

추계-동계 낙동강 중 하류 보 구간 일차생산력 및 식물플랑크톤 군집구성 변화: 식물플랑크톤 색소와 CHEMTAX 활용

최지수 · 민준오 · 최보형 · 강재중¹ · 최광순² · 이상헌¹ · 신경훈*

한양대학교 해양융합학과, ¹부산대학교 해양학과, ²한국수자원공사 물순환연구소

Variation of Primary Productivity and Phytoplankton Community in the Weirs of Mid and Downstream of the Nakdong River during Fall and Early Winter: Application of Phytoplankton Pigments and CHEMTAX. Jisoo Choi (0000-0001-8316-7276), Jun Oh Min (0000-0003-1550-8336), Bohyung Choi (0000-0001-6998-400X), Jae Joong Kang¹ (0000-0002-7271-6273), Kwangsoon Choi² (0000-0002-9358-0627), Sang Heon Lee¹ (0000-0003-2445-0690) and Kyung Hoon Shin* (0000-0002-3169-4274) (Department of Marine Science and Convergence Technology, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do 15588, Republic of Korea; ¹Department of Oceanography, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea; ²K-water Institute, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea)

Abstract Phytoplankton is one of the important primary producers providing organic matter through photosynthesis in aquatic environments. In order to determine a temporal and spatial variation in primary productivity after weir construction in the Nakdong River, we investigated carbon uptake rates using *in-situ* ¹³C labeling experiments and identified algal communities contributing to primary productivity using HPLC-CHEMTAX analysis from October to December, 2017. The primary productivity gradually decreased from fall to early winter season (249~933 mgC m⁻² d⁻¹ in October, 64~536 mgC m⁻² d⁻¹ in November and 60~274 mgC m⁻² d⁻¹ in December, respectively). This is attributed to the temporally declining light intensity and the decreasing biomass and physiological activity of phytoplankton in winter. The contribution of diatoms to the phytoplankton community in the Nakdong River was approximately 63% at all the sampling sites and seasons, while the contribution of cryptophytes increased from 9% in October to 32% in November and December. The temporal changes in the primary productivity and the dominant phytoplankton species in the mid and downstream weirs of the Nakdong River was investigated for the first time, after construction of the weirs, and major environmental factors controlling the temporal variation in primary productivity and phytoplankton communities were identified in this study. We suggest that seasonal field investigations will provide further information on the major environmental factors which affect the annual variation of primary productivity and phytoplankton communities.

Key words: primary productivity, phytoplankton, HPLC, CHEMTAX, Nakdong River

서 론

Manuscript received 11 June 2019, revised 22 June 2019,
revision accepted 22 June 2019
* Corresponding author: Tel: +82-31-400-5536, Fax: +82-31-416-6173,
E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

수권 생태계 먹이망 (food web)에 유기물과 에너지를
공급하는 식물플랑크톤은 광합성 생물량 (photosynthetic
biomass)의 1% 미만을 차지함에도 불구하고 수권 생태

© 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.

계 일차생산량(primary production)의 50%를 담당하는 중요한 생태학적 역할을 담당하고 있다(Field *et al.*, 1998). 식물플랑크톤의 생물량(phytoplankton biomass) 및 일차생산력 변화는 수 환경 내 물질순환과 생지화학적 원소순환(biogeochemistry elemental cycle)에 영향을 미치며(Reynolds *et al.*, 2006), 다른 생물군집에 비해 환경에 빠르게 적응하기 때문에 환경 영양상태를 평가하는 지표로 사용될 수 있다(Kimmel *et al.*, 1990). 식물플랑크톤의 생체량 변화 및 계절적 천이는 기후, 수문학적 체계, 유역특성, 영양염 등의 물리·화학적 요인이 복합적으로 작용하면서 일어나며(Elliott *et al.*, 2006; Taranu *et al.*, 2012), 일차생산력은 광량, 수온, 영양염, 체류시간 등에 의해 조절되는 것으로 알려져 있다(Round, 1984; Parsons *et al.*, 1984). 따라서, 식물플랑크톤의 시·공간적 분포 및 일차생산력의 거동, 그들의 조절요인을 파악하는 것은 수질 환경변화, 생태계 복원 및 관리에 있어 매우 중요하다(Guo *et al.*, 2010).

낙동강은 영남지방 전역을 유역권으로 32개 시, 군을 경유하며 도시들의 상수원 및 농업, 공업 용수로 이용되는 국내 최대 수자원 중 하나이다. 낙동강에는 재해예방, 수량확보, 수질개선을 목표로 4대강 사업이 진행되어 본류에 8개의 보가 건설되었지만 보의 건설로 인한 체류시간의 변화로 폐쇄성 수역의 특징을 보이고 있다. 또한 하천 유역 오염원의 지속적인 유입은 낙동강 내 부영양화를 가속화시키고 있으며 이로 인한 식물플랑크톤의 이상증식(algal bloom)은 사회적 문제로 대두되고 있다. 식물플랑크톤의 이상증식은 유기물 증가를 야기시키고, 이를 분해하기 위한 미생물 활동으로 산소소모율 증가 및 산소 고갈과 같은 문제를 야기시켜 수질 악화를 유발하는 원인으로 작용한다(Anderson, 2009). 따라서 일차생산력을 제한하는 환경요소의 파악과 이상증식에 기여하는 식물플랑크톤의 군집구조를 이해하는 것은 매우 중요하다. 그러나 낙동강 내 일차생산력 거동 및 식물플랑크톤의 군집구조를 파악한 선행 연구사례는 대부분 보 건설 이전에 진행되었다(Lee *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1996; Yang *et al.*, 2003; Jeon and Cho, 2004). 특히, 보 또는 댐의 건설로 물의 이용에 따라 수위 변동이 조절되는 곳은 수초와 부착조류의 분포가 제한되어 식물플랑크톤이 일차생산에 더 많은 기여를 하게 되므로(Kimmel and Groeger, 1984) 낙동강 보 건설 이후 식물플랑크톤의 일차생산력 측정은 매우 중요하다.

낙동강 내 식물플랑크톤 군집구조와 관련한 연구사례들은 대부분 현미경 관찰법에 의해 연구되어 왔다(Lee *et al.*, 2002; Cheon *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2013; Son, 2013; Yu *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2018). 현미경 관찰법은 상당한 분석시간 및 분류학적 지식과 정확한 동정기

술을 필요로 하나 HPLC(고성능 액체 크로마토그래피)를 이용한 방법은 비교적 간편하고 분석에 소요되는 시간이 짧다. 또한 초 미소크기의 조류군을 class(강) 수준에서 분석할 수 있어 식물플랑크톤 거동을 파악하는데 그 활용가치가 높다(Suzuki *et al.*, 1995; Roy *et al.*, 2006). 그러나 광합성 지표색소의 정량 정성적 분포만으로는 식물플랑크톤의 군집구조와 분포를 이해하는데 한계가 있어, Mackey *et al.*(1996)는 식물플랑크톤 생체량에 대한 각 군집별 기여도를 평가하기 위한 CHEMTAX 프로그램을 개발하였다. CHEMTAX 프로그램은 연구지역에 존재하는 식물플랑크톤 군집별로 가지는 주요 색소의 chlorophyll *a* (Chl *a*)에 대한 상대적인 비를 기초로 하여 분석하는데 연구지역에 적합한 상대적인 비 값을 이용하여 분석해야 한다. 현재까지 국내 담수에서 서식하는 주요 식물플랑크톤 군집에 대한 지표색소들의 Chl *a*에 대한 상대적인 비 값에 대한 연구결과는 없지만 본 연구 지역과 유사한 환경의 색소 비 값을 이용한다면 CHEMTAX 프로그램의 활용이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 환경과 유사한 지역의 식물플랑크톤 지표색소들의 Chl *a*에 대한 상대적인 비 값을 통해 CHEMTAX 프로그램으로 분석하였고, 국내 처음으로 담수환경 내 CHEMTAX 프로그램을 적용하여 식물플랑크톤 군집 거동 및 일차생산력에 기여하는 식물플랑크톤의 군집조성을 규명하였다. 또한 낙동강 보 건설 이후 일차생산력 변화 및 환경요인과의 상관성을 파악하여 추계-동계 낙동강 수 생태계 내 식물플랑크톤 일차생산력의 조절요인을 규명하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구정점 및 시료 채집

낙동강은 유역면적 23,384 km², 길이 525 km에 이르는 국내에서 가장 긴 하천이다. 낙동강의 중, 하류 구간은 인구 밀도가 높을 뿐만 아니라 공단 및 공업지역이 밀집되어 있어 인간 활동에 기인한 방류수로 인해 수질 관리에 어려움을 겪고 있다(Jun and Kim, 2011; Lee *et al.*, 2014).

