

낙동강 8개 보에서 기상수문·기초수질 및 우점조류의 시공간 종적 변동성

신재기* · 박용은^{1,*}

한국수자원공사 부산권지사, ¹건국대학교 사회환경공학부

Spatiotemporal and Longitudinal Variability of Hydro-meteorology, Basic Water Quality and Dominant Algal Assemblages in the Eight Weir Pools of Regulated River (Nakdong). Shin, Jae-Ki* (0000-0002-5380-5078) and Yongeun Park^{1,*} (0000-0002-1959-0843) (Office for Busan Region Management of the Nakdong River, Korea Water Resources Corporation (K-water), Busan 49300, Republic of Korea; ¹School of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea)

Abstract The eutrophication and algal blooms by harmful cyanobacteria (CyanoHAs) and freshwater red-tide (FRT) that severely experiencing in typical regulated weir system of the Nakdong River are one of the most rapidly expanding water quality problems in Korea and worldwide. To compare with the factors of rainfall, hydrology, and dominant algae, this study explored spatiotemporal variability of the major water environmental factors by weekly intervals in eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. There was a distinct difference in rainfall distribution between upstream and downstream regions. Outflow discharge using small-scale hydropower generation, overflow and fish-ways accounted for 37.4%, 60.1% and 2.5%, respectively. Excluding the flood season, the outflow was mainly due to the hydropower release through year-round. These have been associated with the drawdown of water level, water exchange rate, and the significant impact on change of dominant algae. The mean concentration (maximum value) of chlorophyll-a was 17.6 mg m⁻³ (98.2 mg m⁻³) in the SAJ~GAJ and 29.6 mg m⁻³ (193.6 mg m⁻³) in the DAS~HAA weir pools reaches, respectively. It has increased significantly in the downstream part where the influence of treated wastewater effluents (TWEs) is high. Indeed, very high values (> 50 or > 100 mg m⁻³) of chlorophyll-a concentration were observed at low flow rates and water levels. Algal assemblages that caused the blooms of CyanoHAs and FRT were the cyanobacteria *Microcystis* and the diatom *Stephanodiscus* populations, respectively. In conclusion, appropriate hydrological management practices in terms of each weir pool may need to be developed.

Key words: algal assemblage, eutrophication, freshwater red-tide, harmful cyanobacteria, hydrology, Nakdong River, weir pool

서 론

Manuscript received 16 September 2018, revised 4 December 2018, revision accepted 4 December 2018
* Corresponding author: Tel: +82-2-2049-6106, Fax: +82-2-457-8895, E-mail: yepark@konkuk.ac.kr
Tel: +82-51-200-2531, Fax: +82-504-424-6121, E-mail: shinjaeki@gmail.com

부영양화(eutrophication)는 우리나라를 포함하여 세계적으로 가장 광범위하게 치솟고 있는 수질문제이다(Schindler, 2012; Paerl, 2014; Niamien-Ebrotte *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2016). 하천, 보(洑) pool과 저수지에서 증가하는 P · N

© 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.

영양염 농도가 수생태계의 생물군집에 직접적으로 영향을 주게 되어 조류(藻類) 대발생은 아주 보편 또는 만성화되었고, 부영양화에 의해 야기되는 심각한 부정적 문제점(예, 독소, 이취물질, 빈산소 및 생물폐사 등)들로 인해 학계, 행정(관련 공무원)·정치가, NGO 및 일반인에게까지 깊은 관심을 가지게 하고 있다(Reynolds and Walsby, 1975; OECD, 1982; Watanabe *et al.*, 1996; WHO, 2011; Park, 2012; Paerl, 2014). 낙동강도 과거(1960년대 말)부터 인위적인 무기영양염의 오염이 날로 심화되어 지표성 조류의 번무로부터 자유롭지 않아 현재까지 고심하는 실정에 있으며(Cho *et al.*, 1998), 물 이용의 기반시설과 공급 우선순위에 의해 구조적(예, 댐(독) 및 보) 또는 비구조적(예, 하수처리수, 방류 및 취수량) 취약성은 수질을 더욱 악화시키는 요인으로 작용하고 있다(Shin, 1998; Nichols *et al.*, 2006).

고온기(하계)와 저온기(동계)에 낙동강에서 장기간 양극화로 전개되고 있는 N_2 -비고정 유해 남조 *Microcystis*의 녹조현상(green-tide, cyanobacterial harmful algal blooms (CyanoHABs))과 소형 규조 *Stephanodiscus*의 담수적조(freshwater red-tide)는 1990년대 이전 또는 초반부터 수질 환경의 사회적 문제로 부각되었다(Cho *et al.*, 1998). 무엇보다도 생태학적 측면에서 부영양화의 전형적인 극상 형태로 지적되었으며, 4대강과 기타 수계의 담수생태계에서 연중 겪고 있는 수질오염의 공통적 결과에 해당하였다(Cho *et al.*, 1998; Shin, 1998; Shin *et al.*, 2016). 이들이 대발생하는 시기에 기본적으로 짙은 수색(청록색 또는 적갈색) 변화 이외에 유해 남조는 조류막(scum, algal mat) 형성, 잠재 독소(cyanotoxins)의 친수활동 방해 및 이취물질(geosmin, 2-MIB) 배출에 의한 수돗물 이용을 위협하고 있으며(Kim *et al.*, 2015a; Shin and Hwang, 2018), 담수적조는 정수과정의 응집·침전불량과 여과폐색 장애를 유발하는 등 환경보건과 사회·경제의 유·무형적 잠재 피해영향은 매우 방대하다(Cho and Shin, 1998a; Hwang *et al.*, 2016; Shin *et al.*, 2016).

특히, 2009~2012년 동안 4대강살리기국책사업(4 major rivers restoration project, 4MRRP)이 뜻밖에 추진되어 하천의 침수역 확대에 의해 물 관리는 더욱 복잡한 양상을 갖게 되었다(MOLIT, 2009; Cha *et al.*, 2011; Jun and Kim, 2011). 그 결과, 낙동강은 국내에서 인공 구조물(11개 댐, 11개 보)이 가장 많은 형태를 띠게 되어, 유황의 인위적 조절은 이전보다 극도로 심화된 상태에 있다. 2012~2013년 이전에 하천 수질은 본류에 유입된 P·N 무기영양염이 유하하면서 조류에 흡수·이용된 후 성장 조체가 하류(구)역에 집적되는 양상이었으나, 이와 달리 하도에 계단식 대형 연계보(cascade serial weirs)가 14.9~42.9 km 범위마다 건설되

면서 이상수질 현상은 보 구간에 분산·집중되는 형태로 변화되었다. 따라서 시공간적 조류 발생패턴도 하구형에서 유역의 최대 오염원(예, 금호강, 구미하수처리장)과 가까운 중·상류형으로 변형되었으며, 이를 대응하는 관리체계도 조류발생 영역이 다변화 또는 확대된 만큼 다중 복합 성향으로 귀결되었다.

낙동강을 포함한 4대강의 중·하류에서 녹조현상은 4MRRP 후 더욱 광역화 또는 장기화되어 날로 극심해짐에 따라 하천 수질에서 차지하는 중요도가 과거보다 증폭된 위치에 있다(Park, 2012). 낙동강은 팔당호(한강), 대청호(금강)와 더불어 조류 연구를 가장 많이 시도한 대상 중 하나였다. 보 pool을 담수하기 전에는 중·하류 또는 하구호(서낙동강 포함) 구간에서 수질·퇴적층의 부영양화 관리와 오염도 분석(Choi and Park, 1986; Yang *et al.*, 1990; Kwon, 1991; Lee *et al.*, 1993, 1994; Cho and Shin, 1995a, b, 1997, 1998a; Heo *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 1996, 2002, 2005; Shin *et al.*, 1996, 2000, 2002, 2003; Shin, 1998; Park *et al.*, 1999, 2002; Shin and Cho, 1999; Jung and Cho, 2003; Seo *et al.*, 2003; Jeon and Cho, 2004; Hwang *et al.*, 2006; Kwon *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2011, 2012; Kang *et al.*, 2011; Baek, 2013; Ahn *et al.*, 2016), 담수적조 원인생물(*Aulacoseira*, *Cyclotella*, *Stephanodiscus*)의 형태학적 분류(Cho, 1995, 1996, 1999), 조류 군집(개체군) 분포(Cho, 1991; Kim and Lee, 1991; Cho *et al.*, 1993, 1998; Seo and Chung, 1994; Cho and Shin, 1995b, 1998a, 1999; Shin and Cho, 1997; Shin, 1998; Moon *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2002; Kim, 2004; NRWMC, 2007; Hur *et al.*, 2013; Son, 2013; Hong *et al.*, 2016), 생리·생태(Cho and Shin, 1995a, b, 1996, 1998a; Song *et al.*, 1995; Lim *et al.*, 1997; Shin, 1998; Ha *et al.*, 1999; Shin and Cho, 1999; Choi *et al.*, 2002, 2007; Yang *et al.*, 2003, 2004; Son *et al.*, 2005; Hwang *et al.*, 2006, 2007; Park *et al.*, 2011; Joung *et al.*, 2013) 및 독소·이취물질(Kim *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013)에 대한 다각적인 선행 연구가 있었다. 1986년부터 2012년까지 낙동강에서 수행된 부영양화와 조류 연구는 상·중류보다 하류지역의 연구가 절대적인 우위를 차지하였다. 이 중에서 중·하류와 하구의 녹조현상과 담수적조를 월(계절) 조사 또는 일 모니터링 결과들로부터 특정 구간과 단일 지역의 만성적 조류 대발생에 대한 오염 전개 특성 및 경감 방안이 구체적으로 언급되기도 하였다(Cho and Shin, 1997, 1998a; Shin and Cho, 1997, 1999b).

신규 보를 동시에 가동한 2012년 9월부터 5년이 경과되는 시점인 현재까지 선행연구는 물리·화학 및 통계학적 수질과 퇴적층(용출)의 특성분석(Kim and Kim, 2013; Im

et al., 2014; Lee *et al.*, 2014; Gwak and Kim, 2015; Kim *et al.*, 2015a, b; Lee and Kim, 2015; Lim *et al.*, 2015; Na *et al.*, 2015a, b; NRWMC, 2015; Kim, 2016; NIER, 2016; Park *et al.*, 2016; Choi *et al.*, 2017a; Jung and Kim, 2017), 조류 군집 분포, 발생(모델링 포함), 천이 양상(Choi *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2014a, b, 2015; Na *et al.*, 2015a; Noh *et al.*, 2015, 2017; Park *et al.*, 2015, 2016; Min *et al.*, 2016; Ryu *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017; Lee and Kim, 2017) 및 독소 · 이취 물질 분포(K-water, 2015; Park *et al.*, 2017) 등이 수행되었다. 이들 연구는 8개 보 중 단일 또는 2~3개 보 구간에 국한되었거나 여전히 하류지역을 대상으로 하였으며, 조류 대발생과 이송 · 확산에 대한 근원적인 조사 분석은 아니었다.

본 연구는 2013년 1월부터 2017년 7월까지 1주 간격으로 제한된 보 구간이 아닌 낙동강의 8개 보의 하류부에서 수질(수온, DO, pH 및 Chlorophyll-a (Chl-a))을 모니터링한 자료와 환경부 공공데이터의 우점조류 현황 자료를 통해 그 특성을 분석하였다. 또한 기상 · 수문자료와 비교 분석하여 낙동강 보에서 매년 만성적으로 전개되고 있는 유해남조 및 담수적조 등의 시공간적 변화 양상을 종합적으로 고찰하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

낙동강(洛東江, Nakdong River)은 한반도의 동남부(N 34°59'41"~N 37°12'52", E 127°29'19"~E 129°18'00")에 위치하며(Fig. 1), 유역면적과 유로연장이 각각 23,384 km², 521.5 km로서 우리나라에서 제2의 국가하천이다(MOLIT, 2012). 유역 평균 표고와 경사는 각각 EL. 291.2 m, 32.3%로서 상류는 가파르고, 중하류는 완만해지는 지형이다(MOLIT, 2012). 낙동강의 발원지는 경북 태백시의 황지연못(최장 발원지는 매봉산(천의봉) 너들샘)이고, 본류 · 지류의 상(안동) · 하류(부산)에 댐과 둑으로 닫힌 상태에 있으며, 다목적 · 용수 댐(저수량)들이 본류(안동댐 1,248.0 × 10⁶ m³, 하굿둑 380.0 × 10⁶ m³)와 주요 지천(임하 595.0 × 10⁶ m³, 성덕 27.9 × 10⁶ m³, 영주 181.1 × 10⁶ m³, 군위 48.7 × 10⁶ m³, 부항 54.3 × 10⁶ m³, 영천 103.2 × 10⁶ m³, 보현 22.1 × 10⁶ m³, 합천 790.0 × 10⁶ m³, 남강 309.2 × 10⁶ m³, 운문 160.3 × 10⁶ m³, 밀양댐 73.6 × 10⁶ m³)에 분산되어 직렬 또는 병렬로 건설되었다(Fig. 1) (MOLIT, 2009). 이 중에서 안동~임하, 합천 및 남강댐(진양호) 저수지의 저수량은 강 유역의 대댐(농업용 댐저수지 제외) 수자원 중 73.7%를

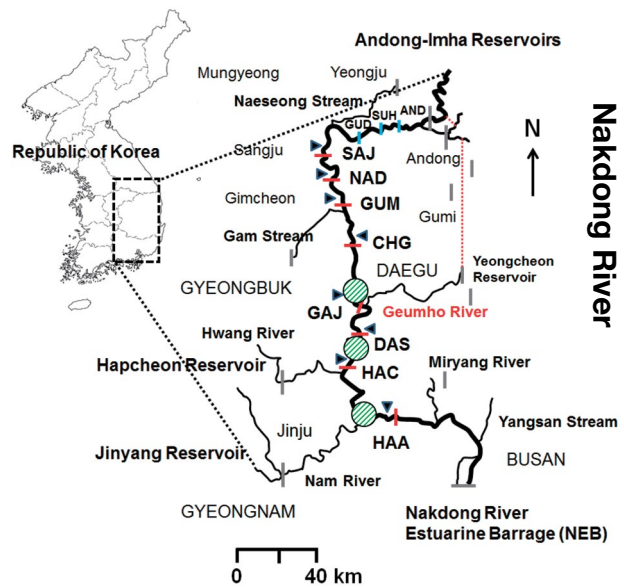


Fig. 1. Map showing the weekly monitoring stations for water quality and algal assemblage in the eight weir (SAJ~HAA) pools of the Nakdong River, Korea from January 2013 to July 2017. AND, Andong Weir Pool; SUH, Suha Weir Pool; GUD, Gudam Weir Pool; SAJ, Sangju Weir Pool; NAD, Nakdan Weir Pool; CHG, Chilgok Weir Pool; GAJ, Gangjeong-Goryeong Weir Pool; DAS, Dalseong Weir Pool; HAC, Hapcheon-Changnyeong Weir Pool; HAA, Changnyeong-Haman Weir Pool. Hatched circle symbols indicate regions vulnerable to amplification of CyanoHABs occurrence. Andong-Imha Reservoirs and Imha-Yeongcheon Reservoirs are connected by the transbasin diversion channel (dotted red lines), respectively.

