에서 고정보를 통한 월류는 표층수의 이동에 유리하게 작용하여 생물량(Chl-*a*) 농도 감소에 보다 효과적이었다. 하지만 두 경우에서 각각

장·단점은 있었으나 이를 직접적으로 비교하기에는 다소 어려움이 있었다. 그 이유는 구조물의 운영방식 차이, 방류 기간 및 그에 따른 유량의 차이 등 상이한 조건이었기 때문이었다. 또한, 녹조현상의 발생 빈도가 많거나 기간이 장기화될 때, 소수력발전 중지와 녹조 이송에 따른 각각의 경제적 손실과 하류오염 영향도 동시에 고려되어야 하겠다(Watts *et al.*, 2009). 보의 상류 하천~pool 구간에서 하수처리수와 퇴적층의 복합적 영향에 의해 전개되는 부영양화와 녹조현상은 상·하류의 연속적인 개념으로 이해하고 접근되어야 하겠으며, 이를 경감 또는 해소하기 위해서 Watts *et al.* (2009)이 제시하고 있는 펄스유량 또는 물 교환율이 각각 10~15% day<sup>-1</sup>, 10~20% day<sup>-1</sup>로 유지할 수 있는 양질의 수량 확보가 선결되어야 하겠다. 그러나 영산강은 내외적 여건에서 물 확보가 쉽지 않아서(GIST, 2006), 다각적인 수자원 활용의 고도화를 계획하고 있으며(Lee and Jung, 2015), 그중에서 하수처리수의 이용성이 유력한 후보로 제시되고 있으나 이에 대한 관점은 보다 신중하게 고려되어야 하겠다. 본 연구에서 영산강의 수질에 대한 기후-수문학적 요소와 수리학적 요인 영향뿐만 아니라 부영양화를 결정짓는 원인으로서 유역에서 발생하는 하수처리수의 양적 또는 질적 영향이 크다는 것을 *E. elegans*의 대발생에 대한 고찰로서 언급하였다. 그리고 현재의 총인고도처리는 기존(2012년 10월 이전)보다 하천 수질개선에 다소 효과적인 것으로 평가되고 있으나, 최종적으로 하수처리수를 하천유지용수로 활용하기 위해서는 P 저감(궁극적으로 P-free 하수처리수 확보)에 더욱 노력해야 할 필요성이 있었다.

## 적 요

본 연구는 2013년 4월 하순~5월 동안에 영산강의 승촌보 상류에서 군체형 녹조류 *Eudorina elegans*의 단일 종에 의해 유례없이 대발생한 녹조현상의 전개 과정을 모니터링하였다. 영산강은 전형적인 조절 하천으로서 외적 또는 내적 요인에 의한 부영양화가 극도로 심각한 실정이었다. 하수처리수의 과잉 영양염을 기반으로 유속, 일사량 및 수온의 구조적 또는 비구조적 복합 영향에 의한 조류(규조류(겨울), 녹조류(봄~여름) 및 남조류(여름))의 대발생은 뚜렷한 계절적 잠재력으로 상존하였다. 이 중에서 봄철 녹조현상은 *E. elegans*에 의한 것으로서 그 수준은 최대 1,000 mg m<sup>-3</sup> ( $> 50 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>)을 초과하였고, 발생 초기에 폭증하였다가 시간이 경과하면서 점진적으로 감소하는 양상이 현저하였다. 또한, 간헐적인 강우에 의해 하류로 이

송되면서 분포 범위가 급속도로 확대되는 특성을 보였다. 보 구조물의 조작으로 펄스유량을 시험 적용하였으나 근본적인 문제를 해결하는 대응책은 아니었고, 하루 하천에 대한 영향을 고려해야 하는 문제점을 포함하고 있었다. *E. elegans* 녹조현상은 균체형 운동성 조류의 전형적 특성을 나타내었고, 최종적으로 후속되는 강우사상 (>45 mm)에 의해 소멸되었다.