본 연구는 낙동강 보 구간 수질에 미치는 내부 생산 유기물 부하량을 파악하기 위하여 낙동강 중, 하류의 4개 보 강정고령보(GJ), 달성보(DS), 합천창녕보(HC), 창녕함안보(HA) 앞 500 m 지점을 대표 연구 정점으로 선정하였고 합천창녕보는 보 구간 내에서의 추계-동계 일차생산력 변화를 확인하기 위해 상류 도동서원(DD), 중류 우곡교(WG) 2개 정점을 추가로 선정하여 총 6개의 정점에

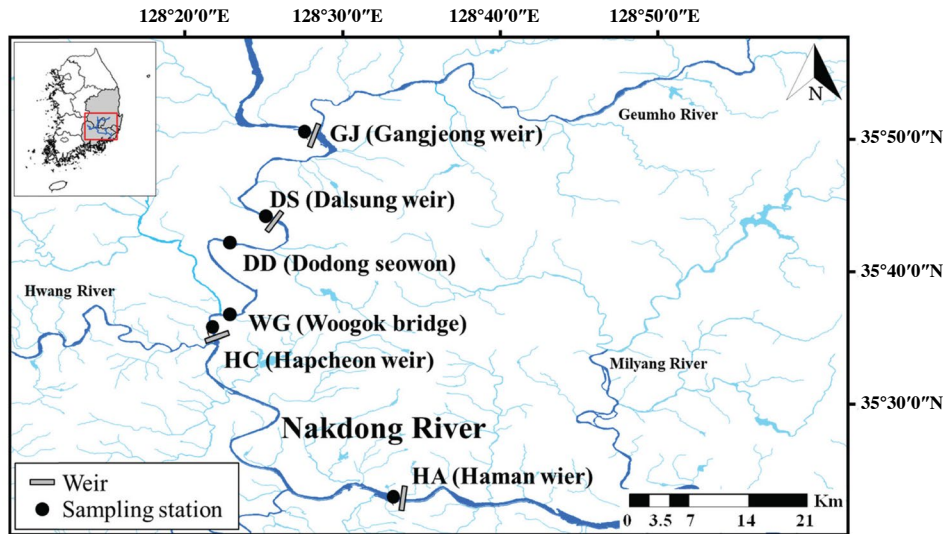


Fig. 1. Sampling location in the Nakdong River.

서 2017년 10월, 11월, 12월 총 3회 현장 관측 및 배양 실험이 진행되었다(Fig. 1). 수심별 수온과 pH는 CTD(OTT DS5, Hydrolab)로 측정하였다. 광량계(LI-1500, LI-COR, USA)를 이용하여 상대광량 100%, 50%, 12%, 1%를 결정하였으며 표층 광량의 1%가 도달하는 수심을 유광층의 깊이로 추정하였다. 질소계 영양염(NH_4^+ , NO_3^-)은 각 정점의 유광층 내 4개 깊이에서 채수한 물을 GF/F (47 mm, Whatman, UK) 여과지로 여과하여 125 mL HDPE bottle (Nalgene)에 담아 분석 전까지 냉동보관 후 이온크로마토그래피(Thermo Fisher Scientific, Dionex, UK)로 분석하였다. 11월, 12월 도동서원(DD) 지점과 우곡교(WG) 지점은 깊이별 채수가 불가하여 도동서원(DD) 지점은 상대광량 50% 또는 12% 깊이까지, 우곡교(WG) 지점은 표층 자료만을 제시하였다.

보 모니터링 정점이 아닌 합천창녕보 상류인 도동서원(DD) 지점과 중류인 우곡교(WG)지점을 제외한 보 대표 정점의 수문(수위, 유입량 및 방류량)자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)과 Water Management Information System (WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>)의 자료를 활용하였으며 Hydraulic Retention time (HRT)는 저수조 용량을 유입 유량으로 나누어 계산하였다.

2. ^{13}C 추적자를 이용한 일차생산력 측정

일차생산력 측정을 위한 샘플은 상대광량 100%, 50%, 12%, 1%깊이에서 채수 후 100 μm 망목으로 대형 동물 플랑크톤을 제거하여 폴리카보네이트 병(Polycarbonate

bottle)에 채웠다. 배양실험에 사용되는 PC bottle은 각 광량과 일치하는 스크린(Lee filter)을 덮어 사용하였다(Garneau *et al.*, 2007). $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 를 첨가하여 ^{13}C 존재 비를 현장수역보다 약 10% 높인 후 4시간 동안 현장 배양하였다. 배양이 끝난 시료는 미리 태운(450°C, 4시간) 25 mm GF/F 여과지로 100 mL 여과 후 동결 건조한 시료를 12 M 염산 증기로 무기탄소를 제거하여 안정동위원소 질량분석기(Finnigan Delta + XL mass spectrometer, Stable Isotope Facility, University of Alaska Fairbanks, USA)로 분석하였다. 일차생산력은 Hama *et al.* (1983)의 계산식을 이용하여 산출하였다. 식물플랑크톤의 일차생산력과 물리·화학적 환경요인과의 상관성을 파악하기 위하여 피어슨 상관계수(Pearson correlation) 및 선형회귀분석(linear regression analysis)을 활용하였다(IBM SPSS 23, 2015 SPSS Inc., IBM Corp., Armonk, New York, USA).

3. 식물플랑크톤의 군집별 주요 색소 분석

식물플랑크톤은 분류군에 따라 지표색소를 가지고 있으며, Schlüter *et al.* (2006)에 의해 알려진 담수성 식물 플랑크톤의 색소 분류군(Diatoms : Fucoxanthin (Fuco); Cryptophytes : Alloxanthin (Allo); Chlorophytes : Chlorophyll *b* (Chl *b*); Cyanobacteria : Zeaxanthin (Zea))에 따라 정성하였다.

입자성 유기물 내 식물플랑크톤의 지표색소는 유광층 내 4개 수심(100%, 50%, 12%, 1%)에서 500 mL를 채수하여 450°C에서 미리 태운 47 mm GF/F 여과지로 여과하였

Table 1. Pigment ratio matrix for the CHEMTAX (Paerl *et al.*, 2015).

| | Fuco | Neo | Viol | Diad | Anth | Myx | Allo | Lut | Zea | Chl <i>b</i> | β -Car | Ech |
|---------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|--------------|--------------|-------|
| Diatoms | 0.51 | 0 | 0 | 0.074 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.003 | 0 |
| Cryptophytes | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.37 | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0 |
| Chlorophytes | 0 | 0.038 | 0.026 | 0 | 0.016 | 0 | 0 | 0.15 | 0 | 0.36 | 0.003 | 0 |
| Cyanobacteria | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.14 | 0 | 0 | 0.28 | 0 | 0.097 | 0.076 |

Abbreviation; Fuco (Fucoxanthin), Neo (Neoxanthin), Viol (Violaxanthin), Diad (Diadinoxanthin), Anth (Antheraxanthin), Allo (Alloxanthin), Lut (Lutein), Zea (Zeaxanthin), Chl *b* (Chlorophyll *b*), β -Car (β -carotene), Ech (Echinone)

다. 여과지는 광 분해를 막기 위하여 알루미늄 호일로 감싸 드라이아이스를 넣어 실험실로 운반하였고 분석 전까지 냉동 보관(-80°C)하였다. 여과지를 Conical tube에 넣고 100% 아세톤 5 mL와 추출 시 손실을 보정하기 위하여 Cantaxanthin (Internal standard)을 100 μ L 첨가하였으며 Ultra sonicator (30 sec, 50 W)로 분쇄 후 4°C의 냉암소에서 24시간 동안 추출하였다. 추출이 끝난 시료는 Syringe filter (PTFE, 0.2 μ m, Hydrophobic)로 여과하여 1 mL를 취한 후 Water Packing (300 μ L 3차 증류수 혼합)하여 Zapata *et al.* (2000)에 의한 HPLC (Agilent HPLC, 1200) 분석 조건에 따라 분석하였다. 지표색소의 동정은 Standard pigment (DHI water & Environment, Hørsholm, Denmark)와 Retention Time (R.T)를 비교하여 결정하였고, 각 지표색소 정량은 Jeffrey *et al.* (1997)에 의해 알려진 흡광계수를 이용하여 Park *et al.* (1997)의 계산식에 의해 정량하였다. 수온과 지표색소의 상관성은 피어슨 상관분석(Pearson correlation)을 통해 확인하였다(IBM SPSS 23, 2015 SPSS Inc., IBM Corp., Armonk, New York, USA). 정량한 색소는 주요 색소의 상대적인 비 값을 기반으로 CHEMTAX 분석을 통해 식물플랑크톤의 군집 구조를 파악하였다(Paerl *et al.*, 2015).