차지한다. 안동~임하댐(저수지간 연결, 1.9 km, 2015년 완공)과 임하~영천댐(저수지 · 하천간 연결, 51.3 km, 25.9 × 10⁴ m³, 2001년 완공)은 도수로(transbasin diversion tunnel)에 의해 각각 연결되어 있으며, 4MRRP의 일환으로 수자원 이용의 효율성 제고와 낙동강 폐놀유출사고(1991년)의 후속대책으로 수질사고 희석수(비상용수) 확보 및 포항권 용수공급을 위해 각각 추진되었다(MOLIT, 2009).

낙동강의 유황은 강우사상의 크기에 따라 유량이 다목적+용수+농업용 댐+보에 의해 인위적으로 조절되는 특성을 갖고 있으며, 본류의 유량은 댐의 하천 유지수 공급 외에 사계절 동안 댐 하류역에 내린 강우와 하수처리수가 대부분을 차지한다. 특히 강우기를 제외하고는 연중 하수처리수의 비중이 절대적이며(Shin, 1998), 장마기 또는 평소 강우시에도 합류식 하수관로의 월류수(combined sewer overflows, CSOs)에 의한 축적 오염된 고농도의 영양염 펄스가 매우 큰 것으로 평가되고 있다(Shin, 1998). 유역에 댐과 보의 수공 구조물이 많은 것은 그만큼 양적 요구도가

큰 것으로 볼 수 있겠으나, 동시에 다양한 하·폐수와 오염수의 실제 발생량이 많아지는 잠재력을 의미하기도 한다. 유역에 분포하고 있는 하수처리장(>500 m³ d⁻¹)은 총 83개로서 총량은 3,500×10³ m³ d⁻¹ 규모이며, 대구(1,874×10³ m³ d⁻¹), 구미(458×10³ m³ d⁻¹) 및 진주(201×10³ m³ d⁻¹) 지역의 하수가 72.7%(2,533×10³ m³ d⁻¹)를 차지하여 수질 부영양화에 대한 대도시의 기여 영향이 매우 큼을 짐작할 수 있다. 그리고 공단 및 군소 도시지역의 산업·생활·축산계의 하·폐수까지 추가하면 잠재 영향력은 더욱 커지게 된다. 하수처리장은 행정구역상 그 지역 소하천(강)의 최하류 말단에 위치해 있으며(K-water, 2007), 하수처리수는 대부분 지류하천을 통해 방류되나 일부는 본류에 직접 유입되는 형태(예, 구미하수처리장)를 가지기도 한다. 따라서 하천생태계는 연중 이들 하·폐수에 포함된 고농도의 P·N 영양염과 잔류 유기미량(화학)오염물질의 노출에 취약할 수밖에 없었다.

6년전에 낙동강 본류(안동·임하댐~하굿둑) 하도에는 4MRRP에 의해 상류로부터 고정보 3개(안동보(Andong, AND), 수하보(Suha, SUH), 구담보(Gudam, GUD)), 가동·고정보 8개(상주보(Sangju, SAJ), 낙단보(Nakdan, NAD), 구미보(Gumi, GUM), 칠곡보(Chilgok, CHG), 강정고령보(Gangjeong·Goryeong, GAJ), 달성보(Dalseong, DAS), 합천창녕보(Hapcheon·Changnyeong, HAC) 및 창녕함안보(Changnyeong·Haman Weir Pool, HAA)의 총 11개 보가 현재 제 위치에 각각 건설되어 댐(보) 방류수와 지류 유입수가 모여 보 pool을 이루었다가 그 붓물은 유량 증감 변동에 따라 순차적으로 보(가동, 고정), 소수력 발전방류구 및 어도를 통해 하류로 조절 유하되고 있다(Fig. 1, Table 1). 특히 SAJ~HAA구간에 놓인 보의 평균 높이와 저수량은 각각 11.1 m, 64.0×10⁶ m³로서 상류의 고정보(AND, SUH 및 GUD)와 달리 소형 댐에 가까운 형태를 취하고 있다(Table 1)(MOE-KEI, 2009).

SAJ~HAA구간에는 4MRRP 이전에도 생활·농업용수의 취수구를 중심으로 직하류에 돌 또는 고무보(예, 강정취수보(2000년))가 여러 군데 설치되었고, 이것 외에 하천을 횡단하는 고속 또는 지방 국도의 대교(grand bridge)들이 놓이면서 교각의 세굴방지를 위한 인공 돌 보가 축조되었다. 이로 인해 상류부는 얇은 pool을 이루었으며 구간에 따라 오염하천수(예, 금호강)의 유입에 의해 하류부 수질은 악화되는 양상을 띠었다(Shin, 1998). 낙동강 유역에서 대구, 영천 및 경산지역의 배수로에 해당하는 최대 오염원인 금호강은 DAS의 최상류에서 유입되고, 진주지역의 남강은 HAA의 중하류에서 합류된다. 그리고 구미하수처리장 방류수(80×10³ m³ d⁻¹)는 CHG의 중·상류 좌안에서

표층으로 직접 배출되며, 평소 방류 유속에 의해 하류의 개방수역으로 넓게 확산되는 형태를 띠기도 하였다.

2. 강우·수문 자료 분석

2013년 1월부터 2017년 7월까지 강수량과 수문(유입량, 방류량, 수위 및 저수량) 자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)과 국가수자원관리정보시스템(Korea Water Resources Management Information System, WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>)에 각각 업로드된 일 누적 또는 평균값을 이용하였다. 강수량은 보 별 집수역에서 내린 값을 이용하였으며, 기상청 자료는 강우사상 양상을 비교하는 데 참고하였다. 수집한 기초자료는 요인별로 결측 또는 이상치를 검토하였고, 최종적으로 확인된 자료를 이용하였다. 국내 4대강 본류의 16개 보 pool은 소수력 발전(small-scale hydropower)을 기본적으로 채택하여 운영되고 있으며, 발전 낙차(예, penstock level)를 고려한 설계에서 대부분 바닥부의 비교적 맑은 하층수를 방류하고 있다(Table 1). 참고로, 보 pool 내의 상수원수 취수도 조체(藻體) 유입 영향을 최소화하거나 수처리 공정효율을 높이기 위해 이와 유사한 형태(예, 저층 취수)를 띠고 있다.

3. 현장 조사 및 실험 분석

현장 조사는 2013년 1월부터 2017년 7월까지 주 1회씩 고무보트를 이용하여 수행되었고, 수면이 결빙된 시기는 접근성과 안전 문제로 불가피하게 생략하였다. 조사지점은 상주보(SAJ), 낙단보(NAD), 구미보(GUD), 칠곡보(CHG), 강정·고령보(GAJ), 달성보(DAS), 합천·창녕보(HAC) 및 창녕·함안보(HAA)의 보 직상류 0.3~1.0 km로서 총 8개 지점이었다(Fig. 1). 수온, DO 및 pH는 휴대용 YSI-550A와 6600UPG meter(YSI Instrument, USA)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였고, 빈산소(hypoxia) 발생의 유무 또는 정도를 확인하기 위하여 수층별 조사도 병행하였다. 측정기 probe는 사용매뉴얼을 참고하여 매번 조사 직전에 보정하였다. 수질조사 분석을 위한 시료는 Van-Dorn sampler(Wildcore, USA)를 이용하여 각 지점의 표층수(0.3~0.5 m depth)를 채수하였고, 수표면에 조체가 집적되어 얇은 층을 형성한 경우 과대 측정값을 피하기 위해 상하로 가볍게 혼합하여 채수하였다. 현장에서 육안으로 조류 농도가 높을 경우 하천 양안과 보 직상류의 수질 상태도 동시에 관찰 기록하였다. 시료는 얼음 팩을 채운 아이스박스에 담아 보관한 후 차량을 이용하여 12시간 이내에 실험실로 옮겼고, 즉시 전 처리한 후 분석하였다(APHA, 1995). Chl-a 농도는 일정량의 시료를 Whatman GF/F로 여과한 후 90% ethanol

Table 1. General geographic and limnological features of eight man-made weirs constructed along the main stream of the Nakdong River through the four major rivers restoration project in 2012. Data collected from MOLIT (2009), K-water (2012).

Attribute/Weir pools	Upstream					Nakdong River Basin					Downstream	
	Sangju (SAJ)	Nakdan (NAD)	Gumi (GUM)	Chilgok (CHG)	Gangjeong-Goryeong (GAJ)	Dalseong (DAS)	Hapcheon-Changnyeong (HAC)	Changnyeong-Haman (HAA)				
Watershed area (km ²)	7,047	9,221	9,557	11,040	11,667	14,248	15,074	20,697				
Weir pool surface area (10 ⁶ m ²)	5.6	5.3	9.1	13.7	14.1	9.6	10.0	19.9				
Weir pool channel width (m)	430.0	360.0	500.0	500.0	560.0	470.0	340.0	460.0				
Weir type					Fixed (concrete) and movable (steels)							
Elevation (EL.m)	47.0	40.0	32.5	25.5	19.5	14.0	10.5	5.0				
Weir height (m)	11.0	11.5	11.0	11.8	11.5	9.5	11.5	10.7				
Weir length (m)	335.0	286.0	374.3	400.0	953.5	580.0	328.0	549.3				
Weir pool depth (m)	7.4	7.7	7.5	7.9	9.3	8.9	8.9	8.6				
(Minimum~Maximum)			(4.0~11.0)	(4.0~11.8)	(6.0~14.4)	(6.0~15.7)	(6.0~18.2)	(6.0~29.1)				
Maintenance impoundment (10 ⁶ m ³)	27.4	34.7	52.7	75.3	92.3	58.6	70.0	100.9				
Lower limit impoundment (10 ⁶ m ³)	12.4	21.0	2.6	62.0	35.1	6.6	5.9	42.6				
Flood flow (m ³ s ⁻¹)	11,100.0	12,500.0	12,500.0	13,200.0	13,200.0	14,300.0	14,600.0	16,600.0				
	49.6	43.7	35.5	28.4	24.0	21.9	18.6	13.7				
	47.5	40.5	33.0	26.0	20.0	14.5	11.0	5.5				
Water level (EL.m)	47.0	40.0	32.5	25.5	19.5	14.0	10.5	5.0				
	43.6	37.4	22.6	24.5	14.9	6.6	2.3	1.5				
	40.8	33.8	27.3	17.1	12.3	7.6	5.4	0.6				
Watertgate type	SR+TG	SR	SR+TG	SR+TG	RS	RS	LG+TG	RS				
Hydropower generation (kw)	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	2,856.0	5,000.0	5,000.0				
Small hydropower flow (m ³ s ⁻¹)	54.0	52.4	57.0	66.0	73.0	115.0	123.0	176.0				
Fishway flow (m ³ s ⁻¹)	2.00	1.00	2.00	2.00	3.34	2.00	6.0	1.29				
Distance from estuarine barrage (km)	253.5	238.6	220.5	193.2	168.0	147.6	118.6	75.7				
Distance from Haman Weir (km)	177.8	162.9	144.8	117.5	92.3	71.9	42.9	0				
Distance between weir pools (km)	13.0	14.9	18.1	27.3	25.2	20.4	29.0	42.9				
(to Yeong River)												
Construction (Year)	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012				

SR, shell-type roller gate; TG, tainter (or flap) gate; RS, rising-sector gate; LG, lift gate.

용매로 비등 추출하여 665 nm와 750 nm의 흡광도 값으로 계산하였다(Nusch, 1980; APHA, 1995). 우점조류 조성은 환경부 물환경정보시스템에 업로드된 공개자료(www.nier.water.go.kr)의 주간 또는 평균값을 이용하였다.