## 사 사

본 연구는 한국수자원공사의 2013년도 현업기술지원에 의해 수행되었으며, 현장조사, 실험분석 및 자료제공에 도움을 준 한국수자원공사 영·섬통합물관리센터와 (주)자연과사람들 연구원들께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Ahn, C.H., J.H. Kwon, J.C. Joo, H.M. Song and G. Joh. 2012. Water quality of a rural stream, the Hwapocheon Stream, and its analysis of influence factors. *Journal of Korean Society Environmental Engineering* **34**: 421-429. (in Korean)
- APHA. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22nd edition, American Public Health Association, Washington, D.C. USA.
- Batalla, R.J. and D. Vericat. 2009. Hydrological and sediment transport dynamics of flushing flows: implications for management in large Mediterranean rivers. *River Research and Applications* **25**: 297-314.
- CASFMRP (The Commission for Survey and Assessment of the Four Major River Restoration Project). 2014. A Report of Post-Survey and Assessment for the Four Major River Restoration Project. Sejong, Korea. pp. 75-122. (in Korean)
- Cho, K.A., P.K. Ahn, S.G. Hong and D.O. Chung. 1999. A study on characteristics of water quality and degradation rates of organic phosphates in Young-San river. *Journal of the Korean Environmental Science Society* **8**: 691-697. (in Korean)
- Cho, Y. and Y.Y. Kim. 2010. Inflow patterns around a water intake tower for selective withdrawal depth. *The KSFM (Korean Society for Fluid Machinery) Journal of Fluid Machinery* **13**: 63-70. (in Korean)
- Choi, B.G., K. Kim, C. Park, W. Seo, M.H. Park, Y.B. Shim, H.R. Noh, S.J. Hwang and J.K. Shin. 2016. Hydro-meteorological study on water quality variability in Euim Reservoir, the North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: submitted. (in Korean)
- Choi, C.K., G.H. Kim, K.D. Yeo, M.P. Shim and Y.S. Choi. 2013. Optimal size determination of flood mitigation facilities in a watershed using geo-spatial information system and economic analysis: focused on dam height raise project. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **16**: 64-78. (in Korean)
- Choi, M.K., B.H. Kim and K.C. Choi. 1995. Freshwater algae in the upstream of the Yongsan River system (1)-on the drinking water supplying area of Kwangju districts. *Korean Journal of Sanitation* **10**: 45-65. (in Korean)
- Chong, S.A., H.S. Yi, H.S. Hwang and H.J. Kim. 2015. Modeling the flushing effects of multi-purpose weir operation on algae removal in Yeongsan River. *Journal of Korean Society Environmental Engineering* **37**: 563-572. (in Korean)
- Creaco, E. and J.L. Bertrand-Krajewski. 2009. Numerical simulation of flushing effect on sewer sediments and comparison of four sediment transport formulas. *Journal of Hydraulik Research* **47**: 195-202.
- Dodds, W.K. 2007. Trophic state, eutrophication and nutrient criteria in streams. *Trends in Ecology and Evolution* **22**: 669-676.
- Dodds, W.K., V.H. Smith and B. Zander. 1997. Developing nutrient targets to control benthic chlorophyll levels in streams: A case study of the Clark Fork River. *Water Research* **31**: 1738-1750.
- EUICF (Ewha University-Industry Collaboration Foundation). 2013. Three-Dimensional Numerical Model Development and Multi-Model Forecast Water Availability for Evaluating the Four Major Rivers Water Quality Prediction (II). National Institute of Environmental Research NIER-SP2013-312, Incheon, Korea. (in Korean)
- Ferreira, M.T., A. Franco, L. Catarino, I. Moreira and P. Sousa. 1999. Environmental factors related to the establishment of algal mats in concrete irrigation channels. *Hydrobiologia* **415**: 163-168.
- Ferris, J.A. and J.T. Lehman. 2007. Interannual variation in diatom bloom dynamics: Roles of hydrology, nutrient limitation, sinking, and whole lake manipulation. *Water Research* **41**: 2551-2562.
- Flinders, C.A. and D.D. Hart. 2009. Effects of pulsed flows on nuisance periphyton growths in rivers: a mesocosm study. *River Research and Applications* **25**: 1320-1330.
- Fovet, O., G. Belaud, X. Litrico, S. Charpentier, C. Bertrand, P. Dollet and C. Hugodot. 2012. A model for fixed algae management in open channels using flushing flows. *River Research and Applications* **28**: 960-972.
- GIST (Gwangju Institute of Science and Technology). 2006. A Study on instream water and ensure water quality management plan for the Yeongsan River. Yeongsan River and Seomjin River Watershed Management Commission.