4. CHEMTAX 프로그램을 활용한 식물플랑크톤 군집별 기여도 산정

CHEMTAX 프로그램은 Mackey *et al.* (1996)에 의해 식물플랑크톤의 지표색소 결과와 각 식물플랑크톤 군집 간 주요 색소의 상대적인 비의 값을 인자분석(factor analysis)을 통한 최대 경사 알고리즘(steepest descent algorithm)을 이용하여 식물플랑크톤 군집별 기여도를 평가하기 위해 개발되었다. 초기 개발은 해양 식물플랑크톤 연구를 위해 활용되었으나, 최근 담수환경에서도 활용되고 있다(Schlüter *et al.*, 2006; Paerl *et al.*, 2015; Tamm *et al.*, 2015; Schlüter *et al.*, 2016). CHEMTAX 분석을 통해 얻어진 결과는 초기값으로 이용되는 식물플랑크톤 군집별 지표색소의 상대적 비 값에 영향을 받게 된다. 따라서 정확한 결과

를 얻기 위해서 연구지역에 맞는 최적화된 상대적인 비 값이 요구 되지만, 현재까지 국내에 알려진 담수 종의 식물플랑크톤 군집별 지표색소의 상대적 비 값은 제시된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 낙동강 환경과 유사한 부영양화 지역에서 연구된 Paerl *et al.* (2015)에 의해 알려진 색소 비 데이터를 CHEMTAX 프로그램의 초기값으로 사용하여 분석하였다(Table 1).

결과 및 고찰

1. 낙동강 수계 내의 물리·화학적 특성

연구 정점의 평균 수온은 10월에 17.28°C, 11월에 10.88°C, 12월에 6.79°C로 점차 감소하였고 pH는 조사 기간 동안 7.55~8.93의 범위를 보였다(Table 2). 유입량과 방류량은 하류로 갈수록 점차 증가하였고 이에 따라 보 수위는 감소하였다. 강정고령보(GJ)는 약 18.2~18.3 El.m으로 가장 높은 수위를 유지하였고, 체류시간도 12~22일로 다른 보 구간들에 비해 길었지만 낙동강의 마지막 보인 창녕함안보(HA)의 수위는 3.31~4.81 El.m으로 조사 기간 동안 낮은 수위를 유지하였으며 체류시간은 7~9일로 가장 짧았다. 광 세기는 전 정점에서 10월 이후 점차 감소하였고 낙동강 수계 내 유광층 깊이는 10월에 약 3.7 m, 11월에 5.5 m, 12월에 5.1 m로 10월에 비해 11월, 12월에 더 깊게 나타났다. 유광층 깊이는 주로 수계의 탁도, 식물플랑크톤 또는 CDOM (Colored Dissolved Organic Matter) 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Delgado-Hinojosa *et al.*, 1997; Oliver *et al.*, 2003). 광 세기가 가장 높았던 10월 유광층의 깊이가 가장 낮았고, 광 조건이 나아진 11월, 12월에 유광층의 깊이가 깊어졌으며 물의 투명도 또한 10월에 비해 11월, 12월에 더 깊어진 것으로 보아 수계 내의 부유물질이 조사 기간 동안 점차 감소하였을 것으로 판단된다. 질소계 영양염(Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN)의 농도는 10월에 평균 1.51 mg L⁻¹, 11월에 1.90 mg L⁻¹, 12월에 2.44 mg L⁻¹로 점차 증가하였다. 영양염은 식물플

랑크톤의 성장에 필수적인 요인으로 식물플랑크톤이 성장할 때에는 많은 양이 소비됨에 따라 영양염의 농도가 낮아진다(Li *et al.*, 2014). 12월이 되면서 외부 기원 질소원의 유입 또는 광 세기가 약해져 식물플랑크톤의 광합성 활동이 감소함에 따라 조류에 의해 흡수되는 DIN이 감소하여 수계 내에 남아있는 DIN의 농도가 높아진 것으로 판단된다.

강정고령보(GJ) 지점과 달성보(DS) 지점 사이로는 금호강이 유입되는데 금호강은 하수 처리장에서 방류되는 방류수가 하천유지수량의 많은 부분을 차지하고 있으며(Jung *et al.*, 2016), 금호강을 통해 유입된 높은 농도의 영양염류가 달성보(DS) 지점에서부터 합천창녕보(HC) 지점까지의 DIN 농도에 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다(Yu *et al.*, 2015; Jung and Kim, 2017). 본 연구에서도 강정고령보(GJ) (1.46 mg L^{-1}) 및 창녕함안보(HA) (1.75 mg L^{-1}) 지점이 다른 4지점($2.01 \sim 2.33 \text{ mg L}^{-1}$)보다 낮은 농도를 보였으며(Table 2), 이는 금호강의 영향인 것으로 판단된다.

2. 식물플랑크톤 일차생산력

^{13}C 추적자를 활용한 현장 배양실험으로 얻어진 식물플랑크톤의 일차생산력(Primary productivity)은 표층 광량 대비 50% 수심(0.5~1.3 m) 이내에서 약 80% 이상의 일차생산이 이루어지고 있음을 확인하였으며 10월에 약 $583 \pm 300 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 11월에 $250 \pm 178 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 12월에 $123 \pm 79 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 조사 기간 동안 점차 감소하였다(Fig. 2 (a)). 강정고령보(GJ) 지점의 일차생산력은 $142 \sim 252 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 다른 정점에 비해 비교적 낮은 값을 보였다. 광량은 식물플랑크톤의 생물량 및 생산력을 제한하는 일반적인 환경 요인으로 알려져 있는데(Round, 1984) 강정고령보(GJ) 지점의 광 세기는 약 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 으로 연구 정점 중에서 가장 낮은 것으로 보아 낮은 광 세기가 일차생산력에 영향을 미친 것으로 보인다. 10월 도동서원(DD), 우곡교(WG), 합천창녕보(HC)의 일차생산력은 각각 $899 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $933 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $516 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 보 대표 정점인 합천창녕보(HC) 지점보다 합천창녕보(HC)의 상류 정점인 도동서원(DD), 중류 정점인 우곡교(WG)에서 더 높은 값을 보였다. 특히, 도동서원(DD), 우곡교(WG), 합천창녕보(HC) 지점은 광 조건, 수온, 영양염 농도와 같은 비슷한 물리·화학적 조건을 가졌음에도 일차생산력 값에서 차이를 보여 물리·화학적 특성의 다른 요인에 의해 일차생산력이 조절 되는 것으로 판단된다.

식물플랑크톤의 생리활성도를 의미하는 Chl *a* 당 탄소 고정 속도(Chl *a* specific productivity)는 일차생산력과 마찬가지로 10월에 약 $10.4 \pm 4 \text{ mgC Chl } a^{-1} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보이고 11월에 $8.5 \pm 4 \text{ mgC Chl } a^{-1} \text{ d}^{-1}$, 12월에 $4.6 \pm 3 \text{ mgC Chl } a^{-1} \text{ d}^{-1}$ 로 점차 감소하였다(Fig. 2(b)). 겨울이 되면서 수온과 광 세기가 낮아짐에 따라 식물플랑크톤의 생리활성도는 낮아진 것으로 보인다. 식물플랑크톤은 대부분 유광층 내에 분포하기 때문에 유광층의 깊이는 식물플랑크톤의 광합성과 일차생산력에 직접적인 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Kirk, 1994). 그러나 본 연구에서는 10월에 유광층의 깊이가 가장 낮았음에도 불구하고 가장 높은 일차생산력을 나타냈는데 이는 10월에 식물플랑크톤의 생리활성도가 가장 좋았기 때문인 것으로 보인다. 본 연구의 조사 시기는 추계-동계로 광 조건이나 수온이 일차생산력의 제한요인이 될 수 있다(Schumann *et al.*, 2005). 본 연구에서는 수온이 증가함에 따라 Chl *a* 당 탄소고정 속도가 증가하는 경향을 보여($r=0.56, p<0.05$) 10월에 일차생산력이 가장 높았던 이유는 상대적으로 높은 수온이 식물플랑크톤의 생리활성도에 영향을 미쳐 나타난 결과로 판단된다.