자료의 주요 요인에 대한 상관분석은 Pearson's Rank 법을 이용하였고, 시공간적 차이 분석을 위해 ANOVA의 사후분석법(host-hoc Tukey's HSD test)으로 수행하였다. 통계처리는 SYSTAT[®] 8.0 프로그램(SPSS, 1998)을 이용하였으며, 유의성은 $p < 0.05$ 로 확인하였다.

결과 및 고찰

1. 강우 · 수문학적 요인의 일 변동

낙동강의 8개 보 구역에서 2013년 1월부터 2017년 7월 까지 관측된 강수량과 수문요인(유량, 수위 및 저수량)의 기술 통계값을 정리한 것은 Table 2와 같고, 방류량과 수위의 일 변동을 나타낸 것은 Fig. 2와 같다. 조사기간 동안 연중 강수일의 범위는 80~179일로서 HAA에서 비교적 많았고, SAJ에서 적었다. 연간 < 10 mm, > 10 mm 및 > 30 mm를 보인 평균 횟수는 각각 144회, 24회, 5회로서 DAS~HAA구간에서 조금 더 빈번하였으나, 통계적으로 유의한 차이는 아니었다($p > 0.05$). > 100 mm는 SAJ에서만 2회 있었다. 무강수일을 제외한 강수량의 범위와 평균값은 각각 0.1~117.0 mm, 5.1 mm이었다(Table 2). 총강수량의 범위와 평균값은 각각 600.5~1,027.1 mm, 854.4 mm이었으며, 2016년(보 pool 평균 940.7 mm)에 많았고, 2015년(672.8 mm)에 적었다(Table 2). 장마 · 폭염기(6~9월) 강우는 2013년 363.8 mm(41.6%), 2014년 528.0 mm(56.8%), 2015년 288.9 mm(42.9%) 및 2016년에 486.2 mm(51.2%)로서 총강수량의 48.1%이었고, 2017년은 7월 초에 SAJ에서 72.8 mm를 기록하여 상 · 하류간에 차이가 컸고, 그 영향은 하류까지 장기간 전달되었다.

방류량은 $0.0 \sim 3,761.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 범위이었고, 평균값은 $139.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 이었다(Fig. 2, Table 2). 상류(SAJ)에서 하류(HAA)로 내려 올 수록 크게 증가하는 양상이었으며(Kang *et al.*, 2011), 장마기를 전 · 후로 하계에 많아지는 계절성이 현저하였다(Fig. 2)($p < 0.01$). 전 구간에서 $> 250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 는 10.7% (봄철 2.2%, 여름철 5.4%, 가을철 2.6% 및 겨울철 0.5%)를 차지하였고, $> 1,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 는 1.4% (여름철 1.1%, 가을철 0.3%)를 기록하였다. $> 1,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 의 평균 빈도(범위)는 2013년 3.6회(1~10회), 2014년 9.3회(2~21회), 2015년 0.9회(0~4회), 2016년 7.7회(3~17회)이었고, 2017년 7월 까지 2.4회(1~4회)이었으며, SAJ에서 7회, HAC에서 32회,

HAA에서 56회 관찰되었다(Fig. 2). 총방류량 중 소수력 발전, 가동보, 월류, 전도수문 및 어도가 차지하는 평균 방류량은 각각 37.4% ($52.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 34.6% ($51.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 14.1% ($18.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 11.4% ($13.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 2.5% ($3.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)로서 홍수기(가동보, 월류, 전도수문 방류)를 제외하고 연중 소수력 발전에 의한 저층방류 비중이 매우 컸다(Table 2). 보 pool에서 유속은 보에 근접할수록 점진적으로 감소하고, 월류(홍수)사상 이후 유량 감소는 체류시간을 증가시키며, 수온 성층화의 잠재력(예, Δ 일 성층화, 기간, 최대 온도차(범위))도 높아지게 된다(Whiterod *et al.*, 2004).

수위의 변동 범위(평균값)는 1.4~3.9 m (2.4 m)이었다(Fig. 2, Table 2). 담수 초기에 해당하는 2013~2014년에 수위가 감소하는 빈도와 기간이 많았거나 길었고, 2015년 이후에는 일부 보(GAJ)를 제외하고 대부분 관리수위(main-tenance water level, MWL)를 유지하는 양상이었다(Fig. 2). 이러한 양상은 유황 변동에서도 파악될 수 있었다. 각 보에서 유입량(+)과 방류량(-)의 차이를 나타낸 것은 Fig. 3과 같다. 방류량은 대부분 유입량에 비례하여 유지되고 있었으나, GUM, CHG, GAJ 및 HAA에서는 상대적으로 방류량이 적은 양상을 보였다(Fig. 3). 이 중에서 GAJ가 가장 현저하였는데, 이것은 다른 보에 비해 취수량($1,354 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$)이 월등히 많았기 때문이었다. 그리고 보마다 MWL을 기준으로 그 변동성은 매우 복잡한 형태를 보였다. GAJ와 같이 장기간 강하(drawdown)되는 경우도 있었는데 겨울철~봄철의 갈수기에 취수량(예, 매곡, 강정 및 고령취수량)이 많은 보 중 하나의 특성으로 볼 수 있었고, GUM, CHG와 HAA에서도 이와 유사한 소폭 경향을 관찰할 수 있었다(Fig. 2).

최근 2017년 2~3월에 DAS~HAA구간에서 수위 강하를 보인 것은 여름철 녹조현상 경감을 위한 보~보 연계 펄스유량의 시험방류 조작에 의한 것이었다(unpublished data). 그리고 2017년 6월 초에 GAJ~HAA구간에서 수위가 감소된 것은 새로운 정부가 출범하면서 녹조현상 대응책인 보 개방과 4MRRP의 사후평가 일환으로 MWL을 인위적으로 조정($-0.25 \sim -1.25$ m)한 것이었다(unpublished data). 또한 수위 강하와 함께 어도 기능은 인위적으로 폐색 또는 단절되었고, 그와 더불어 표층수의 월류 흐름 촉진과 수위조절의 효율성을 제고하기 위해 소수력 발전을 동시에 정지(HAC 제외)시켰다. 수위 감소는 지류하천의 오염부하를 빠르게 전달하고, 퇴적층과 가까워져 그 영향에 민감해질 뿐만 아니라 유해 남조류의 재입(recruitment) 전략을 촉진하는 취약성을 가지고 있다(Yamamoto, 2009; Yang *et al.*, 2016; Shin *et al.*, 2017).

Table 2. Descriptive statistics of rainfall and hydrological factors in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. The values indicate mean, standard deviation, minimum and maximum, respectively.

Factors\Weir pools	Sangju (SA)	Nakdan (NAD)	Gumi (GUM)	Chilgok (CHG)	Gangjeong-Goryeong (GAJ)	Dalseong (DAS)	Hapcheon-Changnyeong (HAC)	Changnyeong-Haman (HAA)
Yearly rainfall (mm)	816.0 ± 144.1 (600.5/901.7)	833.7 ± 137.8 (645.6/945.6)	825.7 ± 150.4 (618.7/951.6)	858.9 ± 141.3 (649.5/954.6)	809.4 ± 107.0 (650.9/885.7)	859.7 ± 110.1 (715.7/974.5)	912.8 ± 128.8 (725.9/1,007.3)	919.1 ± 104.9 (775.3/1,027.1)
Daily rainfall (mm)	5.3 ± 11.5 (0.1/117.0)	5.1 ± 10.2 (0.1/96.5)	5.1 ± 10.3 (0.1/95.7)	5.2 ± 10.6 (0.1/87.4)	4.9 ± 9.9 (0.1/85.3)	5.0 ± 9.9 (0.1/92.6)	5.3 ± 10.5 (0.1/92.2)	5.2 ± 10.0 (0.1/81.9)
Inflow discharge (m ³ s ⁻¹)	79.5 ± 132.5 (5.0/2,060.5)	100.3 ± 170.1 (6.0/2,564.2)	102.6 ± 183.3 (0.0/2,627.0)	116.1 ± 215.7 (4.8/3,318.0)	129.6 ± 224.6 (0.0/3,041.0)	147.3 ± 244.0 (0.0/3,006.0)	177.0 ± 286.4 (0.0/3,003.9)	273.8 ± 363.3 (16.0/3,695.8)
Outflow discharge (m ³ s ⁻¹)	79.4 ± 133.2 (2.0/2,089.0)	100.1 ± 170.8 (4.4/2,597.5)	101.5 ± 183.6 (0.0/2,663.0)	115.2 ± 217.7 (2.0/3,307.8)	124.1 ± 225.1 (3.0/3,118.0)	146.3 ± 244.2 (3.0/3,050.8)	176.2 ± 287.2 (4.3/3,010.8)	273.5 ± 364.6 (13.9/3,761.0)
Small-scale hydropower (m ³ s ⁻¹)	35.7 ± 15.1 (0.0/53.9)	35.5 ± 15.6 (0.0/57.3)	35.2 ± 15.4 (0.0/56.9)	40.6 ± 19.3 (0.0/64.8)	34.4 ± 23.6 (0.0/73.0)	57.1 ± 31.5 (0.0/105.0)	70.2 ± 33.7 (0.0/137.2)	113.1 ± 45.5 (0.0/205.3)
Movable gate (m ³ s ⁻¹)	15.9 ± 111.9 (0.0/1,983.5)	34.5 ± 163.2 (0.0/2,560.3)	28.9 ± 172.2 (0.0/2,637.2)	28.4 ± 177.8 (0.0/3,136.4)	63.0 ± 212.5 (0.0/3,101.8)	54.4 ± 221.2 (0.0/2,722.9)	52.8 ± 237.6 (0.0/2,640.9)	137.6 ± 325.0 (0.0/2,757.5)
Overflow (m ³ s ⁻¹)	14.6 ± 19.8 (0.0/114.5)	12.8 ± 17.8 (0.0/143.4)	16.7 ± 20.9 (0.0/145.9)	9.3 ± 14.3 (0.0/84.6)	23.1 ± 40.0 (0.0/325.1)	31.0 ± 46.6 (0.0/457.9)	16.4 ± 24.0 (0.0/201.6)	21.3 ± 59.5 (0.0/1,106.9)
Tainter (flap)-gate or fixed weir (m ³ s ⁻¹)	10.9 ± 29.6 (0.0/199.5)	10.0 ± 13.9 (0.0/43.4)	19.0 ± 28.9 (0.0/266.6)	34.9 ± 61.4 (0.0/445.4)	-	-	32.5 ± 59.4 (0.0/271.7)	-
Fishway (m ³ s ⁻¹)	2.5 ± 0.1 (2.3/2.5)	6.9 ± 1.3 (2.6/11.4)	0.5 ± 0.0 (0.0/0.5)	2.0 ± 0.1 (1.7/2.0)	3.2 ± 0.6 (0.0/3.3)	2.9 ± 0.6 (0.0/3.0)	4.8 ± 1.0 (0.0/5.0)	1.3 ± 0.1 (0.8/1.3)
Flow difference (m ³ s ⁻¹)	0.1 ± 6.7 (-83.6/70.5)	0.1 ± 6.7 (-83.6/70.5)	1.1 ± 10.5 (-135.0/102.7)	0.9 ± 15.1 (-179.0/287.7)	5.4 ± 25.3 (-123.9/361.0)	1.0 ± 14.4 (-104.0/126.8)	0.8 ± 17.7 (-156.6/344.4)	0.1 ± 26.3 (-274.2/205.9)
Water level (EL.m)	47.1 ± 0.2 (44.9/47.4)	40.1 ± 0.1 (39.3/40.5)	32.6 ± 0.1 (31.6/33.0)	25.5 ± 0.2 (21.8/25.9)	19.3 ± 0.4 (17.8/19.9)	14.0 ± 0.4 (10.8/14.7)	10.5 ± 0.3 (9.2/11.2)	4.9 ± 0.3 (4.2/6.3)
Penstock level (EL.m)	40.1 ± 0.2 (44.9/47.5)	32.5 ± 0.2 (39.3/40.5)	25.6 ± 0.3 (25.0/29.0)	19.3 ± 0.4 (17.8/20.8)	14.0 ± 0.4 (10.8/16.4)	10.5 ± 0.3 (9.2/13.8)	5.0 ± 0.5 (4.2/10.9)	0.8 ± 0.4 (0.0/5.1)
Impoundment (10 ⁴ m ³)	2,757.8 ± 99.4 (1,764.0/2,916.0)	3,494.0 ± 74.8 (3,069.0/3,696.0)	5,304.9 ± 96.0 (4,609.0/5,616.0)	7,477.1 ± 257.1 (6,544.0/7,923.0)	8,764.9 ± 662.4 (6,552.0/9,535.0)	5,861.7 ± 337.3 (2,927.0/6,524.0)	6,950.5 ± 309.2 (5,472.0/7,674.0)	9,807.3 ± 496.3 (8,338.0/11,855.0)
Impound rate (%)	100.6 ± 3.7 (64.1/108.0)	100.8 ± 2.2 (88.5/106.9)	100.6 ± 1.7 (86.3/106.5)	99.3 ± 3.4 (90.5/106.4)	94.9 ± 7.2 (71.0/103.3)	100.0 ± 6.3 (50.0/116.1)	99.4 ± 4.4 (78.2/113.5)	97.2 ± 5.0 (82.6/116.7)

