

Research Paper

유량 조절과 인 부하 변동에 따른 강정고령보 조류저감 효과 수치 모의

박대연 · 김성진 · 박형석 · 정세웅
충북대학교 환경공학과

Simulations of the Effect of Flow Control and Phosphate Loading on the Reduction of Algae Biomass in Gangjeong-Goryong Weir

Dae-Yeon Park · Sung-Jin Kim · Hyung-Seok Park · Se-Woong Chung

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

요약: 본 연구의 목적은 낙동강 내에 위치한 강정고령보 구간을 대상으로 EFDC 모델을 검증하고, 보 구간의 유량에 따른 체류시간과 유입수 인 농도 변화가 수질 및 조류 그룹별(규조류, 녹조류, 남조류) 생체량에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 2018년 실험자료를 이용하여 모델을 검증한 결과, 보 구간의 수위와 수온의 수직 분포, DO, 유기물, 질소, 인 계열의 시계열 변화를 적절히 모의하였다. 조류 그룹별 생체량 예측에 있어서는 계절별 변동 특성은 적절히 재현하였으나, 일부기간에 실측값과 편차가 크게 나타났다. 보의 관리수위와 유량을 조절하는 시나리오 모의결과, 보의 운영 수위를 낮출수록 유량을 증가시킬수록 수온 성층이 완화 또는 해소되는 것으로 분석되었다. 강정고령보에서 수온성층이 해소된 유속은 약 0.1 m/s였으며, 이는 금강의 백제보에서 연구결과와 일치한다. 2Q 유량 시나리오 모의결과, Chl-a는 8.7% 감소하였고 규조류와 녹조류 세포수 밀도도 감소하였다. 하지만 남조류 세포수는 오히려 증가하였는데, 그 이유는 유량이 증가함에 따라 유속이 빨라져 상류경계조건인 높은 남조류 농도가 하류에 직접 영향을 끼친 것으로 나타났다. 유입수 인 부하 농도(평균 0.056mg/L)를 50% 수준으로 저감하는 시나리오 모의결과, Chl-a는 13.6% 감소하였다. 연구결과는 강정고령보의 조류 과잉성장을 억제하기 위해서는 수리학적 제어와 함께 상류 유입 조류 농도와 인 부하량 저감이 동시에 고려되어야 함을 시사한다.

주요어: 강정고령보, 낙동강, 인 부하, 유량 조절, 조류 제어

Abstract: The purpose of this study was to validate the EFDC model for the weir pool of Gangjeong-Goryong Weir located in Nakdong River, and evaluate the effect of flow control and phosphate loading reduction on the water quality and algae biomass by group (Diatom, Green, Cyanobacteria). As a result of model validation using 2018 experimental data, the time series of water level and vertical distribution of water temperature, DO, organic matter, nitrogen, and phosphorus time series were properly

First Author: Dae-Yeon Park, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: qkrtjdwls15@hanmail.net, ORCID: 0000-0003-4874-9435

Corresponding Author: Se-Woong Chung, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: chung@chungbuk.ac.kr, ORCID: 0000-0002-8596-4970

Co-Authors: Sung-Jin Kim, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: znssungjin2@naver.com, ORCID: 0000-0002-4722-7240

Hyung-Seok Park, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: qwrs07@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6218-1826

Received: 2 September, 2019. Revised: 30 October, 2019. Accepted: 31 October, 2019.

simulated. Seasonal fluctuations of algae biomass by group were adequately reproduced, but the deviations between measured and simulated values were significant in some periods. As a result of scenario simulations to control the water level and flow rate, the thermal stratification was resolved as the water level was lowered and the flow rate increased. The flow velocity at which the water temperature stratification was resolved was about 0.1 m/s, which is consistent with the previous study results of Baekje Weir in Geum River. Simulations of the 2Q flow scenario showed that Chl-a decreased by 8.7% and the cell density of diatom and green algae declined. The cell density of cyanobacteria increased, however, because the high concentrations of cyanobacteria in the upstream boundary conditions directly affected downstream due to increased flow velocity. In the scenario simulation of reducing the influent phosphate load concentration (average 0.056 mg/L) to 50%, Chl-a decreased by 13.6%. The results suggest that the upstream algae concentration and phosphorus load reduction should be considered simultaneously with hydraulic control to prevent algal overgrowth of Gangjeong-Goryong Weir.