낙동강 보 구간별 일차생산력에 영향을 미치는 환경요인을 확인하기 위해 선형회귀식을 이용하여 분석하였다(Fig. 3). 낙동강 식물플랑크톤의 일차생산력과 유광층 내에서 적분된 Chl *a*의 농도($r^2=0.46; p<0.01$), 식물플랑크톤의 생리활성도($r^2=0.74; p<0.01$), 수온($r^2=0.49; p<0.01$), 질소계 영양염 농도($r^2=0.41; p<0.01$)는 99% 신뢰수준에서 유의미한 차이가 있음을 확인하였다. 또한 일차생산력은 광 세기와 95% 신뢰수준에서 집단 간 평균의 차이가 통계적으로 유의미함을 확인하였다($r^2=0.50; p<0.05$). 유광층 내에서 적분된 Chl *a*의 농도 및 식물플랑크톤의 생리활성도는 일차생산력과 강한 양의 상관관계를 보였다(Fig. 3(a); Fig. 3(b)). 이는 식물플랑크톤의 생체량뿐만 아니라 생리활성도 또한 일차생산력에 중요한 요인임을 시사한다. 식물플랑크톤의 생리활성도는 광 세기의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Hama *et al.*, 1997). 광 세기와 수온은 일차생산력과 양의 상관관계를 보였으며, 이는 여러 선행연구 결과에서 알려진 바와 같이 광 세기와 수온이 높을수록 일차생산력이 증가한다는 결과와 일치함을 보였다(Lohrenz *et al.*, 1999; Urabe *et al.*, 1999; Furnas *et al.*, 2005; Schumann *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006; Waite *et al.*, 2007). 특히 본 연구가 광 조건과 수온이 상대적으로 낮은 계절(10~12월)에 한정되어 진행되었음에도 불구하고 양의 상관관계를 보이는 것은 광 조건과 수온이 일차생산력의 변화에 큰 영향을 미치고 있음을 나타낸

Table 2. The variation of physicochemical properties in the Nakdong River.

| Month | Station | Water levels (EL,m) | Inflow rate ($m^3 \cdot sec^{-1}$) | Discharge rate ($m^3 \cdot sec^{-1}$) | HRT ^a (days) | Light intensity ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$) | Euphotic depth (m) | Secchi depth (m) | WT(°C) | pH | DIN ^b ($mg \cdot L^{-1}$) | |
|-------|---------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------|-------------------------|
| Oct | GJ | 18.2 | 59.9 | 58.0 | 12 | 604 | 3.5 | 1.2 | 17.0~17.1 (17.1±0.0) | 8.05~8.17 (8.14±0.0) | 1.20~1.33 (1.27±0.1) | |
| | DS | 13.6 | 80.5 | 74.3 | 6 | 1300 | 4.0 | 1.6 | 17.2~17.5 (17.4±0.1) | 8.27~8.40 (8.35±0.1) | 0.91~2.06 (1.57±0.5) | |
| | DD | - | - | - | - | 995 | 3.9 | 1.5 | 17.1~17.3 (17.2±0.1) | 8.75~8.94 (8.88±0.1) | 1.52~2.44 (1.88±0.4) | |
| | WG | - | - | - | - | 1107 | 3.2 | 1.0 | 17.0~17.6 (17.3±0.3) | 8.90~8.95 (8.93±0.0) | 1.19~1.87 (1.52±0.3) | |
| | HC | 9.52 | 58.8 | 56.4 | 8 | 1100 | 4.0 | 1.5 | 17.5~17.7 (17.6±0.1) | 8.79~8.87 (8.85±0.0) | 1.22~1.67 (1.42±0.2) | |
| | HA | 4.81 | 121 | 126 | 8 | 722 | 3.8 | 1.6 | 16.9~17.3 (17.1±0.2) | 8.61~8.72 (8.68±0.1) | 1.20~1.75 (1.42±0.3) | |
| | Avg. | 11.5 | 80.1 | 78.7 | 8.5 | 971 | 3.73 | 1.40 | 17.28 | 8.64 | 1.51 | |
| | S.D. | 5.71 | 29.1 | 32.6 | 2.5 | 261 | 0.32 | 0.24 | 0.19 | 0.32 | 0.21 | |
| | Nov | GJ | 18.3 | 39.0 | 37.3 | 22 | 353 | 7.0 | 3.8 | 11.0~11.0 (11.0±0.0) | 8.17~8.26 (8.20±0.0) | 1.03~1.53 (1.26±0.2) |
| | | DS | 13.5 | 62.4 | 60.0 | 10 | 624 | 6.0 | 2.4 | 11.1~11.2 (11.1±0.1) | 8.42~8.45 (8.44±0.0) | 1.02~2.43 (1.84±0.7) |
| DD | | - | - | - | - | 454 | - | 2.1 | 10.7~10.8 (10.8±0.1) | 7.57~8.08 (7.83±0.4) | 2.13~2.43 (2.28±0.2) | |
| WG | | - | - | - | - | - | - | - | 11.7 | 8.13 | 2.12 | |
| HC | | 8.79 | 48.2 | 46.1 | 13 | 682 | 6.0 | 3.9 | 10.6~10.9 (10.7±0.2) | 8.07~8.14 (8.10±0.0) | 2.01~2.40 (2.17±0.2) | |
| HA | | 3.73 | 102 | 111 | 9 | 450 | 3.0 | 1.9 | 9.60~10.3 (9.95±0.3) | 8.46~8.56 (8.53±0.1) | 1.52~1.91 (1.64±0.2) | |
| Avg. | | 8.67 | 62.9 | 63.6 | 13.5 | 512 | 5.50 | 2.82 | 10.9 | 8.21 | 1.89 | |
| S.D. | | 4.89 | 27.8 | 33.0 | 5.92 | 136 | 1.73 | 0.96 | 0.57 | 0.25 | 0.39 | |
| Dec | | GJ | 18.3 | 39.5 | 36.1 | 22 | 245 | 6.0 | 2.3 | 6.16~6.98 (6.76±0.4) | 8.05~8.29 (8.17±0.2) | 1.73~2.03 (1.85±0.1) |
| | | DS | 13.5 | 62.2 | 61.0 | 9 | 591 | 7.0 | 3.0 | 7.12~7.64 (7.41±0.2) | 7.22~7.82 (7.64±0.3) | 2.25~2.90 (2.63±0.3) |
| | DD | - | - | - | - | 481 | - | 2.1 | 7.03~7.06 (7.05±0.0) | 7.20~7.90 (7.55±0.4) | 2.78~2.89 (2.84±0.1) | |
| | WG | - | - | - | - | - | - | - | 7.3 | 8.25 | 2.58 | |
| | HC | 7.81 | 48.0 | 51.0 | 10 | 444 | 4.0 | 2.4 | 6.90~7.00 (6.95±0.1) | 8.11~8.14 (8.13±0.0) | 2.16~2.80 (2.58±0.3) | |
| | HA | 3.31 | 105 | 116 | 7 | 431 | 3.5 | 2.0 | 6.10~6.50 (6.35±0.2) | 8.02~8.15 (8.11±0.1) | 2.10~2.32 (2.19±0.1) | |
| | Avg. | 10.7 | 63.7 | 66.0 | 12.0 | 438 | 5.13 | 2.36 | 6.97 | 7.98 | 2.45 | |
| | S.D. | 6.55 | 29.1 | 34.9 | 6.78 | 125 | 1.65 | 0.39 | 0.38 | 0.30 | 0.36 | |

^aHydraulic Retention Time; ^bDissolved Inorganic Nitrogen; [NH₄⁺]+[NO₃⁻]

GJ (Gangjeong weir), DS (Dalsung weir), DD (Dodong soewon), WG (Woogok bridge), HC (Hapcheon weir), HA (Haman weir).

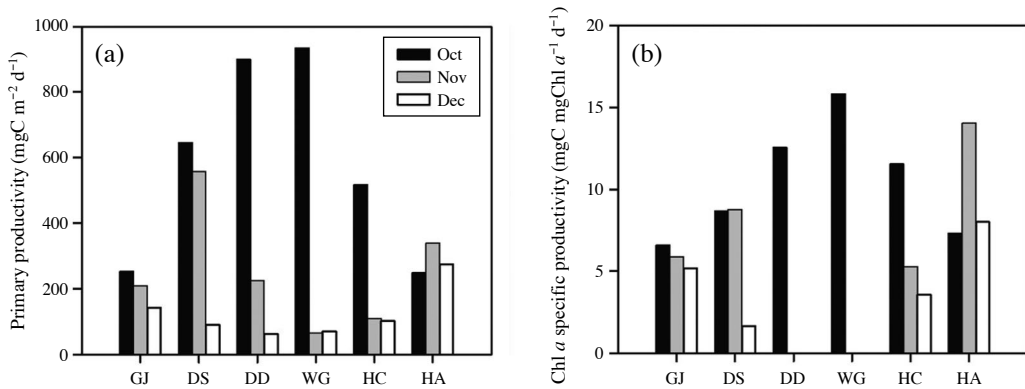


Fig. 2. Primary productivity (a) and Chl *a* specific productivity (b) in the Nakdong River; GJ (Gangjeong weir), DS (Dalsung weir), DD (Dodong soewon), WG (Woogok bridge), HC (Hapcheon weir), HA (Haman weir).