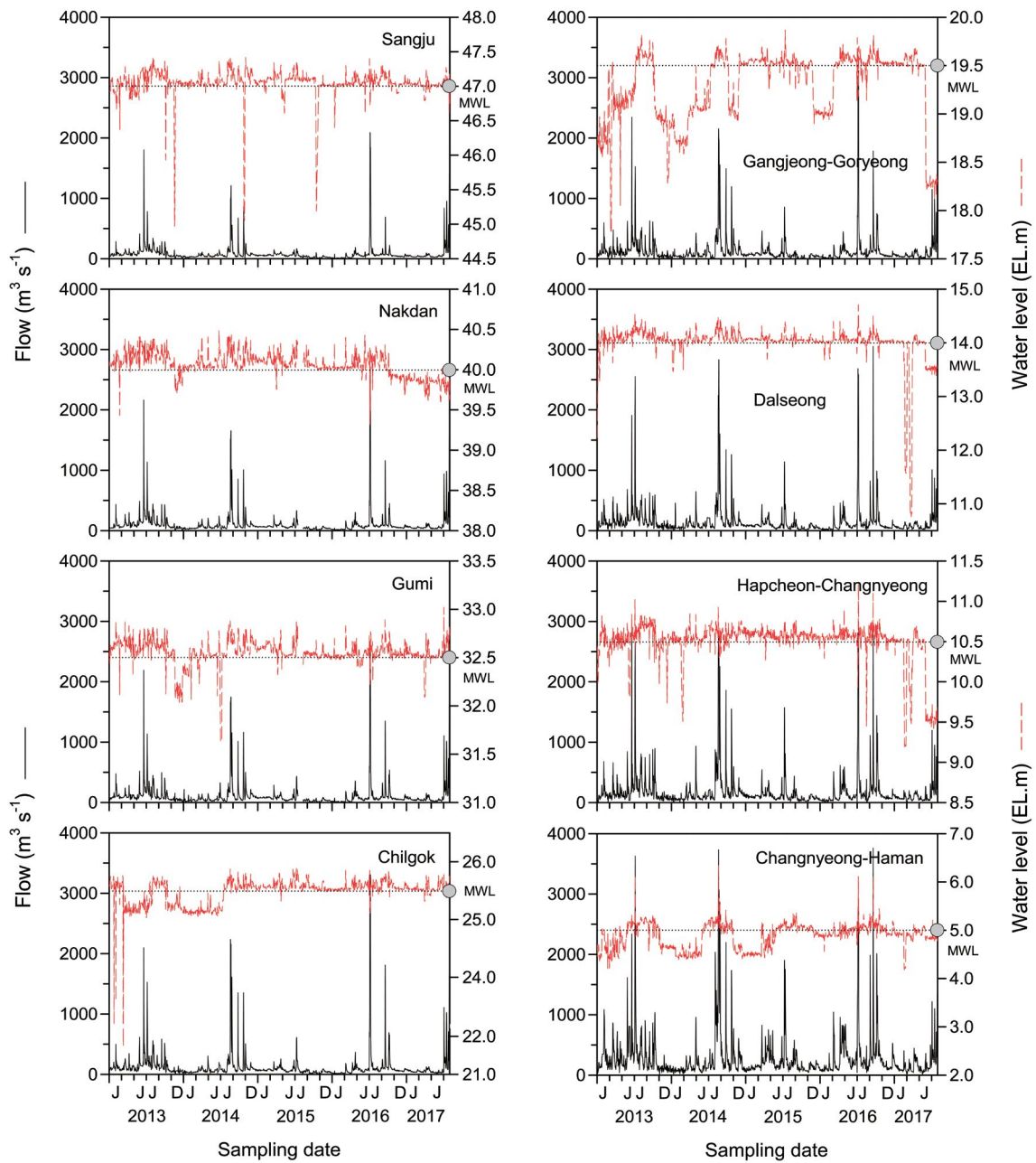


Fig. 2. Daily fluctuations of outflow discharge and water level in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. Horizontal lines on the water level indicate normal maintenance state in each weir, respectively. See Fig. 1 and site description for names on each weir.

2. 수온, DO 및 pH의 시공간적 변동성

SAJ~HAA구간에서 수온의 범위와 평균값은 각각 0.7~34.3°C, 17.8°C이었으며, 여름철에 높고 겨울철에 낮은 계절성이 뚜렷하였다(Table 2). 수온의 최고 및 최저값은 시기적으로 각각 1~2월과 8월이 해당하였으며, 1~2월에 SAJ~

CHG구간에서 수표면이 결빙되는 시기도 다수 관찰되었다. 연중 수온이 <10°C, >25°C 및 >30°C인 기간(연도별)은 각각 2013년에 22.7%, 41.1%, 13.4%, 2014년에 23.2%, 20.0%, 0.0%, 2015년에 18.6%, 18.0%, 1.0%, 2016년에 27.3%, 20.8%, 3.8%이었고, 2017년은 7월까지 31.6%, 20.5%, 0.0%이었다. 봄철~가을철에 증감 패턴이 다른 시기

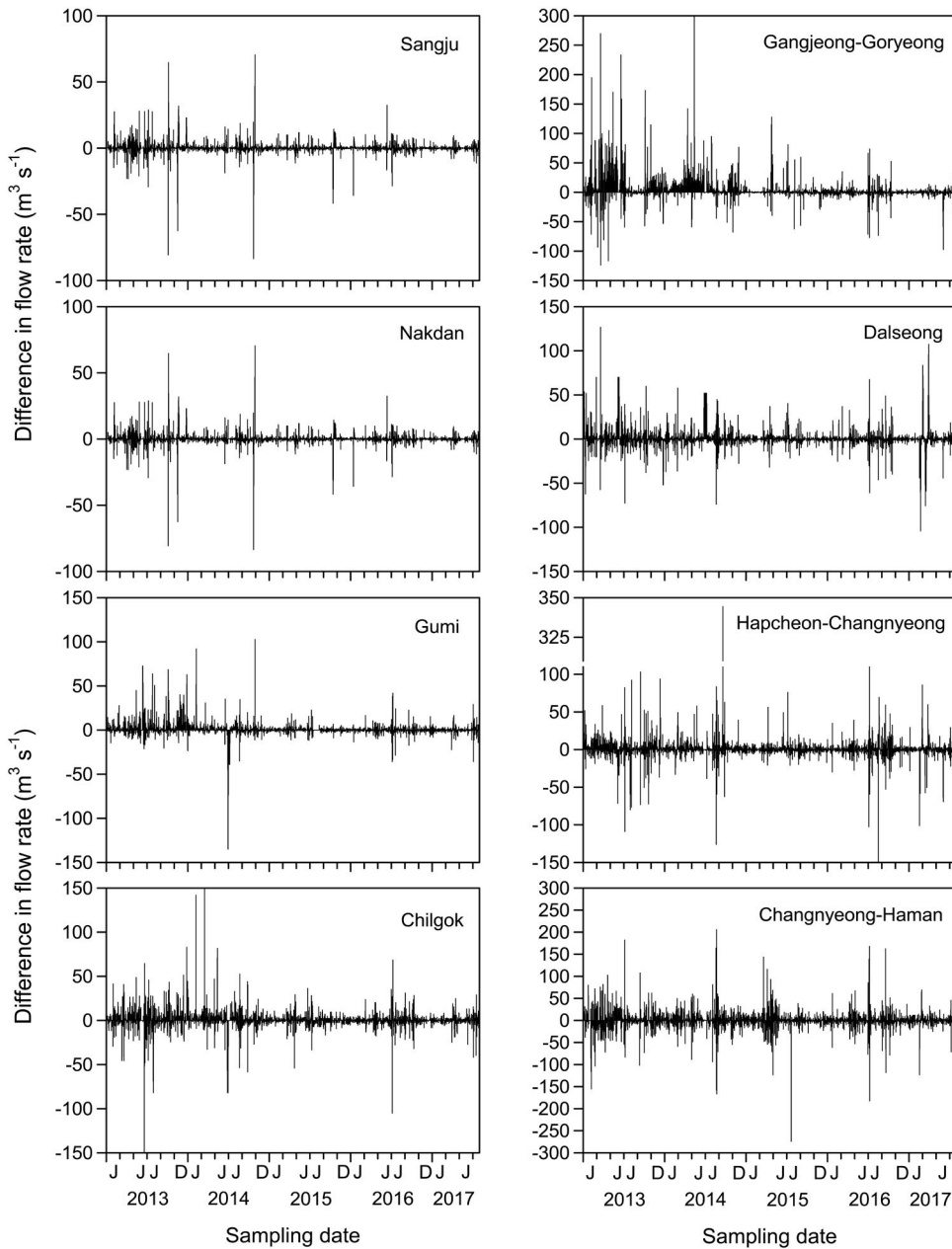


Fig. 3. Daily fluctuations of difference in flow rate (inflow minus outflow) in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. Up (plus) and down (minus) bars are relative increase values, respectively. See Fig. 1 and site description for names on each weir.

에 비해 불규칙하였는데 이것은 강우 빈도와 유황 변동에 의한 기상·수문학적 영향이 지배적이었다(Hwang *et al.*, 2016, 2017; Shin *et al.*, 2016, 2017). 강우기에 대체로 수온이 하강하는 일시적 특성을 보였으며(Shin *et al.*, 2016), 그 기간이 길어질 수록 감소 폭은 커졌다.

보 구간별 표층 DO의 범위(평균값)는 SAJ~GUM, HAA와 CHG~HAC구간에서 각각 5.0~17.0 mg O₂ L⁻¹(10.6 mg

O₂ L⁻¹), 2.9~17.4 mg O₂ L⁻¹(10.3 mg O₂ L⁻¹)이었다(Fig. 4). 연중 증감 양상은 수온과 상반되는 구조($r = -0.800, p < 0.01$)로서 매우 불규칙하였고, 변동 폭은 보 구간에 따라 다소 상이하여($p < 0.05$) 상류에서 작고 중·하류로 갈수록 커지는 경향이였다(Fig. 4). 그리고 연중 DO 농도의 변동 폭이 컸던 구간은 CHG~HAC이었고, 그 중 GAJ에서 가장 현저하였다(Fig. 4). 이것은 조류 광합성과 빈산소에 의해

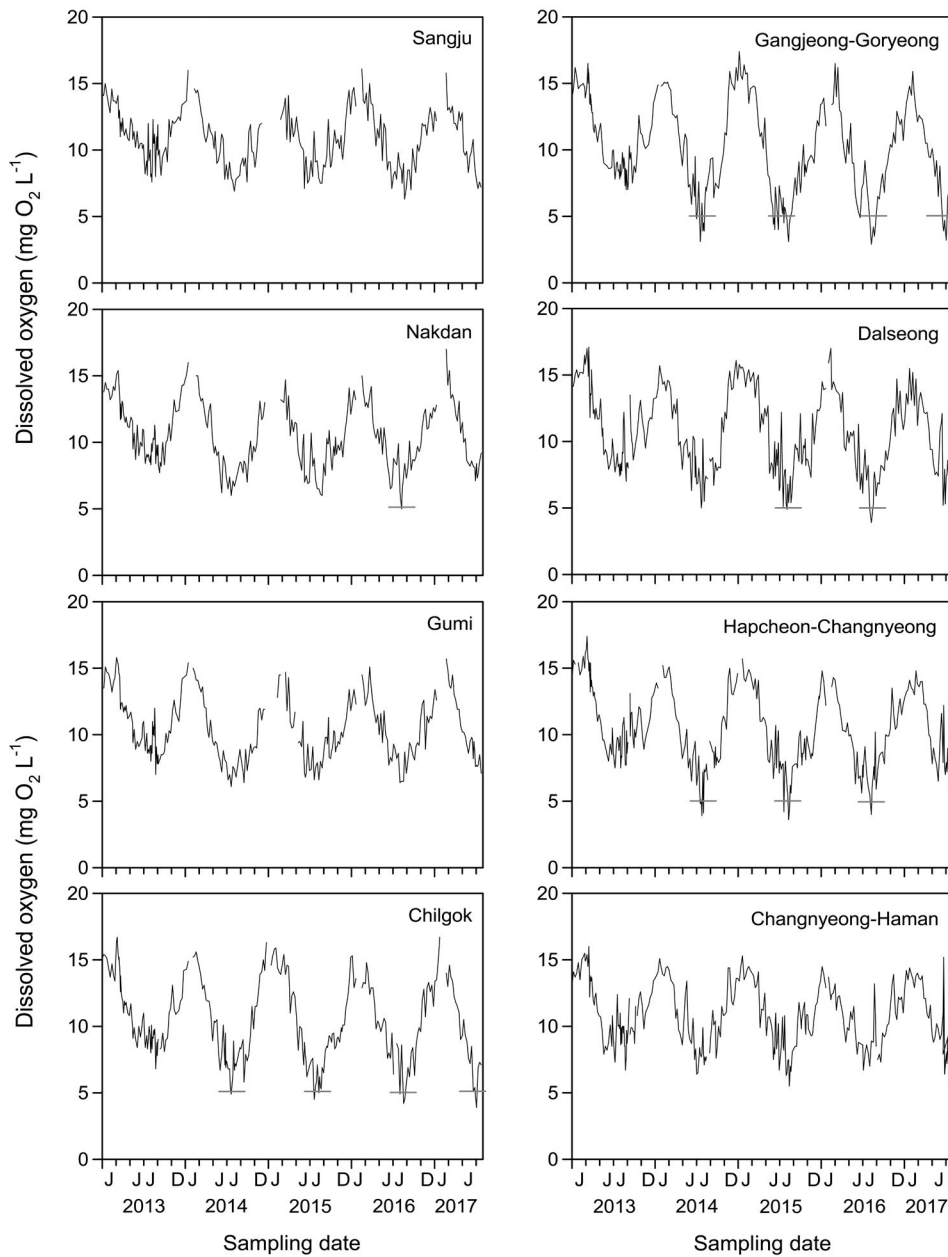


Fig. 4. Spatial and temporal fluctuations of surface-water dissolved oxygen concentration in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. Underlined bars on the Nakdan, Chilgok, Gangjeong, Dalseong and Hapcheon-Changnyeong Weir Pools indicate early hypoxia level ($<5.0 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, OSTP, 2016). See Fig. 1 and site description for names on each weir.