Keywords : Gangjeong Goryong Weir, Nakdong River, Phosphate Loading, Algae Control

I. 서론

낙동강은 상류지역의 비점오염원과 중·하류지역의 공업화 및 인구밀집화로 인해 수질 관리에 어려움이 있으며, 4대강 사업 이후 8개의 보가 설치됨에 따라 체류시간의 변화로 물환경에 많은 변화가 나타나고 있다(Hwang, 2012). 특히 여름철에는 지속적인 가뭄과 기온 상승으로 인하여 남조류가 과잉성장하는 현상(이하 녹조)이 빈번히 발생하고 있으며, 이취미 물질 유발, 독소 생성 등 수생태계의 건강성과 상수원의 수질문제가 되고 있다. 이러한 녹조 문제를 해결하기 위해 환경부에서는 하수처리장 배출수 허용기준 강화 및 댐과 보의 연계운영, 비점오염원 대책수립 등 많은 노력을 하고 있으며, 최근 보 개방을 통한 수위저하 운영 및 펄스형 방류와 같은 수리학적 변화를 주어 녹조 대책을 시행하고 있다. 하지만, 보다 경제적이고 지속가능한 녹조 대책 마련을 위해서는 다양한 대책의 효과에 대한 과학적 해석과 효과 검증이 필요한 실정이다.

하천에서 빈번히 발생하는 녹조 발생의 원인에는 영양염류의 과도한 유입, 수온상승, 수리구조물 설치에 따른 체류시간 증가 등 다양한 요소가 존재하며 (Fogg 1968; Reynolds 1987; Paerl 1988), 수체의 특성에 따라 다양한 요인(Horne et al, 1994)이 복합

적으로 작용하기 때문에 정확한 발생 원인을 분석하기 어려운 것이 현실이다. 남조류는 다른 종에 비해 체류시간이 증가하고 수체가 안정화 될수록 발생빈도가 높다(WHO 1999). 따라서, 유량의 증가에 따른 수체 내부의 수직 혼합과 체류시간의 감소는 남조류의 성장을 저해하며, Sherman & Webster (1998)은 수체 내에서 유량과 남조류 생체량의 반비례 관계를 규명하기도 하였다. Mitrovic et al. (2003)의 연구결과에서는 하천의 유속과 남조류 우점 간에 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 국내 금강의 백제보에서도 수체의 성층현상 파괴와 남조류의 과잉성장을 억제하기 위해서 임계유속 0.1 m/s가 필요하다는 선행연구 사례가 있다(Kim et al, 2017).

한편, 인은 국내 담수 하천과 저수지에서 조류 성장의 가장 중요한 제한인자로 알려져 있다(Kim 2003; Kim et al, 2014).. 인은 유역의 점오염원과 비점오염원으로부터 하천으로 유입되며, 하상 퇴적물에도 다양한 형태로 존재하여 pH가 증가할수록 인의 용출이 증가된다(Min et al, 2011). 인의 용출은 부영양화를 유발하며, 남조류 대발생을 촉진한다(Kim et al, 1992). 또 낮은 TN/TP비, 즉 높은 인 농도에서 *Microcystis*가 대량으로 발생하였다는 보고가 있었다(Xia et al, 2011). 따라서 유역으로부터 수계로 유입하는 인 부하량을 저감하는 것은 가장 중요한 녹조

대책의 하나에 해당한다.