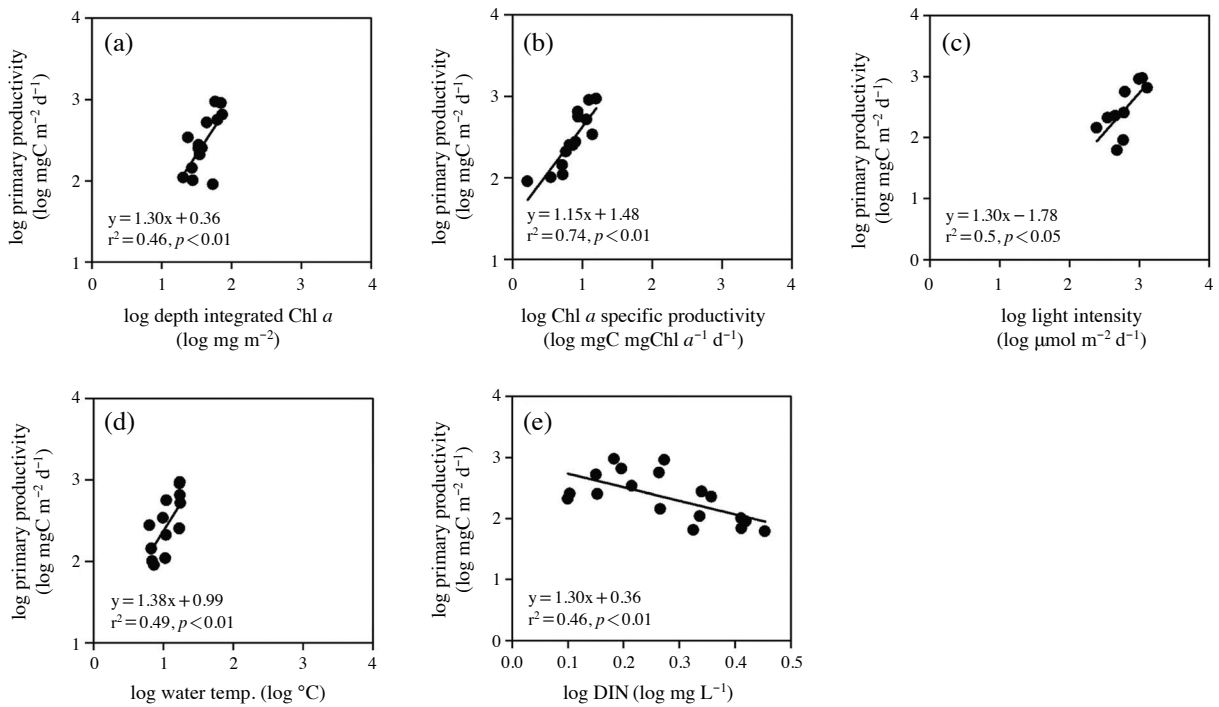


Fig. 3. Relationships between primary productivity, and biological and physico-chemical parameters (depth integrated Chl *a* (a); Chl *a* specific productivity (b); light intensity (c); water temperature (d) and dissolved inorganic nitrogen (e)).

다(Fig. 3(c); Fig. 3(d)). 계절별 광 조건과 수온에 따른 일차생산력의 변화를 확인한다면 더 정확한 상관관계를 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 낙동강 식물플랑크톤의 일차생산력과 질소계 영양염 농도(DIN)는 음의 상관관계를 보였다(Fig. 3(e)). 일차생산력이 높을수록 DIN이 낮아지는 것으로 보아 식물플랑크톤 광합성 활동에 질소계 무기 영양염이 이용된 것으로 추정할 수 있다(Kim *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2014). 식물플랑크톤의 성장에 있어 DIN뿐만 아

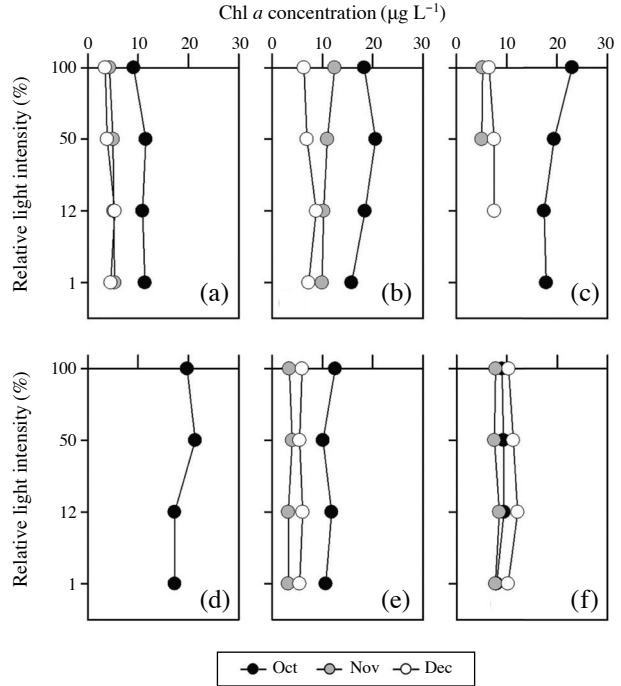
니라 무기인(Dissolved inorganic Phosphorous; DIP) 또한 중요한 인자로 작용하며 DIP는 매년 여름철마다 문제가 되고 있는 남조류 이상 증식의 주요인으로 알려져 있다(Hong *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017). 추후 일차생산력에 대한 무기 영양염의 제한 요소를 파악하기 위해서는 DIP의 농도와 함께 비교 분석할 필요성이 있다.

비슷한 시기, 정점에서 측정된 낙동강 식물플랑크톤의 일차생산력과 본 연구에서 측정된 일차생산력을 비교한

Table 3. Comparison of primary productivity in each study area.

| Station | Sampling date | | Primary productivity (mgC m ⁻² d ⁻¹) | Method | Reference |
|-----------------------|---------------|---------------|----------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| | Year | Month | | | |
| Gangjeong~Haman weir | 2017 | Oct, Nov, Dec | 318.3 | ¹³ C | This study |
| Nakdong River estuary | 1991, 1992 | Sep, Oct, Nov | 545.5 | ¹⁴ C | Lee <i>et al.</i> , 1994 |
| Gupo | 2003 | Jan, Feb | 13,019 | O ₂ | Yang <i>et al.</i> , 2003 |
| Seonakdong River | 1996 | Oct | 2,000 | ¹⁴ C | Jeon and Cho, 2004 |

결과를 Table 3에 나타내었다. 보 건설 이전인 1991, 1992년에 낙동강 하구에서 ¹⁴C를 이용하여 측정된 일차생산력은 약 545 mgC m⁻² d⁻¹이었다(Lee *et al.*, 1994). 또한 2003년 1월, 2월 구포에서 산소법으로 측정된 일차생산력은 약 13,019 mgC m⁻² d⁻¹(Yang *et al.*, 2003)이었으며, 1996년 10월 서낙동강에서 ¹⁴C를 이용하여 측정된 일차생산력은 약 2000 mgC m⁻² d⁻¹이었다(Jeon and Cho, 2004). 추계-동계 기간 동안 낙동강 보 건설 이전에 조사된 낙동강의 일차생산력은 보 건설 이후 2017년 10월, 11월, 12월에 조사된 본 연구결과(318 mgC m⁻² d⁻¹)와 비교하여 높은 값을 보였다. 하천 생태계에서 댐이나 보의 건설은 하천의 정체 구간을 증가시키고 이로 인한 식물플랑크톤 생체량 증가는 수계의 먹이망 구조와 기능을 변화시키는 문제를 일으킬 수 있다(Chang *et al.*, 2008; Doi *et al.*, 2008). 그러나 본 연구는 추계-동계에 진행되어 체류시간이 평균 11일로 일차생산에 크게 영향을 끼치지 않은 것으로 보인다. 또한 본 연구와 이전의 연구들은 비슷한 계절에 조사가 진행되어 광량, 수온은 큰 차이를 보이지 않았으며 DIN 농도에 대한 값은 이전의 연구에서 확인할 수 없었다. 낙동강 중, 하류는 인 계열의 오염물질이 조류 발생에 영향을 미치는 것으로 연구된 바 있다(Jung and Kim, 2017). 낙동강은 조류 발생 문제를 해결하기 위해 총인 처리시설을 대폭 증설하였고(Jung and Kim, 2017), 낙동강은 동계에 하천의 수량이 감소하면 하수처리수의 영향이 증가하는 것으로 알려져 있다(Cho and Kim, 2018). 조류 발생 문제를 막기 위한 처리시설의 증가가 체류시간이 짧은 추계-동계 기간에는 일차생산을 억제하는데 효과가 있는 것으로 보인다. 또한 추계-동계 기간 동안 낙동강의 일차생산력은 광 세기와 수온 같은 물리적 요인의 영향을 더 크게 받는다는 것을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다. 수온, 광 조건, 체류 시간, 영양염과 같은 물리·화학적 환경요인들은 계절에 따라 크게 변화하기 때문에 낙동강 수계 내에서 일차생산력을 조절하는 환경 요인을 정확하게 확인하기 위해서는 계절에 따른 조사가 필요할 것으로 판단된다.