야기되는 증감 차이에 기인하는 변동성 때문이었다(Wetzel, 2001; Jung and Cho, 2003). 또한 주요 보에 따라 순간적으로 DO가 급격하게 증가하는 경향이 다수 관찰되었는데, 이것은 유량의 변동이 클 때 주로 나타났으며(Hwang *et al.*, 2016), 상·하류의 수질 연계성으로 볼 때 하류에 전이된 형태로 사료되었다.

조사기간 동안 6~10월에 NAD, CHG~HAC구간의 표

층에서 $<5.0 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ (Wetzel, 2001; OSTP, 2016)인 빈 산소 시기가 다수 관찰되었는데(Im *et al.*, 2014; NRWMC, 2015; Shin and Hwang, 2018), GAJ에서 2014~2017년에 빈번하였고 기간(최장 1개월)도 길었다(Fig. 4). 담수 초기인 2013년에는 전 구간에서 형성되지 않았고, 2014년부터 시작하여 2017년으로 이행하면서 다소 강해지는 양상을 띠었다($p < 0.05$) (NRWMC, 2015). 2014년 7~9월과 2015년

6~10월에 CHG~HAC구간에서 3.1~5.0 mg O₂ L⁻¹, 2016년 8~10월에 NAD~HAC구간에서 2.9~5.0 mg O₂ L⁻¹이었고, 2017년 6월 하순~7월 초하순에 GAJ에서 3.2~4.7 mg O₂ L⁻¹ 범위로 악화되었다. 수층에서 빈산소가 발생하는 것은 저유량, 저수위 및 고온 폭염과 관련성이 있었고(OSTP, 2016), 고유량에 의해 일시적으로 소멸되기도 하였으나 곧바로 재발하기도 하였다(Fig. 2 참고)(Hwang *et al.*, 2017). 2014년 7월 초순에 GAJ에서 표층 수온이 29.3°C일 때 수심 6~10 m(17.9~26.9°C)에서 거의 무산소 상태(<0.1 mg O₂ L⁻¹)에 가까웠으며, 2015년 8월에 표층에서 <5 mg O₂ L⁻¹일 때 수심 <2 m 하층에서도 동일한 경향을 보여 연직 DO 결핍현상이 급격하게 강화됨을 알 수 있었다.

수층 pH의 범위와 평균값은 각각 6.3~9.7, 8.2이었고(Table 3), 기초수질 중 변동성이 가장 불규칙하였다. 계절적으로는 여름철과 겨울철에 높았고 봄철과 가을철에 낮았으며, 증감 형태는 DO보다 시간적으로 다소 후행하는 분포패턴을 나타냈다. 이것은 수온, DO 이외에 녹조현상과 담수적조가 번성하는 동하계의 시기와 관련성이 있었다(Cho and Shin, 1997, 1998a; Shin, 1998). 2016년 7월 초순에 GAJ와 DAS에서 <7.0(약산성)인 시기가 관찰되었는데, 일시적인 현상으로서 연중 장마 강우가 가장 많았던 시기(55.4~112.1 mm, 15회)의 직후에 해당하였다.

3. Chlorophyll-a 농도 분포 및 종적 변동성

2013년 1월부터 2017년 7월까지 보 별 Chl-a 농도 분포 및 변동을 나타낸 것은 Fig. 5와 같다. 전 구간에서 Chl-a 농도의 범위와 평균값은 각각 0.4~193.6 mg m⁻³, 22.0 mg m⁻³이었다(Table 3). 연도별 평균값(범위)은 2013년에 26.9 mg m⁻³(0.4~132.8 mg m⁻³)이었고, 2014년, 2015년 및 2016년에 각각 22.9 mg m⁻³(1.1~98.2 mg m⁻³), 19.0 mg m⁻³(1.0~173.9 mg m⁻³), 19.6 mg m⁻³(1.1~193.6 mg m⁻³)이었으며, 2017년은 7월까지 17.9 mg m⁻³(1.0~87.5 mg m⁻³)이었다. 2013년은 전 구간에서 높은 농도를 유지하였고, 2014~2017년은 DAS~HAA구간에서 비교적 고농도(27.2 mg m⁻³, 최대 193.6 mg m⁻³)를 나타냈다. 계절별로 보면, 여름철~가을철에 SAJ~GAJ와 DAS~HAA구간에서 각각 평균값이 19.3 mg m⁻³(1.0~96.9 mg m⁻³), 30.8 mg m⁻³(1.3~193.6 mg m⁻³)로서 봄철(15.1 mg m⁻³(0.4~98.2 mg m⁻³))과 겨울철(26.4 mg m⁻³(1.0~132.8 mg m⁻³))에 비해 각각 21.8%, 14.3% 더 높았다. 또한, SAJ~GAJ와 DAS~HAA구간에서 평균 농도(범위)는 각각 17.6 mg m⁻³(0.4~98.2 mg m⁻³), 29.6 mg m⁻³(1.0~193.6 mg m⁻³)이었고, 상류부보다 하류부에서 다소 증가(1.7배)하는 경향이 현저하였다

Table 3. Descriptive statistics of basic water quality and algal biological factors in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. The values indicate mean, standard deviation, minimum and maximum, respectively.

Factors\Weir pools	Sangju (SAJ)	Nakdan (NAD)	Gumi (GUM)	Chilgok (CHG)	Gangyeong-Goryeong (GAJ)	Dalseong (DAS)	Hapcheon-Changyeong (HAC)	Changnyeong-Haman (HAA)
Temperature (°C)	17.4±8.7 (0.7/32.7)	17.7±8.6 (0.9/33.0)	17.9±8.7 (1.4/33.7)	17.6±8.9 (0.7/34.0)	16.9±8.7 (1.4/31.9)	17.9±8.7 (2.2/33.0)	18.5±8.5 (1.7/33.2)	18.4±8.8 (2.4/34.3)
DO (mg O ₂ L ⁻¹)	10.8±2.1 (6.3/16.1)	10.4±2.4 (5.0/17.0)	10.4±2.3 (6.1/15.8)	10.4±3.0 (3.9/16.7)	9.9±3.5 (2.9/17.4)	10.5±3.1 (3.9/17.1)	10.2±2.9 (3.6/17.4)	10.7±2.4 (5.5/16.0)
pH	8.2±0.5 (6.3/9.5)	8.2±0.5 (6.7/9.7)	8.3±0.5 (6.8/9.7)	8.2±0.4 (7.1/9.4)	8.1±0.5 (6.7/9.2)	8.1±0.5 (6.7/9.3)	8.2±0.5 (7.0/9.4)	8.2±0.5 (7.2/9.6)
Chlorophyll-a (mg m ⁻³)	14.1±11.2 (0.4/94.1)	18.0±14.9 (0.7/96.9)	17.0±14.3 (1.1/93.5)	21.5±16.1 (1.4/87.2)	17.2±16.8 (1.0/98.2)	30.6±22.7 (1.8/173.9)	28.6±23.0 (1.0/193.6)	29.5±19.8 (1.3/123.3)
Dominant algae assemblage (n)	25	25	29	26	23	26	27	19
- Bacillariophyceae (%)	45.0	43.2	42.3	48.5	41.8	45.0	37.9	45.4
- Cyanophyceae (%)	29.0	30.5	30.4	34.1	41.1	41.7	46.1	45.8
- Chlorophyceae (%)	4.6	4.5	4.9	6.8	4.3	5.0	6.0	1.0
- Flagellates (%)	21.4	21.8	22.4	10.6	12.9	8.3	10.0	7.8

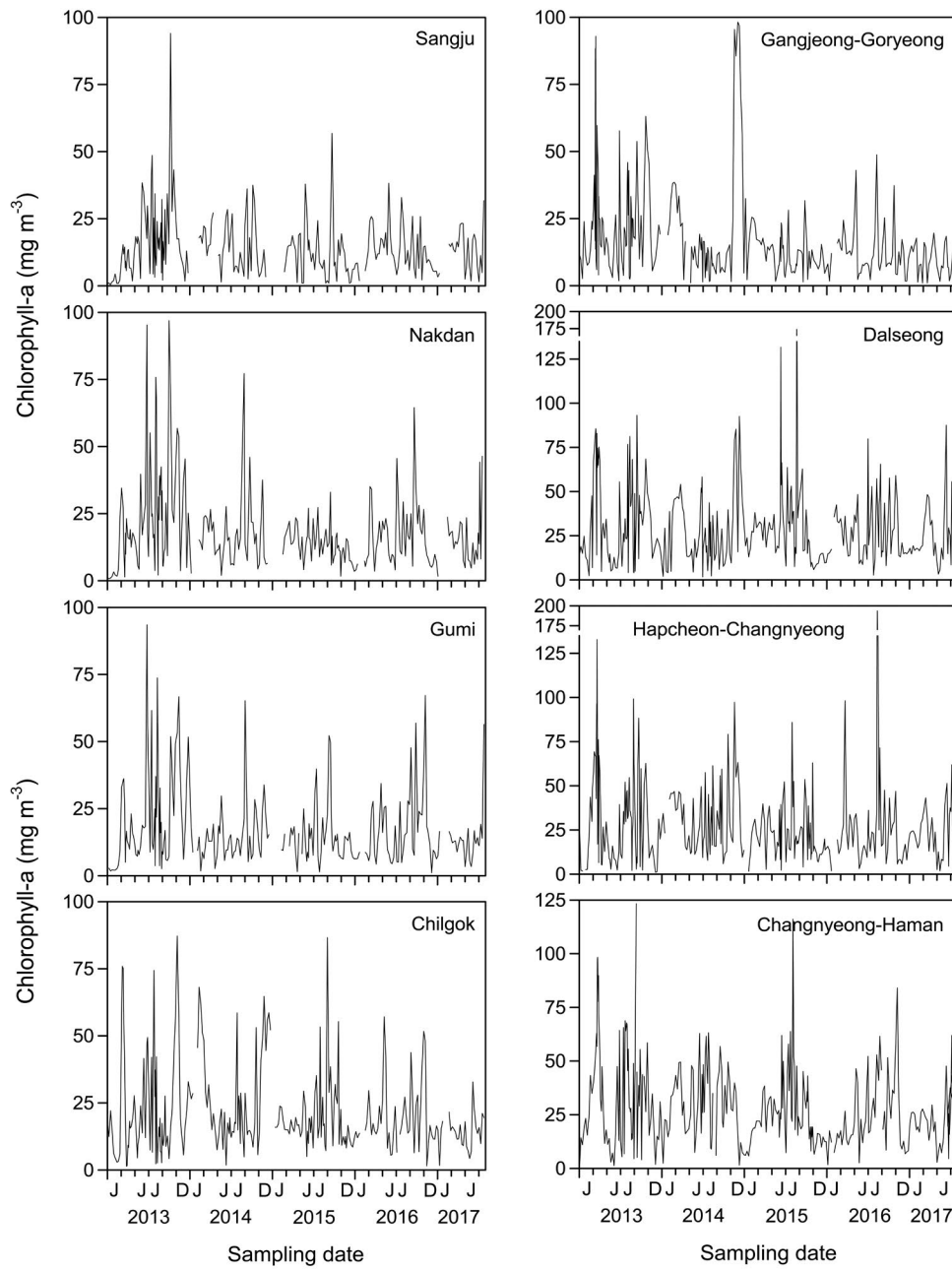


Fig. 5. Spatial and temporal fluctuations of chlorophyll-a concentration in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. See Fig. 1 and site description for names on each weir.

($p < 0.05$) (Table 3). Chl-a 농도가 > 50 또는 $> 100 \text{ mg m}^{-3}$ 수준으로 증가한 것은 저유량(예, $\text{DAS} \sim \text{HAA} < 500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 저수위 시기에 해당하였으며, 유량이 빈약한 해(예, 2015년)와 수위가 MWL보다 훨씬 낮았거나 다시 회복(상승)된 직후에 주로 관찰되었다.