- Gwangju, Korea. 166p.
- GMC (Gwangju Metropolitan City). 2013. White-Paper for the Policy of Gwangju Metropolitan City. Gwangju, Korea. pp. 221-231. (in Korean)
- Ha, K., M.H. Jang and G.J. Joo. 2003. Winter *Stephanodiscus* bloom development in the Nakdong River regulated by an estuary dam and tributaries. *Hydrobiologia* **506**: 221-227.
- Hirose, H., M. Akiyama, T. Iriya, K. Imahori, H. Kasaki, S. Kumana, H. Kobayashii, E. Takahashi, K. Tsumura, M. Hirano and T. Yamagishi. 1977. Illustrations of the Japanese freshwater algae. Uchidarokakuho Publ. Co. Ltd. Tokyo, Japan. 927p.
- Jeong, B., Y. Kim, S.W. 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 Journal of Ecology and Environment* **47**: 273-281. (in Korean)
- Jeong, E.J., J.E. Na, G.M. Kim, S.S. Shim and H.Y. Lee. 2010. Water temperature and community of phytoplankton in Youngsan River, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **28**: 56-63. (in Korean)
- Jeong, K.S., D.K. Kim and G.J. Joo. 2007. Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea). *Water Research* **41**: 1269-1279.
- Jones, G.J. and W. Korth. 1995. In-situ production of volatile odor compounds by river and reservoir phytoplankton populations in Australia. *Water Science and Technology* **31**: 145-151.
- KEI (Korea Environmental Institute). 2005. Development of Sustainable Estuary Management Strategy in Korea (II). Seoul, Korea. 457p.
- Kim, J.O. and K.S. Jang. 2011. A survey of the fishway situation and the construction of national fishway information system (NFIS) in Korea. *Water for Future* **44**: 50-55. (in Korean)
- Kim, S.J., H.J. Song, T.J. Park, M.Y. Hwang, H.S. Cho, K.D. Song, H.J. Lee and Y.S. Kim. 2015. Survey on lake environments in the Yeongsan and Seomjin River basins: based on 10 lakes such as Hadong and Sangsa. *Journal of Korean Society on Water Environment* **31**: 665-679. (in Korean)
- Kim, S.J., K.C. Park and H.S. Park. 2012. Estimation of available permit water for large scale agricultural reservoirs in Youngsan River basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **54**: 93-97. (in Korean)
- Kim, Y.J. 2003. Dynamics of phytoplankton community in Youngsan River. *Algae (Korean Journal of Phycology)* **18**: 207-215. (in Korean)
- Kondolf, G.M. and P.R. Wilcock. 1996. The flushing flow problem: defining and evaluating objectives. *Water Resources Research* **32**: 2589-2599.
- KWRI (K-water Research Institute). 2012. Development of Methods for Optimal Algae Control Reflecting the Algae Growth Characteristics of Weirs in Four Major Rivers. Interim Report KIWE-WR1-12-00. Daejeon, Korea. 110p. (in Korean)
- Lee, Y.G., K.G. An, P.T. Ha, K.Y. Lee, J.H. Kang, S.M. Cha, K.H. Cho, Y.S. Lee, I.S. Chang, K.W. Kim and J.H. Kim. 2009. Decadal and seasonal scale changes of an artificial lake environment after blocking tidal flows in the Yeongsan Estuary region, Korea. *Science of the Total Environment* **407**: 6063-6072.
- Lee, Y.W. and J.S. Jung. 2015. Development of water integration management system in Yeongsan and Sumjin River basins to counteract megadrought by climate change. *Journal of the Korean Society of Urban Environment* **15**: 167-175. (in Korean)
- Maier, H.R., G.B. Kingston, T.F. Clark and A. Sanderson. 2004. Risk-based approach for assessing the effectiveness of flow management in controlling cyanobacterial blooms in rivers. *River Research and Applications* **20**: 459-471.
- Maier, H.R., M.D. Burch and M. Bormans. 2001. Flow management strategies to control blooms of the cyanobacterium, *Anabaena circinalis*, in the River Murray at Morgan, South Australia. *River Research and Applications* **17**: 637-650.
- Mohamed, Z.A., H.M. El-Sharouny and W.S.M. Ali. 2006. Microcystin production in benthic mats of cyanobacteria in the Nile River and irrigation canals, Egypt. *Toxicon* **47**: 584-590.
- Moon, K.H. and I.S. Lee. 1993. A study on the freshwater algae species composition and stink. Proceedings of 39th Korea National Science Exhibition. Seoul, Korea. pp. 1-29. (in Korean)
- Na, J.E., M.H. Jung, I.S. Cho, J.H. Park, K.S. Hwang, H. Song, B.J. Lim, G.H. La, H.W. Kim and H.Y. Lee. 2012. Phytoplankton community in reservoirs of Yeongsan and Seomjin River basins, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **30**: 39-46. (in Korean)
- Nusch, E.A. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Archiv für Hydrobiologie-Beiheft Ergebnisse der Limnologie* **14**: 14-36.
- Palmer, J.L. 1980. Algae and Water Pollution, Algae Taste and Odor. Castle House, London, U.K. pp. 52-56.
- Park, L.H., Y.K. Cho, C. Cho, Y.J. Sun and K.Y. Park. 2001. Hydrography and circulation in the Youngsan River estuary in summer, 2000. *Journal of Korean Society Oceanography* **6**: 218-224. (in Korean)
- Philips, E.J., J. Hendrickson, E.L. Quinlan and M. Cichra. 2007. Meteorological influences in algal bloom potential in a nutrient-rich blackwater river. *Freshwater Biology* **52**: 2141-2155.
- Prescott, G.W. 1982. Algae of the Western Great Lakes Area