**Fig. 4.** Vertical profiles of Chl *a* concentrations collected at different light intensities in the Nakdong River; Gangjeong weir (a), Dalsung weir (b), Dodong soewon (c), Woogok bridge (d), Hapcheon weir (e) and Haman weir (f).

3. 식물플랑크톤 색소조성 변화

식물플랑크톤의 생체량을 의미하는 Chl *a*의 농도는 깊이에 따라 큰 차이가 없음을 확인하였다(Fig. 4). 바람은 수계의 혼합에 강한 영향을 미치며(Boehrer and Schultze, 2008) 열을 전달하는 매개체로서의 역할을 한다(Nöges *et al.*, 2011). 수계의 혼합으로 조사시기 동안 낙동강 수계 내에서 깊이에 따른 수온의 변화는 보이지 않았으며 이는 성층이 일어나지 않았음을 의미한다. 따라서 활발한 수계의 혼합에 의해 깊이에 따른 Chl *a*의 농도 변화가 나타나지 않은 것으로 보인다. Chl *a*의 농도는 전 정점 평균 10월에 약 14.6 µg L⁻¹으로 가장 높은 농도를 보였고 11월에는 5.5 µg L⁻¹, 12월에는 6.2 µg L⁻¹로 낮은 농도를 나타냈다. US

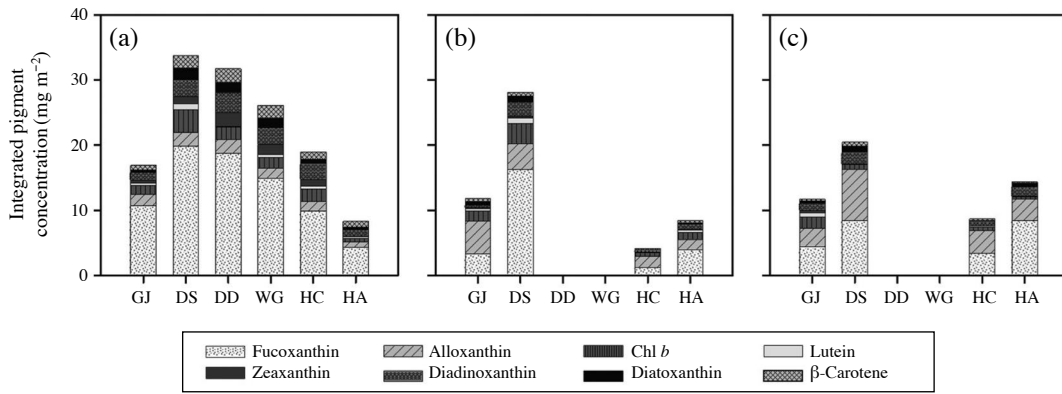


Fig. 5. The concentration of integrated pigment in October (a), November (b) and December (c); GJ (Gangjeong weir), DS (Dalsung weir), DD (Dodong soewon), WG (Woogok bridge), HC (Hapcheon weir), HA (Haman weir).

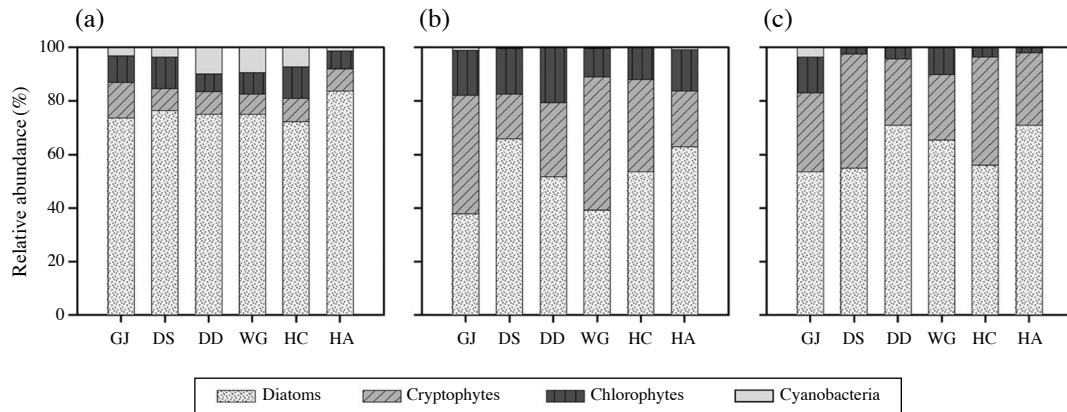


Fig. 6. The relative abundance of the phytoplankton groups measured by CHEMTAX analysis in October (a), November (b) and December (c); GJ (Gangjeong weir), DS (Dalsung weir), DD (Dodong soewon), WG (Woogok bridge), HC (Hapcheon weir), HA (Haman weir).

EPA (1974)의 기준에 따라 Chl *a*의 농도가 10 μg L⁻¹ 이상인 10월 창녕함안보(HA) 지점을 제외한 전 정점, 11월 달성보(DS) 지점, 12월 창녕함안보(HA) 지점은 부영양화 호소로 구분할 수 있다.

HPLC를 활용한 식물플랑크톤의 지표 색소 분석은 식물플랑크톤의 군집구조 파악에 유용하게 사용되고 있다 (Jeffrey *et al.*, 1997). 조사 시기 동안 전 정점에서 규조류의 지표 색소인 Fucoxanthin이 1.12~19.82 mg m⁻²로 높은 농도를 보였으며 규조류의 지표 색소인 Diadinoxanthin, Diatoxanthin, β-carotene 또한 전 정점에서 검출되었다 (Fig. 5). Fucoxanthin은 수온이 감소함에 따라 창녕함안보(HA)지점을 제외한 모든 지점에서 점차 감소하였다 ($r=0.62, p<0.01$). 은편모조류의 지표색소인 Alloxanthin은 0.77~7.90 mg m⁻²로 Fucoxanthin 다음으로 높은 농도를 보였으며 수온이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였다

($r=-0.55, p<0.05$). 녹조류의 지표 색소인 Lutein과 Chl *b* 또한 낮은 농도지만 전 정점에서 검출되었고 남조류의 지표 색소인 Zeaxanthin의 농도 범위는 0~2.13 mg m⁻²로 비교적 낮은 농도를 보였다.

CHEMTAX 프로그램을 이용하여 정점별 식물플랑크톤의 군집별 기여도를 평가한 결과 전 정점에서 규조류의 기여도는 10월에 약 76%, 11월에 52%, 그리고 12월에 62%로 조사 시기에 따라 차이를 보였다. 반면에 은편모조류는 10월에 약 9%였지만 11월, 12월에는 32%로 군집 기여도의 증가를 확인할 수 있었으며 규조류보다 기여도가 더 높게 평가되는 시기가 존재하였다(Fig. 6(b)). 녹조류는 2~20%, 남조류는 0~10% 범위를 보여 규조류와 은편모조류에 비해 상대적으로 기여도가 낮음을 확인하였다. 전체 조사 시기 동안 규조류의 기여도가 약 50% 이상을 차지한 것으로 보아 규조류가 가을, 겨울철 낙동강 보

구간의 일차생산력 및 식물플랑크톤 이상증식에 많은 기여를 하고 있음을 확인할 수 있었다. 수온은 식물플랑크톤의 다양성과 종간 경쟁에 영향을 끼치는 중요한 인자이다(Raven and Geider, 1988). 조사 기간 동안 낙동강의 수온은 6~18°C의 범위를 보였는데 이전의 연구에서 낙동강에 출현하는 우점종 중 *stephanodiscus* sp.의 우점 빈도가 50%로 가장 높았으며 이 종은 2~18°C의 범위에서 개체 밀도가 높게 나타나는 것으로 보고된 바 있다(Yu *et al.*, 2014). 따라서 낮은 수온이 가을, 겨울철 낙동강 구조류 우점에 영향을 끼친 것으로 보인다. 은편모조류는 적절한 난류(turbulence)와 낮은 광 조건에도 잘 성장하는 것으로 알려져 있다(Reynolds, 1984; Barone and Naselli-Flores, 2003). 가을, 겨울철 수계가 혼합되고 광 세기가 낮아짐에 따라 은편모조류의 성장에 유리한 환경이 조성되어 11월, 12월에 은편모조류의 우점 비율이 높아진 것으로 보인다. 녹조류와 남조류의 최적 성장 수온은 각각 27.5~35°C, 25~35°C로 다소 높은 수온에서 높은 성장률을 보이지만 본 연구 조사 시기 동안에는 낮은 수온이 지속되어 녹조류와 남조류의 기여도가 낮게 평가된 것으로 보인다(Lürding *et al.*, 2013). 그러나 여름철이 되어 수온이 증가하면 녹조류와 남조류의 기여도는 증가할 것으로 예상된다.