OECD (1982)에 의해 제시되고 있는 부영양 기준 ($> 25 \text{ mg m}^{-3}$)을 적용할 때, 조사기간 동안 그 값을 초과한 빈도

(연평균 횟수)는 SAJ에서 11.9% (28회), NAD 16.7% (41회), GUM 16.5% (41회), CHG 18.0% (48회), GAJ 24.3% (68회), DAS 30.9% (94회) 및 HAC에서 36.4% (111회)이었고, HAA는 38.9% (121회)를 차지하였으며, 특히 GAJ, DAS~HAA 구간에서 $> 20 \sim 30\%$ 이었고, 하루로 갈수록 그 유지기간도 장기화되었다(Fig. 5). 그리고 $> 75 \text{ mg m}^{-3}$ 의 과영양 수준을 초과한 것은 SAJ~GUM, CHG~GAJ 및 DAS~HAA구

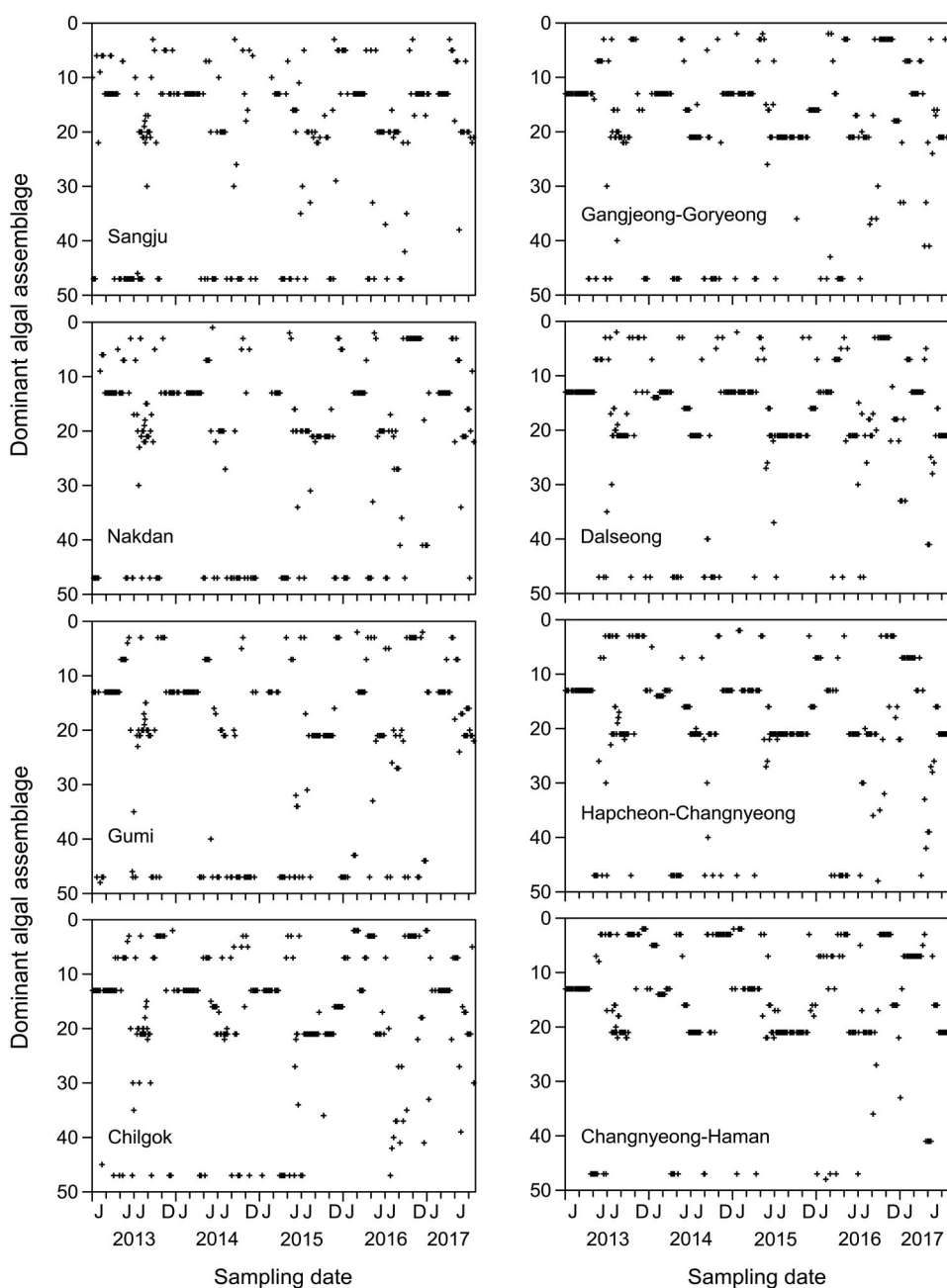


Fig. 6. Weekly distribution patterns of major dominant algal assemblage observed in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. Data obtained from the Water Environmental Information System, Ministry of Environment, Republic of Korea. For reference, a horizontal line means one algal population, and each of which is as follows: Bacillariophyceae (1-14), 1. *Acanthoceras* (ACAN); 2. *Asterionella* (ASTE); 3. *Aulacoseira* (AULA); 4. *Cyclostephanos* (CYST); 5. *Cyclotella* (CYCL); 6. *Cymbella* (CYMB); 7. *Fragilaria* (FRAG); 8. *Melosira* (MELO); 9. *Navicula* (NAVI); 10. *Nitzschia* (NITZ); 11. *Rhizosolenia* (RHIZ); 12. *Skeletonema* (SKEL); 13. *Stephanodiscus* (STEP); 14. *Synedra* (SYNE); Cyanophyceae (15-22), 15. *Anabaena* (ANAB); 16. *Aphanizomenon* (APHA); 17. *Aphanocapsa* (APCA); 18. *Geotlerinema* (GEIT); 19. *Limnothrix* (LIMN); 20. *Merismopedium* (MERI); 21. *Microcystis* (MICR); 22. *Pseudoanabaena* (PSAN); Chlorophyceae (23-40), 23. *Actinastrum* (ACTI); 24. *Ankyra* (ANKY); 25. *Chlamydomonas* (CHLA); 26. *Coelastrum* (COEL); 27. *Coenochloris* (COEN); 28. *Crucigenia* (CRUC); 29. *Dictyosphaerium* (DICT); 30. *Eudorina* (EUDO); 31. *Eutetramorus* (EUTE); 32. *Micractinium* (MICA); 33. *Monoraphidium* (MONO); 34. *Mougeotia* (MOUG); 35. *Pandorina* (PAND); 36. *Pediastrum* (PEDI); 37. *Scenedesmus* (SCEN); 38. *Schroederia* (SCHR); 39. *Sphaerocystis* (SPHA); 40. *Volvox* (VOLV); Fragellates (41-48), 41. *Chroomonas* (CHRO); 42. *Cryptomonas* (CRYP); 43. *Dinobryon* (DINO); 44. *Lagynion* (LAGY); 45. *Mallomonas* (MALL); 46. *Peridinium* (PERI); 47. *Rhodomonas* (RHOD); 48. *Synura* (SYNU). See Fig. 1 and site description for names on each weir.

간에서 각각 평균 2회, 5회, 12회를 기록하였다(Fig. 5). 또한 DAS, HAC 및 HAA에서 $>100 \text{ mg m}^{-3}$ 인 경우가 각각 2~3회씩 관찰되었는데 그 시기는 달랐으나 상·하류의 보 사이에 다소 높은 농도를 유지하는 연계성도 찾아 볼 수 있었다(Fig. 5).

4. 주요 우점조류의 시공간적 분포 및 천이 특성

8개 보에서 55개월 동안 매주 관찰된 우점조류의 분류군 조성은 총 48속이었다(Fig. 6). 이 중에서 규조 14속, 남조 8속, 녹조 18속 및 편모조(은편모, 착편모 및 와편모 등)가 8속으로 각각 구성되었고(Table 3), 기존 선행연구에서 보고된 분류군들과 상이하지 않았다(Cho, 1991; Cho *et al.*, 1993, 1998; Cho and Shin, 1995b, 1998a, 1999; Shin and Cho, 1997; Shin, 1998; Moon *et al.*, 2001; NRWMC, 2007; Yu *et al.*, 2014a, b, 2015). 이들 속은 군체(colony), 사상체(trichom) 및 단·다세포의 편모체를 가진 운동성 또는 비운동성 조류가 대부분을 차지하였다. 각 보에서 $>10\%$ 출현빈도를 보인 것은 규조 *Aulacoseira*, *Fragilaria*, *Stephanodiscus*, 남조 *Merismopedia*, *Microcystis* 및 은편모조 *Rhodomonas* 개체군이었다. 전체 보 구간에서 시공간적으로 빈번하게 관찰된 최우점 속은 규조 *Stephanodiscus* (STEP, No. 13 in Fig. 6), 남조 *Microcystis* (MICR, No. 21) 및 은편모조 *Rhodomonas* (RHOD, No. 47)가 해당하였다(Fig. 6). STEP와 MICR은 외형적 그 크기가 각각 소형과 대형이며, 동계의 저온·저광 및 하계의 고온·고광을 선호하는 분류군으로서 전형적인 부(과)영양 상태의 계절적 오염지표 그룹으로 잘 알려져 있다(Cho, 1995; Cho and Shin, 1995b, 1998a; Shin and Cho, 1997; Cho *et al.*, 1998). 그 외 *Aulacoseira* (AULA, No. 3)와 *Fragilaria* (FRAG, No. 7)는 보 별 출현에서 다소 상이한 면이 있었는데, AULA는 GUM, GAJ 및 HAA에서, FRAG는 CHG에서 각각 우세하였고, DAS~HAC구간에서는 두 개체군이 혼재된 형태가 강하였다(Fig. 6). RHOD는 STEP와 MICR이 소강 상태를 보이는 시기에 우점하는 특성을 보여 광온·기회성 분류군에 해당하였다(Cho *et al.*, 1993). 낙동강의 보 pool에서 RHOD는 상류에서 하류로 갈수록 관찰 빈도가 적었을 뿐만 아니라 2017년으로 갈수록 빈약한 경향을 나타냈다. 또한 이들 3속이 출현하지 않는 틈에 나머지 45속 개체군이 단기 관찰되는 천이 양상을 보였다(Fig. 6).

각 보 별 최우점 및 이취물질 생성원인 분류군의 출현빈도 양상을 요약하여 나타낸 것은 Fig. 7과 같다. 규조 STEP는 SAJ~DAS구간에서 평균 24.9% (23.2~26.5% 범위)를 유지하다가 HAC와 HAA에서 각각 20.6%, 15.9%로 감소

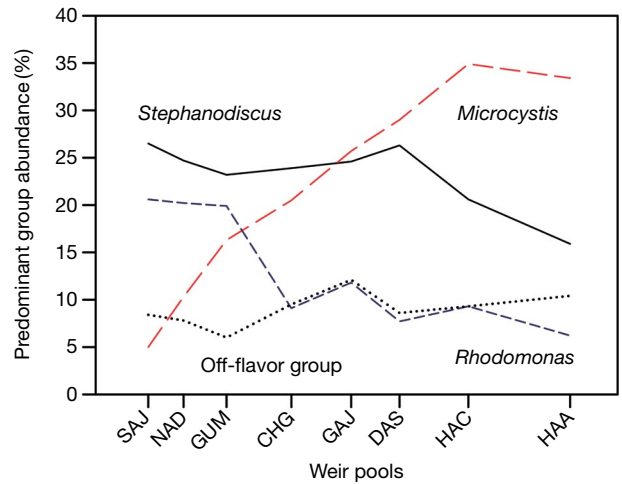


Fig. 7. Relative frequency of pre-dominant algal assemblages and causative off-flavor groups in the eight weir pools of the Nakdong River from January 2013 to July 2017. The causative groups responsible for off-flavor materials are the sum of genus *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Aphanocapsa* and *Pseudonabaena*. See Fig. 1 for abbreviations.

하였다. 은편모조 RHOD는 SAJ~GUM구간에서 20.2% (19.9~20.6%)이었다가 CHG~HAA구간에서 8.8% (6.2~11.8%)로서 급감하였다. 반면에, 남조 MICR은 SAJ에서 5.0%로 시작하여 HAC에서 34.9%로서 지수적인 증가가 있었고, HAA(33.4%)에서 포화 수준을 나타냈다(Fig. 7). MICR은 STEP와 RHOD가 감소하거나 변동이 미약한 구간에서 증가하는 경향이 현저하였다($p < 0.05$). 이취물질 원인 조류군은 다른 분류군에 비해 높은 비중은 아니었지만 연중 관찰되었다(Fig. 7). SAJ~GUM구간에서 상대적으로 적은 상태(7.4%)이었다가 CHG~GAJ구간에서 31.5%로 크게 증가하였으며, DAS(8.6%)에서 조금 감소되었다가 HAC~HAA구간에서 다시 13.1%로 증가하는 반복적인 증감 변동성을 보였다.