현재 국내에서는 4대강 보 구간의 녹조를 제어하기 위해 유역의 인부하량 저감과 보 수문 개방과 같은 다양한 대책을 추진하고 있다. 특히 환경부는 일부 보의 개방에 따른 녹조 제어 효과를 광범위하게 실험하고 있으나, 단기간의 실험으로는 수리학적 변화만의 효과를 해석하는데 어려움이 있다. 그리고 지속적으로 변하는 기상과 수문조건에서 유역의 인 부하량 감소에 따른 보 구간의 녹조 제어효과를 실험으로 해석하는데도 한계가 있다. 하지만, 수리·수질·생태 연동 해석이 가능한 수치모델은 실험결과를 이용하여 매개변수를 충분히 보정한다면, 기상, 오염 부하량, 보 운영 수위 등 다른 모든 요인은 동일한 조건에서 하천 유량 또는 유입수 인 부하만의 영향을 예측하는데 활용가능하다.

국내에서는 하천 및 저수지를 대상으로 수질악화 및 조류의 과잉증식 원인분석을 위해 다양한 수치모델 적용 연구사례가 있다. Kim et al. (2011)은 용담호를 대상으로 EFDC 모델을 이용하여 태양복사 분포, 하상 초기온도, 활성 하상 수온층 깊이, 열전달계수 등 태양 에너지와 관련된 매개변수를 조정함에 따라 수체 내 수온성층결과를 비교 분석하였으며, Jeon et al. (2011)은 새만금호 수역을 대상으로 EFDC 모델을 구축하여 수리, 수질 예측에 활용하였다. 그러나, 대부분의 선행연구들은 수온 및 수리 해석과 이화학적 수질지표를 대상으로 예측, 분석하는데에 그쳤으며, 조류 그룹별 생체량을 대상으로 한 연구는 드물다. Chong et al. (2015)은 영산강 수계 승촌보를 대상으로 조류 배제를 위한 다기능보 운영 사례 효과 분석을 위해 ELCOM-CAEDYM 모델을 적용하였으나, 모의대상 조류를 단일종으로 해석하였다. 최근 Kim et al. (2016)은 QUAL2K 모델을 사용하여 방류량 조건에 따른 수질 개선효과 분석을 수행하였고 Kim et al. (2018)은 EFDC 모델을 사용하여 한강을 대상으로 모델을 구축하고 오염물질 유출사고 시나리오 모의를 수행하여 오염물질의 거동 및 취수장에 대한 영향을 분석하였다. 그러나, 이와같은 선행연구들 역시 이화학적 수질 지표항목에만 한하여 연구를 수행하였다. 본 연구의 선행연구에 해당하는 Park et al. (2019)은

강정고령보를 대상으로 2017년 실험자료를 이용하여 EFDC 3차원 수리수질 모델을 보정하고, 보 수위 저하운영에 따른 수질과 조류 군집별 생체량 변화를 해석하였다. 연구결과, 보 운영 수위를 기존의 관리수위(EL, 19.44m)에서 하한수위(EL, 14.9m)로 하향 운영할 경우, Chl-a 농도와 조류 군집별 밀도수가 감소하는 것을 확인하였다.

본 연구의 목적은 낙동강에 위치한 칠곡-강정고령보 구간을 대상으로 Park et al. (2019)이 선행연구에서 2017년 실험 자료로 보정한 EFDC 모델을 2018년 실험 자료로 검증하고, 보 구간의 유량 조절과 유입수 인 부하 농도의 변화가 수질 및 조류 생체량에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 또한 다양한 수위와 유량조건에서 보 구간의 수온성층 구조의 변화를 해석하였다. 선행연구(Park et al. 2019)에서는 보의 운영수위 변화에 따른 조류 군집별 생체량의 변화를 규명하였으며, 본 연구에서는 2018년 실험자료를 이용하여 모델을 검증하고 하천 유량 조절 및 인 부하 농도 변동에 따른 조류 군집별 생체량 변화를 해석하고자 하였다. 특히, 2017년과 2018년은 월별 강우의 패턴이 매우 상이하여 조류 군집별 천이 특성과 녹조 발생 기간 동안 남조류의 우점종이 상이하게 나타나 모델의 검정이 꼭 필요한 상황이었다. 즉, 2017년의 경우, 4월과 5월의 강우량이 적어 남조류(우점종 Apahanizomenon)가 6월부터 우점하기 시작한 반면, 2018년에는 5월과 6월의 강우량이 많고 7월중순에서 8월말까지 강우량이 적고 폭염이 지속되어 남조류(우점종 *Microcystis*)는 7월말부터 우점하기 시작하였다. 본 연구결과는 낙동강 보 구간의 녹조 제어 대책으로 시행되고 있는 수리학적 제어와 인 부하량 저감 효과를 평가하는데 필요한 정보를 제공한다.