추계-동계 기간 동안 CHEMTAX 프로그램으로 확인된 낙동강 식물플랑크톤 군집구조에서 구조류가 상대적으로 높은 구성비를 보였는데 이는 이전에 현미경으로 종 조성을 확인한 연구에서 가을, 겨울, 봄철에 구조류가 우점한다는 결과와 일치하였다(Lee *et al.*, 2002; Son, 2013; Yu *et al.*, 2015). 한편, 본 연구에서 확인된 은편모조류의 우점 시기는 현미경 동정을 통해 낙동강 식물플랑크톤의 종 조성을 확인한 선행연구와 차이가 있었다(Lee *et al.*, 2002; Cheon *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2013; Son, 2013; Yu *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2018). 본 연구에서는 11월에 은편모조류의 기여도가 높게 나타났지만 선행연구에서는 은편모조류의 높은 현존량을 확인할 수 없었을 뿐만 아니라 낙동강 수계를 대표하는 식물플랑크톤 분류군으로 나누어져 있지 않았다. 이전의 연구에서도 HPLC를 이용한 색소 분석에서는 은편모조류의 지표 색소인 Alloxanthin이 검출되었지만 현미경 관찰에서는 확인되지 않은 사례가 있다(Min *et al.*, 2011). 현미경 관찰을 위해서는 포르말린이나 루골 용액 같은 고정시약을 사용하여 분석 전까지 보관하는데 이는 식물플랑크톤 편모의 탈착 같은 세포 손상을 야기하며 cryptomonads는 고정시약의 영향을 더 많이 받는 것으로 보고된 바 있다(Jeffrey, 1997; Park *et al.*, 2001; Wong and Wong, 2003). 또한 HPLC-CHEMTAX 프로그램은 식물플랑크톤 주요 색

소의 Chlorophyll *a*에 대한 상대적인 비를 기초로 분석하며, 이 상대적인 비는 서식환경, 광 조건, 영양염 등에 따라 달라지게 된다(Latasa, 1995; Goericke and Montoya, 1998; Nicklisch and Woltke, 1999). 따라서 해당 연구 수역에 서식하는 식물플랑크톤의 군집조성을 파악하기 위해서는 현미경 관찰법과 색소분석이 상호보완적으로 이루어져야 하며 CHEMTAX 프로그램을 활용할 경우 해당 수역에 우점하는 식물플랑크톤의 주요 색소에 대한 상대적인 비 값을 활용해야 할 것으로 판단된다.

적 요

지구 온난화에 따른 기온 상승, 보나 댐의 건설로 인한 체류시간의 변화는 식물플랑크톤의 이상증식을 일으키며 이로 인한 수계의 부영양화, 녹조 현상은 상수원 수질 악화에 영향을 미쳐 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. 본 연구와 같이 일차생산력과 환경요인들의 상관관계를 확인하는 것은 일차생산력의 조절인자 파악에 매우 효과적이다. 또한 HPLC-CHEMTAX 분석 방법은 간편하며 짧은 시간 안에 식물플랑크톤의 색소 비 값을 기반으로 각 군집의 상대적인 기여도 추정이 가능하다. 이러한 연구 방법들을 적용할 경우 수 생태 건강성 평가 및 식물플랑크톤 이상증식에 영향을 주는 군집조성을 빠르게 파악할 수 있어 조류 예보제 및 수계관리에 있어 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

저자기여도 개념설정: 최지수, 최보형, 이상현, 최광순, 신경훈, 방법론: 최지수, 민준오, 최보형, 강재중, 이상현, 자료 수집: 최지수, 민준오, 최보형, 강재중, 분석: 최지수, 강재중, 자료관리: 최지수, 민준오, 원고 초안작성: 최지수, 원고 교정: 모든 저자, 원고 편집: 최지수, 민준오, 신경훈 본 연구에 참여한 저자는 논문 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 본 연구에 참여한 모든 저자들은 학술출판에 있어서 어떠한 이해충돌의 여지가 없음을 알려드립니다.

연구비 본 연구는 한국수자원공사 조류의 일차생산력 및 영양염류 이용율 분석 연구 용역(연구기간: 2017년 9월~2017년 12월)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

사사 본 연구는 한국수자원공사 조류의 일차생산력 및 영양염류 이용율 분석 연구 용역의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anderson, D.M. 2009. Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs). *Ocean & Coastal Management* **52**(7): 342-347.
- Barone, R. and L. Naselli-Flores. 2003. Distribution and seasonal dynamics of Cryptomonads in Sicilian water bodies. *Hydrobiologia* **502**: 325-329.
- Boehrer, B. and M. Schultze. 2008. Stratification Lakes. *Reviews of Geophysics* **46**(2): 1-27.
- Chang, K.H., H. Doi, H. Imai, F. Gunji and S.I. Nakano. 2008. Longitudinal changes in zooplankton distribution below a reservoir outfall with reference to river planktivory. *Limnology* **9**(2): 125-133.
- Cheon, S., H. Lee, J. Yu, H. Park, T. Lim, J. Lee, I. Lee, S. Shin, J. Yoon, K. Lee, J. Hwang, H. Ryu, G. Joo, J. Choi and D. Hong. 2013. Changes of Water Environment and Phytoplankton Community Structures in the Nakdong River. National Institute of Environmental Research, p. 10-19.
- Cho, H.K. and S.M. Kim. 2018. Water Quality Correlation Analysis between Sewage Treated Water and the Adjacent Downstream Water in Nakdong River Basin. *Journal of Korean Society on Water Quality* **34**(2): 202-209.
- Delgado-Hinojosa, F., G. Gaxiola-Castro, J.A. Segovia-Zavala, A.M. Oz-Barbosaa and M.V. Orozoco-Borbon. 1997. The Effect of Vertical Mixing on Primary Production in a Bay of the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **45**(1): 135-148.
- Doi, H., K.H. Chang, T. Ando, H. Imai, S.I. Nakano, A. Kajimoto and I. Katano. 2008. Drifting plankton from a reservoir subsidize downstream food webs and alter community structure. *Oecologia* **156**(2): 363-371.
- Elliott, J.A., I.D. Jones and S.J. Thackeray. 2006. Testing the sensitivity of phytoplankton communities to changes in water temperature and nutrient load, in a temperate lake. *Hydrobiologia* **559**(1): 401-411.
- Field, C.B., M.J. Behrenfeld, J.T. Randerson and P. Falkowski. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science* **281**(10): 237-240.
- Furnas, M., A. Mitchell, M. Skuza and J. Brodie. 2005. In the other 90%: Phytoplankton responses to enhanced nutrient availability in the Great Barrier Reef Lagoon. *Marine Pollution Bulletin* **51**(1-4): 253-265.
- Garneau, M.È., M. Gosselin, B. Klein, J.È. Tremblay and E. Fouilland. 2007. New and regenerated production during a late summer bloom in an Arctic polynya. *Marine Ecology Progress Series* **345**: 13-26.
- Goericke, R. and J.P. Montoya. 1998. Estimating the contribution of microalgal taxa to chlorophyll *a* in the field - Variations of pigment ratios under nutrient- and light-limited growth. *Marine Ecology Progress Series* **169**: 97-112.
- Guo, Q., K. Ma, L. Yang, Q. Cai and K. He. 2010. A comparative study of the impact of species composition on a freshwater phytoplankton community using two contrasting biotic indices. *Ecological Indicators* **10**(2): 296-302.
- Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura. 1983. Measurement of photosynthetic productions of a Marine phytoplankton population using stable ¹³C isotope. *Marine Biology* **73**(1): 31-36.
- Hama, T., K.H. Shin and N. Handa. 1997. Spatial variability in the primary productivity in the East China Sea and its adjacent waters. *Journal of Oceanography* **53**(1): 41-51.
- Hong, D.-G., D.-K. Kim, H.-W. Kim, Y. Do, H.Y. Lee and G.-J. Joo. 2016. Limnological assessment of the meteorological and physicochemical factors for summer cyanobacterial blooms in a regulated river system. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* **52**: 123-136.
- Jeffrey, S.W. 1997. Introduction to marine phytoplankton and their pigment signatures. Phytoplankton pigment in oceanography, p. 37-84.
- Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura and S.W. Wright. 1997. Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods. UNESCO, Paris. p. 74-75.
- 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**(1): 57-63.
- Jun, K.S. and J.S. Kim. 2011. The four major rivers restoration project: Impacts on river flows. *KSCE Journal of Civil Engineering* **15**(2): 217-224.
- Jung, K.-Y., J.-M. Ahn, K. Kim, I.J. Lee and D.S. Yang. 2016. Evaluation of Water Quality Characteristics and Water Quality Improvement Grade Classification of Geumho River Tributaries. *Journal of Environmental Science International* **25**(6): 767-787.
- 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**(2): 89-96.
- 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. *Korean Journal of Limnology* **11**(2): 231-237.
- Kim, H., B.Y. Jo and H.S. Kim. 2017. Effect of different concentrations and ratios of ammonium, nitrate, and phosphate on growth of the blue-green alga (Cyanobacterium) microcystis aeruginosa isolated from the Nakdong River, Korea. *Algae* **32**(4): 275-284.
- 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**(2): 105-115.
- Kimmel, B.L. and A.W. Groeger. 1984. Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: A perspective.