적 요

조절하천의 낙동강에서 겪고 있는 부영양화와 조류 대발생(유해남조의 녹조현상 및 담수적조)은 국내외적으로 가장 급속하게 확대되고 있는 수질문제이며, 다양한 집단에서 지대한 관심을 가지게 한 분야 중 하나이다. 본 연구는 2013년 1월부터 2017년 7월까지 낙동강의 8개 보 pools에서 주요 수질 환경요인을 주 간격으로 조사하였고, 우점조류와 상호 관련성을 비교 분석하였다. 연강수량은 2016년(보 평균 940.7 mm)에 많았고, 2015년(672.8 mm)에 적었

다. 장마 · 폭염기(6~9월) 강우는 총강수량의 48.1%이었고, 상 · 하류간에 차이가 컸다. 총방류량 중 소수력발전, 월류 및 어도가 차지하는 비율은 각각 37.4%, 60.1%, 2.5%로서 홍수기를 제외하고 발전방류에 의한 비중이 매우 컸다. 방류량은 대부분 유입량에 비례하였으나, 취수량이 집중되는 보에서 다른 양상도 관찰되었다. 이것은 수위강하, 물 교환율과 연관되었고, 유해남조와 담수적조의 대발생에 심각한 영향을 초래하였다. 수온과 DO 농도의 변화는 기상 · 수문학적 영향이 지배적이었는데, 온도변화 뿐만 아니라 강우의 특성에 따라 변화 양상이 포착되었다. Chl-a의 평균농도(최대값)는 SAJ~GAJ와 DAS~HAA구간에서 각각 17.6 mg m^{-3} (98.2 mg m^{-3}), 29.6 mg m^{-3} (193.6 mg m^{-3})이었고, 하수의 영향이 절대적인 하류부에서 증가하는 경향이 현저하였다. 우점조류의 분류군 조성은 총 48속으로 규조 14속, 남조 8속, 녹조 18속 및 편모조 8속으로 각각 구성되었다. 유해 녹조현상과 담수적조의 주요 원인조류는 각각 남조 *Microcystis*와 규조 *Stephanodiscus* 개체군이였다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반 공공기술개발사업(2018000200001) 및 2018년도 건국대학교 KU학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J.M., I.J. Lee, K.Y. Jung, J. Kim, K. Lee, S. Cheon and S. Lyu. 2016. Characteristics of trend and pattern for water quality monitoring networks data using seasonal-kendall, SOM and RDA on the Mulgeum in Nakdong River. *Journal of Environmental Science International* **25**: 361-372. (in Korean)
- APHA · AWWA · WEF (APHA). 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. American Public Health Association, Washington DC., USA.
- Baek, K.H. 2013. Water quality measures during low flow rate of the lower Nakdong River. *BDI Policy Focus* **232**: 1-12. (in Korean)
- Cha, Y.J., M.P. Shim and S.K. Kim. 2011. The Four Major Rivers Restoration Project. Water in the Green Economy in Practice: Towards Rio+20, UN-Water International Conference, 3-5 October, 2011. Zaragoza, Spain. p. 1-10.
- Cho, K.J. 1991. Spatial and temporal distribution of phytoplanktonic and periphytic diatom assemblages of the Naktong River estuary. *The Korean Journal of Phycology* **6**: 47-53.
- Cho, K.J. 1995. Fine structure of diatom *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis* and *S. parvus* from the Naktong River of Korea. *The Korean Journal of Phycology* **10**: 69-76.
- Cho, K.J. 1996. Fine morphology of some *Cyclotella* species from the freshwater zone of the Naktong River. *Algae* **11**: 9-21.
- Cho, K.J. 1999. Morphology and taxonomy on diatom genus *Aulacoseira* in the Naktong River. *Algae* **14**: 143-153.
- Cho, K.J. and J.K. Shin. 1995a. Distribution and variation of chlorophyll-a from midstream to downstream of the Naktong River. *Korean Journal of Limnology* **28**: 421-426. (in Korean)
- Cho, K.J. and J.K. Shin. 1995b. Persistent blooms of diatoms *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis* and *S. parvus* in the Naktong River. *The Korean Journal of Phycology* **10**: 91-96.
- Cho, K.J. and J.K. Shin. 1996. Bioassay for N · P nutrient demand by freshwater algae cultivation of the Naktong River. *Korean Journal of Limnology* **29**: 263-273. (in Korean)
- Cho, K.J. and J.K. Shin. 1997. Dynamics of inorganic N · P nutrient from midstream to downstream of the Naktong River. *Korean Journal of Limnology* **30**: 85-95. (in Korean)
- Cho, K.J. and J.K. Shin. 1998a. Dynamics of inorganic N · P nutrient and planktonic algae during summer and winter in downstream of the Naktong River. *Korean Journal of Limnology* **31**: 67-75. (in Korean)
- Cho, K.J. and J.K. Shin. 1999. Population dynamics of diatom genus *Aulacoseira* in the Naktong River. *Algae* **14**: 247-253.
- Cho, K.J., I.K. Chung and J.A. Lee. 1993. Seasonal dynamics of phytoplankton community in the Naktong River estuary, Korea. *The Korean Journal of Phycology* **8**: 15-28.
- Cho, K.J., J.K. Shin, S.K. Kwak and O.H. Lee. 1998. Diatom genus *Stephanodiscus* as eutrophication indicator for water quality assessment. *Korean Journal of Limnology* **31**: 204-210. (in Korean)
- Choi, A.R., J.H. Park and J.H. Lee. 2002. Population dynamics and the toxin of *Anabaena* in the lower Naktong River. *Algae* **17**: 95-104. (in Korean)
- Choi, C.M., J.H. Kim, W.I. Kim, J.S. Lee, G.B. Jung, J.T. Lee and S.G. Moon. 2007. Phytoplankton flora and community structure in the lower Nakdong River. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **26**: 159-170. (in Korean)
- Choi, H., Y. Shin, J. Lee, S. Kim, M. Byun, Y. Jin, H. Kong, K. You, S.Y. Noh, J. Lee, H. Park and D. Rhew. 2014. The Characteristics of Algal Blooms Mechanism to Environmental Changes (I). NIER-RP2014-293. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea. 34p. (in Korean)
- Choi, H.G., K.Y. Han and J.H. Park. 2017a. Reproducibility evaluation of stratification using EFDC model in Nakdong River. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*

- 37: 561-573. (in Korean)
- Choi, H.G., K.Y. Han and S.Y. Choi. 2011. A stochastic analysis of the water quality with discharge variation in upper Nakdong River basin. *Journal of Environmental Impact Assessment* **20**: 833-843. (in Korean)
- Choi, K.Y., T.H. Im, J.W. Lee and S.U. Cheon. 2012. Evaluation of water quality characteristics in the Nakdong River using statistical analysis. *Journal of Korea Water Resources Association* **45**: 1157-1168. (in Korean)
- Choi, Y.C. and C.K. Park. 1986. Eutrophication in the downstream of Nakdong River. *Journal of the Korean Fisheries Society* **19**: 339-346. (in Korean)
- Gwak, B.R. and I.K. Kim. 2015. The evaluation of water quality using a multivariate analysis in Changnyeong-Haman weir section. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* **29**: 625-632. (in Korean)
- Ha, K., E.A. Cho, H.W. Kim and G.J. Joo. 1999. *Microcystis* bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: importance of hydrodynamics and nutrient loading. *Marine and Freshwater Research* **50**: 89-94.
- Heo, W.M., B.C. Kim, G.S. Hwang, K.S. Choi and W.K. Park. 1995. The distributions of phosphorus, nitrogen, and chlorophyll a concentration in the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **28**: 175-181. (in Korean)
- Hong, D.G., D.K. Kim, H.W. Kim, Y. Do, H.Y. Lee and G.J. Joo. 2016. Limnological assessment of the meteo-hydrological and physicochemical factors for summer cyanobacterial blooms in a regulated river system. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* **52**: 123-136.
- Hur, M., I. Lee, B.M. Tak, H.J. Lee, J.J. Yu, S.U. Cheon and B.S. Kim. 2013. Temporal shifts in cyanobacterial communities at different sites on the Nakdong River in Korea. *Water Research* **47**: 6973-6982.
- Hwang, D., H. Lee, J. Yoon, S. Heo, T. Im, Y. Kwon, C.K. Shin and H. Kim. 2007. Study on Ecological Characteristic of Algal Species Forming Bloom during Spring-Winter Season in the Nakdong River (II). Nakdong River Water Environment Laboratory, National Institute of Environmental Research. Seoul, Korea. 144p. (in Korean)
- Hwang, D.J., H.J. Lee, J.K. Seo, C.K. Shin, Y.S. Kim and Y.H. Kwon. 2006. Study on Ecological Characteristic of Algal Species Forming Bloom during Spring-Winter Season in the Nakdong River (I). Nakdong River Water Environment Laboratory, National Institute of Environmental Research. Seoul, Korea. 102p. (in Korean)
- Hwang, S.J., K. Kim, C. Park, W. Seo, B.G. Choi, H.S. Eum, M.H. Park, H.R. Noh, Y.B. Sim and J.K. Shin. 2016. Hydro-meteorological effects on water quality variability in Paldang Reservoir, confluent area of the South-Han River-North-Han River-Gyeong Stream, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 354-374. (in Korean)
- Hwang, S.J., Y.B. Sim, B.G. Choi, K. Kim, C. Park, W. Seo, M.H. Park, S.W. Lee and J.K. Shin. 2017. Rainfall and hydrological comparative analysis of water quality variability in Euiam Reservoir, the North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 29-45. (in Korean)
- Im, T., J.M. Ahn, I. Lee, J. Lee, S. Shin, J.S. Yoon, K.Y. Jung, K. Lee, J. Kim, K. Lee, H. Kim, S. Kim, C. Kwak and S. Cheon. 2014. A Study on Sediment Release Characteristics for River Sedimentation in the Nakdong River Basin. NIER-RP2014-264, Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong, Korea. 37p. (in Korean)
- Jeon, S.I. and K.J. Cho. 2004. Primary productivity of phytoplankton in the shallow and hypertrophic River (Seonakdong River). *Korean Journal of Limnology* **37**: 57-63.
- Joung, S.H., H.K. Park, H.J. Lee and S.H. Lee. 2013. Effect of climate change for diatom bloom at winter and spring season in Mulgeum station of the Nakdong River, South Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment* **29**: 155-164. (in Korean)
- Jun, K.S. and J.S. Kim. 2011. The four major rivers restoration project: impacts on river flows. *KSCE Journal of Civil Engineering* **15**: 217-224.
- Jung, H.Y. and K.J. Cho. 2003. SOD and inorganic nutrient fluxes from sediment in the downstream of the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **36**: 322-335. (in Korean)
- Jung, S.Y. and I.K. Kim. 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 of Environmental Engineers* **39**: 89-96. (in Korean)
- Kang, H., J.H. Jang, J.H. Ahn and I.J. Kim. 2011. Numerical estimations of Nakdong River flows through linking of watershed and river flow models. *Journal of Korean Water Resources Association* **44**: 577-590. (in Korean)
- Kim, B., D.S. Kim, G. Hwang, K. Choi, W.M. Heo and W.K. Park. 1996. Contribution of primary production of phytoplankton to organic pollution in a eutrophic river, the Nakdong River. *Algae* **11**: 231-237. (in Korean)
- Kim, D.K., H.W. Kim, G.Y. Kim, Y.S. Kim, M.C. Kim, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2005. Prolonged turbidity of the lower Nakdong River in 2003. *Korean Journal of Limnology* **38**(S): 44-53.
- Kim, H. and K. Kim. 2013. The influence on water quality by nutrient reduction scenario in mid-upper regions of Nakdong-River watershed. *Journal of Daegu Gyeongbuk Development Institute* **12**: 87-97. (in Korean)
- Kim, J.A., G.A. Kim, C.J. Yun, H.G. Park, E.Y. Jung, D.J. Cha, J.T. Choi and H.J. Son. 2013. A study on the correlation between odorous compounds, actinomycetes and algae in drinking water source of Nakdong River. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **35**: 213-219. (in Korean)
- Kim, J.W. and H.Y. Lee. 1991. A study on phytoplankton communities in the reservoir of Nakdong River estuary. *Kore-*

- an Journal of Limnology* **24**: 143-151.
- Kim, M.K., B. Moon, T.K. Kim and K.D. Zoh. 2015a. A study on production and removal of microcystin, taste and odor compounds from algal bloom in the water treatment process. *The Korean Journal of Public Health* **52**: 33-42. (in Korean)
- Kim, M.S., Y.R. Chung, E.H. Suh and W.S. Song. 2002. Eutrophication of Nakdong River and statistical analysis of environmental factors. *Algae* **17**: 105-115. (in Korean)
- Kim, S. 2016. A multiple process univariate model for the prediction of chlorophyll-a concentration in river systems. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* **52**: 137-150.
- Kim, S.R., C.B. Cho and H.D. Kim. 2015b. Daily variation of heat budget balance in the Gangjeong-Goryung Reservoir for summertime: concerning around the rate of heat storage. *Journal of Environmental Science International* **24**: 721-729. (in Korean)
- Kim, Y.J. 2004. Monthly variations of phytoplankton communities in the mid and lower parts of the Nakdong River. *Algae* **19**: 329-337. (in Korean)
- Kim, Y.W., J.H. Lee, T.J. Park and I.G. Byun. 2017. Variation of water environment and algae occurrence characteristics after weirs construction at Mulgeum site in downstream of the Nakdong River. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* **17**: 383-392. (in Korean)
- Korea Water Resources Corporation (K-water). 2007. A Study on the Development Mechanisms and Reduction Technology of Water-Bloom in the River-Reservoir System. Interim Report No. KIWE-WERC-2007-03. K-water Research Institute. Daejeon, Korea. 101p. (in Korean)
- Korea Water Resources Corporation (K-water). 2015. Development of the Predictive Model and Analysis of Occurrence Characteristics for T&Os in Nakdong River. KIWE-WRRC-15-01, Final Report, K-water Research Institute. Daejeon, Korea. 80p. (in Korean)
- Kwon, Y.H., J.K. Seo, S.W. Park and S.Y. Yang. 2006. Evaluation of diatom growth potential in midstream and downstream Nakdong River. *Algae* **21**: 229-234. (in Korean)
- Kwon, O.S. 1991. Effect of river barrage on the changes of environmental factors in Nakdong estuary. *Korean Journal of Limnology* **24**: 231-238. (in Korean)
- Lee, I., K.L. Lee, T.H. Lim, J.J. Park and S. Cheon. 2013. Determination of geosmin and 2-MIB in Nakdong River using headspace solid phase microextraction and GC-MS. *Analytical Science and Technology* **26**: 326-332. (in Korean)
- Lee, J. and I. Kim. 2015. Water quality monitoring of Changnyeong-Hamahn Weir: with chlorophyll a and nutrients. *Journal of the Korean Society of Urban Environment* **15**: 93-100. (in Korean)
- Lee, J.A., K.J. Cho, O.S. Kwon and I.K. Chung. 1993. A study on the environmental factors in Nakdong estuarine ecosystem. *The Korean Journal of Phycology* **8**: 29-36.
- Lee, J.A., K.J. Cho, O.S. Kwon, I.K. Chung and B.Y. Moon. 1994. Primary production of phytoplankton in Nakdong estuarine ecosystem. *Korean Journal of Limnology* **27**: 69-78.
- Lee, J.H., J.N. Kwon and S.Y. Yang. 2002. Seasonal variation of phytoplankton community in the Nakdong River. *Algae* **17**: 267-273. (in Korean)
- Lee, S.H., B.R. Kim and H.W. Lee. 2014. A study on water quality after construction of the weirs in the middle area in Nakdong River. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **36**: 258-264. (in Korean)
- Lee, S.M. and I.K. Kim. 2017. Analysis of correlation between cyanobacterial population and water quality factors in the middle and down stream region of Nakdong River. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* **31**: 93-101. (in Korean)
- Lim, B.J., B.C. Kim, K.I. Yoo and J.K. Ryu. 1997. Changes in zooplankton community during the blue-green algal bloom in the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **30**: 337-346. (in Korean)
- Lim, J.S., Y.W. Kim, J.H. Lee, T.J. Park and I.G. Byun. 2015. Evaluation of correlation between chlorophyll-a and multiple parameters by multiple linear regression analysis. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **37**: 253-261. (in Korean)
- Min, J.H., S. Park, C. Shin, E.H. Na, H.J. Lee, I. Lee, H.K. Park, K. Kim, J. Choi, M.R. Kang, J. Jeon, H. Choi, K. Jung and L.J. Park. 2016. A 3-D Modeling Study of Surface Water Flow and Water Quality Variations- Focused on the Simulation of Cyanobacterial Dynamics in the Middle Reach of the Nakdong River, Korea (I). NIER-RP2016-315, Water Quality Assessment Division and Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. 41p. (in Korean)
- Ministry of Environment and Korea Environment Institute (MOE-KEI). 2009. Four major rivers restoration project of Republic of Korea. *Korea Environmental Policy Bulletin* **7**: 1-11.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2009. Master Plan of the Four Major Rivers Restoration. Office of National River Restoration, Seoul, the Republic of Korea. 400p. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2012. National List Book of Rivers, Korea, 2011. KGE 11-1611 492-000088-01. Seoul, Korea. 767p. (in Korean)
- Moon, S.G., J.M. Chung and C.M. Choi. 2001. The structure of phytoplankton community in the middle-lower part of the Nakdong River. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **10**: 41-45. (in Korean)
- Na, E.H., L.J. Park, S. Park, J.H. Min, M. An and K. Kim. 2015a. A Hydrodynamic and Water Quality Modeling Study on the Algal Dynamics in the Nakdong River, Korea (I). NIER-RP2015-268. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea. 25p. (in Korean)