- with an illustrated key to Genera desmids and freshwater diatoms. Otto Koeltz Science Publishers. 977p.
- Reynolds, C.S. 1992. Algae. In, Calow, P. and G.E. Petts (eds.), *The River's Handbook: Hydrological and Ecological Principles*. Blackwell Scientific Publication, Oxford, U.K. pp. 195-215.
- Robinson, C.T. and U. Uehlinger. 2003. Using artificial floods for restoring river integrity. *Aquatic Sciences* **65**: 181-182.
- Rump, H.H. and H. Krist. 1988. *Laboratory Manual for the Examination of Water, Wastewater, and Soil*. VCH Verlagsgesellschaft, Publisher, New York, USA. 190p.
- Scheurer, T. and P. Molinari. 2003. Experimental floods in the River Spol, Swiss National Park: framework, objectives and design. *Aquatic Sciences* **65**: 183-190.
- Shin, J.K. 2013. Structural and functional properties of early stage aquatic ecosystem in small artificial dams constructed on the four major river, Korea. *Proceeding for Annual Meeting of Korean Water Resources Society* p. 289. (in Korean)
- Shin, J.K., D.S. Kim, H.K. Lee, S.J. Maeng and S.J. Hwang. 2003. An evaluation of aquatic environment in the Okchon Stream-embayment watershed, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 181-190. (in Korean)
- Shin, J.K., B.G. Kang and S.J. Hwang. 2016a. Water-Blooms (Green-Tide) Dynamics of Algae Alert System and Rain-fall-Hydrological Effects in Daecheong Reservoir, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: in press. (in Korean)
- Shin, J.K., Y. Cho, Y. Kim and S.J. Hwang. 2016b. Cause diagnosis and reduction measures of foaming in the treated wastewater outlet of D wastewater treatment plant. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 124-129. (in Korean)
- Shin, J.K., Y. Cho, Y. Kim, B.G. Kang and S.J. Hwang. 2016c. Explanation of foaming mechanism and experimental application of foam reduction techniques in the treated wastewater outlet of wastewater treatment plant connected to a tidal river, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: in press. (in Korean)
- Shin, Y., H. Yu, H. Lee, D. Lee and G. Park. 2015. The change in pattern and conditions of algal blooms resulting from construction of weirs in the Youngsan River: Long-term data analysis. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**: 238-252. (in Korean)
- Son, M., J.H. Park, C. Lim, S. Kim and B.J. Lim. 2013. Seasonal change of phytoplankton community and water quality in Yeongsan River watershed. *Korean Journal of Environmental Biology* **31**: 105-112. (in Korean)
- Thebault, J.M. and A. Qotbi. 1999. A model of phytoplankton development in the Lot River (France)-Simulations of scenarios. *Water Research* **33**: 1065-1079.
- Thorpe, J.H. and A.P. Covich. 2001. *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. 2nd Eds. Academic Press, California, USA. 1,056p.
- Watts, R.J., C. Allan, K.H. Bowmer, K.J. Page, D.S. Ryder and A.L. Wilson. 2009. *Pulsed Flows: A Review of Environmental Costs and Benefits and Best Practice*. Waterlines Report Series No. 16, The National Water Commission, Canberra, Australia. 147p.
- Webster, I.T., B.S. Sherman, M. Bormans and G. Jones. 2000. Management strategies for cyanobacterial blooms in an impounded lowland river. *River Research and Applications* **16**: 513-525.
- Whitehead, P.G. and G.M. Hornberger. 1984. Modelling algal behaviour in the River Thames. *Water Research* **18**: 945-953.
- Woo, H. 2010. Trends in ecological river engineering in Korea. *Journal of Hydro-environment Research* **4**: 269-278.
- Yang, Q., P. Xie, H. Shen, J. Xu, P. Wang and B. Zhang. 2012. A novel flushing strategy for diatom bloom prevention in the lower-middle Hanjiang River. *Water Research* **46**: 2525-2534.
- Yoon, B.B., E.J. Lee, T.A. Kang and Y.S. Shin. 2013. Long-term change of phytoplankton biomass (chlorophyll-a), environmental factors and freshwater discharge in Youngsan estuary. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 205-214. (in Korean)
- Yoon, S.T., Y.K. Oh, B.H. Moon and H.G. Kim. 2003. Water quality assessment of the lower Yeongsan River system. *Journal of Environmental Impact Assessment* **12**: 259-270. (in Korean)
- Yu, G. and S.K. Tan. 2006. Performances of hydraulics and bed-load sediment flushing in rigid channel using surge flows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **132**: 171-179.