- Lake and Reservoir Management* **1**(1): 277-281.
- Kimmel, B., O. Lind and L. Paulson. 1990. Reservoir Primary Production, p. 134-194. *In: Reservoir limnology: ecological perspectives.*
- Kirk, J.T. 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, p. 47-144.
- Latasa, M. 1995. Pigment composition of *Heterocapsa* sp. and *Thalassiosira weissflogii* growing in batch cultures under different irradiances. *Scintia Marina* **59**(1): 25-37.
- Lee, H.-J., H.-K. Park and S.-U. Cheon. 2018. Effects of Weir Construction on Phytoplankton Assemblages and Water Quality in a Large River System. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **15**(11): 2348.
- Lee, J.-H., J.-N. Gwon and S.-Y. Yang. 2002. Seasonal Variation of Phytoplankton Community in the Nakdong River. *Algae* **17**(4): 267-273.
- Lee, J.A., K.J. Cho, O.S. Kwon and I.K. Chung 1994. Primary Production of Phytoplankton in Natong Estuarine Ecosystem. *Korean Journal of Limnology* **27**: 69-78.
- 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**(4): 258-264.
- Li, H.M., H.J. Tang, X.Y. Shi, C.S. Zhang and X.L. Wang. 2014. Increased nutrient loads from the Changjiang (Yangtze) River have led to increased Harmful Algal Blooms. *Harmful Algae* **39**: 92-101.
- Lohrenz, S.E., G.L. Fahnenstiel, D.G. Redalje, G.A. Lang, M.J. Dagg, T.E. Whittedge and Q. Dortch. 1999. Nutrients, irradiance, and mixing as factors regulating primary production in coastal waters impacted by the Mississippi River plume. *Continental Shelf Research* **19**(9): 1113-1141.
- Lürling, M., F. Eshetu, E.J. Faassen, S. Kosten and V.L.M. Huszar. 2013. Comparison of cyanobacterial and green algal growth rates at different temperatures. *Freshwater Biology* **58**(3): 552-559.
- Mackey, M.D., D.J. Mackey, H.W. Higgins and S.W. Wright. 1996. CHEMTAX - a Program for Estimating Class Abundances From Chemical Markers: Application To HPLC measurements of phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series* **144**: 265-283.
- Min, J.O., S.Y. Ha, B.H. Choi, M.H. Chung, W.D. Yoon, J.S. Lee and K.H. Shin. 2011. Primary Productivity and Pigments Variation of Phytoplankton in the Seomjin River Estuary. *Korean Journal of Limnology* **44**(3): 303-313.
- Nicklisch, A. and P. Woltke 1999. Pigment Content of Selected Planktonic Algae in Response to Simulated Natural Light Fluctuations and a Short Photoperiod. *International Review of Hydrobiology* **84**(5): 479-495.
- Nôges, P., T. Nôges, M. Ghiani, B. Paracchini, J.P. Grande and F. Sena. 2011. Morphometry and trophic state modify the thermal response of lakes to meteorological forcing. *Hydrobiologia* **667**(1): 241-254.
- Oliver, R.L., J. Whittington, Z. Lorenz and I.T. Webster. 2003. The influence of vertical mixing on the photoinhibition of variable chlorophyll. *Journal of Plankton Research* **25**(9): 1107-1129.
- Paerl, H.W., H. Xu, N.S. Hall, K.L. Rossignol, A.R. Joyner, G. Zhu and B. Qin. 2015. Nutrient limitation dynamics examined on a multi-annual scale in Lake Taihu, China: Implications for controlling eutrophication and harmful algal blooms. *Journal of Freshwater Ecology* **30**(1): 5-24.
- 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**(3): 286-294.
- Park, M.-O., C.-H. Moon, S.-Y. Kim, S.-R. Yang, K.-Y. Kwon and Y.-W. Lee. 2001. The Species Composition of Phytoplankton along the Salinity Gradients in the Seomjin River Estuary in Autumn, 2000: Comparison of HPLC Analysis and Microscopic Observations. *Algae* **16**(2): 179-188.
- Park, M.-O. and J.-S. Park. 1997. HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *Ocean Science Journal* **32**: 46-55.
- Parsons, T.R., M. Takahashi and B. Hargrave. 1984. Biological oceanographic processes. Pergamon Press, Oxford, UK, p. 330.
- Raven, J.A. and R.J. Geider. 1988. Temperature and Algal Growth. *New Phytologist* **110**(4): 441-461.
- Reynolds, C.S. 1984. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press.
- Reynolds, C.S. 2006. The ecology of phytoplankton. Cambridge University Press.
- Round, F.E. 1984. The ecology of algae. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- Roy, R., A. Pratihary, G. Mangesh and S.W.A. Naqvi. 2006. Spatial variation of phytoplankton pigments along the south-west coast of India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **69**(1-2): 189-195.
- Schlüter, L., T.L. Lauridsen, G. Krogh and T. Jørgensen. 2006. Identification and quantification of phytoplankton groups in lakes using new pigment ratios - A comparison between pigment analysis by HPLC and microscopy. *Freshwater Biology* **51**(8): 1474-1485.
- Schlüter, L., S. Behl, M. Striebe and H. Stibor. 2016. Comparing microscopic counts and pigment analyses in 46 phytoplankton communities from lakes of different trophic state. *Freshwater Biology* **61**(10): 1627-1639.
- Schumann, R., A. Hammer, S. Görs and H. Schubert. 2005. Winter and spring phytoplankton composition and production in a shallow eutrophic Baltic lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **62**(1-2): 169-181.
- Seo, D.-I., G.-S. Nam, S.-H. Lee, E.-H. Lee, M. Kim, J.-Y. Choi, J.-H. Kim and K.-H. Chang. 2013. Plankton Community in

- Weir Section of the Nakdong River and Its Relation with Selected Environmental Factors. *Environmental Biology Research* **31**(4): 362-369.
- 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**(4): 289-293.
- Suzuki, K., N. Handa, H. Kiyosawa and J. Ishizaka. 1995. Distribution of the prochlorophyte *Prochlorococcus* in the central Pacific Ocean as measured by HPLC. *Limnology and Oceanography* **40**(5): 983-989.
- Tamm, M., R. Freiberg, I. Tönno, P. Nöges and T. Nöges. 2015. Pigment-Based Chemotaxonomy - A Quick Alternative to Determine Algal Assemblages in Large Shallow Eutrophic lake? *PLoS ONE* **10**(3): 1-15.
- Taranu, Z.E., R.W. Zurawell, F. Pick and I. Gregory-Eaves. 2012. Predicting cyanobacterial dynamics in the face of global change: The importance of scale and environmental context. *Global Change Biology* **18**(12): 3477-3490.
- Urabe, J., T. Sekino, K. Nozaki, A. Tsuji, C. Yoshimizu, M. Kagami, M. Kagami, T. Koitabashi, T. Miyazaki and M. Nakanishi. 1999. Light, nutrients and primary productivity in Lake Biwa: An evaluation of the current ecosystem situation. *Ecological Research* **14**(3): 233-242.
- USEPA. 1974. An Approach to a Relative Trophic Index System for Classifying Lakes and Reservoirs. Working Paper No. 24.
- Waite, A.M., S. Pesant, D.A. Griffin, P.A. Thompson and C.M. Holl. 2007. Oceanography, primary production and dissolved inorganic nitrogen uptake in two Leeuwin Current eddies. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **54**(8-10): 981-1002.
- Wong, C.K. and C.K. Wong. 2003. HPLC pigment analysis of marine phytoplankton during a red tide occurrence in Tolo Harbour, Hong Kong. *Chemosphere* **52**(9): 1633-1640.
- 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, J.N. Shin, S.T. Oh and J.K. Kim. 2003. Nakdong River Water Environment Laboratory, p. 62.
- Yu, J.J., K.L. Lee, H.J. Lee, J.W. Whang, 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**(2): 110-119.
- Yu, J.J., H.J. Lee, K.L. Lee, H.S. Lyu, J.W. Whang, L.Y. Shin and S.U. Chen. 2014. Relationship between Distribution of the Dominant Phytoplankton Species and Water Temperature in the Nakdong River. *Korean Journal of Environmental Education* **47**(4): 247-257.
- Zapata, M., F. Rodríguez and J.L. Garrido. 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. *Marine Ecology Progress Series* **195**: 29-45.
- Zhang, Y., B. Qin, W. Hu, S. Wang, Y. Chen and W. Chen. 2006. Temporal-spatial variations of euphotic depth of typical lake regions in Lake Taihu and its ecological environmental significance. *Science in China, Series D: Earth Sciences* **49**(4): 431-442.