- Na, E.H., S. Park, J. Kim, S. Im and K. Kim. 2015b. A study on spatial and temporal patterns of water quality in the middle area of the Nakdong River, Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment* **31**: 723-731. (in Korean)
- Nakdong River Watershed Management Commission (NRWMC). 2007. Study of Plankton Dynamics for the Improvement of Water Quality Modeling. Final Report of Environmental Basic Investigation Project, 2006. Changwon, Korea. 179p. (in Korean)
- Nakdong River Watershed Management Commission (NRWMC). 2015. Freshwater Ecosystem Monitoring of Weir Section in Nakdong River. Final Report of Environmental Basic Investigation Project, 2015. Changwon, Korea. 379p. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2016. Investigation and Assessment of Benthic Fluxes in the Sediments of Four Major Rivers: Focus on 14 Weirs. NIER-SP2016-285. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea. 102p. (in Korean)
- Niamien-Ebrottie, J.E., S. Bhattacharyya, P.R. Deep and B. Nayak. 2015. Cyanobacteria and cyanotoxins in the World: review. *International Journal of Applied Research* **1**: 563-569.
- Nichols, S., R. Norris, W. Maher and M. Thoms. 2006. Ecological effects of serial impoundment on the Cotter River, Australia. *Hydrobiologia* DOI 10.1007/s10750-005-0995-6.
- Noh, S., K.L. Lee, Y. Shin, J. Lee, M.A. Song, J. Lee, D. Rhew and J. Lee. 2017. Overwintering and succession of the phytoplankton in pilot culture system. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 57-69. (in Korean)
- Noh, S., Y. Shin, H. Choi, J. Lee, J. Lee and D. Rhew. 2015. Characteristics of algae occurrence on environmental changes. *Journal of Environmental Impact Assessment* **24**: 278-286. (in Korean)
- Nusch, E.A. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeo-pigment determination. *Archiv für Hydrobiologie-Beiheft Ergebnisse der Limnologie* **14**: 14-36.
- Office of Science and Technology Policy (OSTP). 2016. Harmful Algal Blooms and Hypoxia Comprehensive Research Plan and Action Strategy: An Interagency Report. National Science and Technology Council Subcommittee on Ocean Science and Technology, USA. 94p.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Paris, France. 154p.
- Paerl, H.W. 2014. Mitigating harmful cyanobacterial blooms in a human- and climatically-impacted world. *Life* **4**: 988-1012.
- Park, H.K., C.M. Chung, J.R. Bahk and Y.K. Hong. 1999. The relationship between phytoplankton productivity and water quality changes in downstream of Nakdong River. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **8**: 101-106. (in Korean)
- Park, H.K., E.Y. Jung, H.J. Son and J.T. Choi. 2017. Reduction of blue-green algae and its by-products using intake of deep water in summer. *Journal of Environmental Science International* **26**: 393-399. (in Korean)
- Park, H.K., R.Y. Shin, H. Lee, K.L. Lee and S.U. Cheon. 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**: 286-294. (in Korean)
- Park, H.K., S.H. Joung, S.Y. Noh and H.J. Lee. 2011. Effect of Climate Change on Aquatic Ecosystem in Freshwater Lakes (II)-Focusing on the Harmful Algal Blooms-. NIER-RP-2011-1405, Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong, Gyeongbuk, Korea. 41p. (in Korean)
- Park, J.S., K.R. Kim, C.B. Cho, M.S. Kang and B.J. Kim. 2016. Spatio-temporal characteristics of air and water temperature change in the middle reach of the Nakdong River. *Journal of Environmental Policy* **9**: 233-253. (in Korean)
- Park, S.B. 2012. Algal blooms hit south Korean rivers: environmentalists blame dam project for outbreak. *Nature* (News and Comment) DOI 10.1038/nature.2012.11221.
- Park, S.B., S.K. Lee, K.H. Chang, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2002. The impact of monsoon rainfall (Changma) on the changes of water quality in the lower Nakdong River (Mulgeum). *Korean Journal of Limnology* **35**: 160-171. (in Korean)
- Reynolds, C.S. and A.E. Walsby. 1975. Water-blooms. *Biological Reviews* **50**: 437-481.
- Ryu, H.S., H.K. Park, H.J. Lee, R.Y. Shin and S.U. Cheon. 2016. Occurrence and succession pattern of cyanobacteria in the upper region of the Nakdong River: factors influencing *Aphanizomenon* bloom. *Journal of Korean Society on Water Environment* **32**: 52-59. (in Korean)
- Schindler, D.W. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of The Royal Society B* **279**: 4322-4333.
- Seo, J.K. and I.K. Chung. 1994. The phytoplankton community structure in the Nakdong River mouth. *Korean Journal of Limnology* **27**: 227-250.
- Seo, J.K., J.J. Lee, S.Y. Yang and I.K. Chung. 2003. Effect of the sewage and wastewater plant effluent on the algal growth potential in the Nakdong River Basin. *Algae* **18**: 157-167. (in Korean)
- Shin, J.K. 1998. Eutrophication and Ecological Characteristics of Algal Population in the Freshwater Zone of the Nakdong River, Korea. Ph.D. Science Thesis, the Graduate School of Inje University. Busan, Korea. 202p.
- Shin, J.K. and K.J. Cho. 1999b. Water quality assessment by algal growth potential (AGP) in the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **32**: 349-359. (in Korean)
- Shin, J.K. and K.J. Cho. 1997. Distribution and population dynamics of *Microcystis* (cyanophyta) in the Nakdong River. *Algae* **12**: 283-290. (in Korean)
- Shin, J.K. and S.J. Hwang. 2018. Spatio-temporal linkage of

- harmful cyanobacterial water-bloom and off-flavor material dynamics in multiple-serial dam reservoirs of the North-Han River, Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment* **34**, submitted. (in Korean)
- Shin, J.K., B.G. Kang and S.J. Hwang. 2016. Water-blooms (Green-tide) dynamics of algae alert system and rainfall-hydrological effects in Daecheong Reservoir, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 153-175. (in Korean)
- Shin, J.K., G. Jeon, Y. Kim, M.K. Kim, N.Y. Kim and S.J. Hwang. 2017. Recruitment potential of cyanobacterial harmful algae (genus *Aphanizomenon*) in the winter season in Boryeong Reservoir, Korea: link to water-level drawdown. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 337-354. (in Korean)
- Shin, J.K., O.H. Lee and K.J. Cho. 2003. Application of algal growth potential test (AGPT) on the water quality of Chinyang Reservoir and the Nam River. *Korean Journal of Limnology* **36**: 57-65. (in Korean)
- Shin, S.K., C.K. Park and S.W. Lee. 1996. The relationship between chlorophyll-a and BOD in the Nakdong River. *Journal of Korean Society on Water Environment* **12**: 369-375. (in Korean)
- Shin, S.K., K.H. Baek and M.K. Song. 2002. The evaluation for maximum chl.a site observed in the mid to lower Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **35**: 21-27. (in Korean)
- Shin, S.K., K.O. Song and C.K. Park. 2000. Evaluation of autochthonous BOD caused by production of algae at different spatial and temporal scales in the eutrophic Nakdong River. *Journal of Korean Society on Water Environment* **16**: 365-375. (in Korean)
- Son, H.J. 2013. Changes of dominant phytoplankton community in downstream of the Nakdong River: from 2002 to 2012. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **35**: 289-293. (in Korean)
- Son, M.H., I.S. Zulfugarov, O.S. Kwon, B.Y. Moon, I.K. Chung, C.H. Lee and J.A. Lee. 2005. The study on the fluorescence characteristics of several freshwater bloom forming algal species and its application. *Algae* **20**: 113-120. (in Korean)
- Song, K.O., I.S. Seo, S.K. Shin, S.M. Lee and C.K. Park. 1995. Evaluation of algal growth limiting factor in the Nakdong River by MBOD method. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **4**: 469-479. (in Korean)
- SPSS. 1998. SYSTAT® 8.0 Statistics. SPSS Inc., Chigaco, USA. 1086p.
- Watanabe, M.F., K. Harada, W.W. Carmichael and H. Fujiki. 1996. Toxic *Microcystis*. CRC Press, Boca Raton, London, U.K. 262p.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd ed. Academic Press, California, USA. 1006p.
- Whiterod, N., C. Bice, S. Zukowski and S. Meredith. 2004. Cyanobacteria Mitigation in the Mildura Weir Pool: Weir Pool Dynamics and Management Recommendations. Technical Report 8/2004. Murray-Darling Freshwater Research Centre, Lower Basin Laboratory, Mildura, Australia. 45p.
- World Health Organization (WHO). 2011. Management of Cyanobacteria in Drinking-water Supplies: Information for Regulators and Water Suppliers. Technical Brief WHO/FWC/WSH/15.03. 11p.
- Yamamoto, Y. 2009. Effect of temperature on recruitment of cyanobacteria from the sediment and bloom formation in a shallow pond. *Plankton Benthos Research* **4**: 95-103.
- Yang, J., H. Lv, J. Yang, L. Liu, X. Yu and H. Chen. 2016. Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment* **557-558**: 445-452.
- Yang, J.W., S.M. Lee and C.K. Park. 1990. Settling characteristics of phosphorus in Nakdong estuary barrage. *Journal of the Korean Fisheries Society* **23**: 185-191. (in Korean)
- Yang, S.Y., J.K. Seo, J.J. Lee, J.J. Yu, D.J. Hwang, J.M. Park, Y.S. Yoon, J.H. Jung, M.S. Kim, H.J. Lee, Y.H. Kwon, S.H. Park, J.N. Shin, S.T. Oh and J.K. Kim. 2003. Investigation on the Algal Bloom Characteristics and Control Method for Bloom Forming Algae in the Nakdong River (I). Nakdong River Water Environment Laboratory, National Institute of Environmental Research. Seoul, Korea. 136p. (in Korean)
- Yang, S.Y., J.K. Seo, J.J. Lee, M.S. Kim, H.J. Lee and Y.H. Kwon. 2004. Investigation on the Algal Bloom Characteristics and Control Method for Bloom Forming Algae in the Nakdong River (II). Nakdong River Water Environment Laboratory, National Institute of Environmental Research. Seoul, Korea. 148p. (in Korean)
- Yu, J.J., H.J. Lee, K.L. Lee, H.S. Lyu, J.W. Whang, L.Y. Shin and S.U. Chen. 2014b. Relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 247-257. (in Korean)
- Yu, J.J., H.J. Lee, K.L. Lee, I.J. Lee, G.Y. Jung and S.U. Cheon. 2014a. Effects of environmental factors on algal communities in the Nakdong River. *Journal of Korean Society on Water Environment* **30**: 539-548. (in Korean)
- Yu, J.J., K.L. Lee, H.J. Lee, J.W. Hwang, H.S. Lyu, L.Y. Shin, A.R. Park and S.U. Chen. 2015. Relations of nutrient concentrations on the seasonality of algal community in the Nakdong River, Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment* **31**: 110-119. (in Korean)