II. 연구방법

1. 연구대상지역

연구의 대상지역은 연중 녹조 발생이 빈번한 낙동강 중류에 위치한 칠곡-강정고령보 구간(약 25.2 km)이다. 강정고령보의 면적은 11,667 km², 총 저수용량은 92,30백만 m³, 보 높이는 11.5 m, 보의 길이

는 953.5 m의 규모이다. 보는 소수력 발전으로 전력을 생산하고 있으며, 관리수위는 EL. 19.50 m, 하한수위는 EL. 14.90 m로 운영되고 있다. 대상 구간 내에는 죽곡정수장이 위치하고 있으며, 지류하천으로는 백천과 하빈천이 유입된다(Figure 1).

2. 모델구축

1) 3차원 수리 해석 모델

칠곡-강정고령보 구간의 수리 및 수질 수치모의는 Park et al. (2019)이 선행연구에서 2017년 실험 자료로 보정한 3차원 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 모델을 사용하였으며, 본 연구에서는 2018년 실험자료를 이용하여 모델을 검증하였다. EFDC 모델은 수리, 수질을 모의할 수 있는 3차원 모델로서 이번 연구에서는 DSI (Dynamics Solutions International)에서 개발한 EFDC+ Version을 사용하였다. EFDC 모델은 하천이나 호소, 해양, 하구 등에 적용 가능하며, 입자추적해석, 3차원 수리 수질 해석, 유사수송해석 등에 사용된다. EFDC 모델의 지배방정식에 대한 특성은 참고문헌(Hamrick 1992, Tetra Technologies incorporated 2007a, 2007b, 2007c)에 자세히 제시되어 있기에 본 논문에서는 지면 관계상 생략한다.

2) 지형자료

모델의 수치격자 구성을 위한 지형자료는 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009)에서 측량한 낙동강 하천단면자료를 사용하였다. CVL-GRID 수치격자 생성 프로그램을 사용하여 강정고령보의 격자를 구성하였으며, 수치격자는 수심에 따라 레이어 개수를 다르게 생성하여 성층해석에 유용한 Sigma-Z grid 방법을 적용하였다(Craig 2014). 모델 수평격자의 Cell 수는 894개, 수직격자의 Layer 수는 각각 2-10개, 직교성은 1.45° (-17.42° ~ 14.83°)로 구성하였다(Figure 2). 모델의 계산간격은 수위변화율(dH / dT)에 따라 Time Step이 유동적으로 변하는 기능인 Dynamic Time Step을 사용하였다.

3) 초기조건 및 경계 조건

모델의 검증기간은 2017년 실험기간과 동일한 2018년 4월17일~10월31일까지로 하였으며, 수위, 수온, 수질 순으로 검정을 실시하였다. 수위, 수온 및 수질항목에 대한 모의 초기조건은 강정고령보의 수위 및 다사측정망(W2 지점, Figure 1) 자료를 사용하여 모의시작 시점에 맞추어 입력하였다.

경계조건은 기상, 유량경계조건이 있으며, 기상경계조건은 기상청 대구 종합관측기상대 자료를 수집하

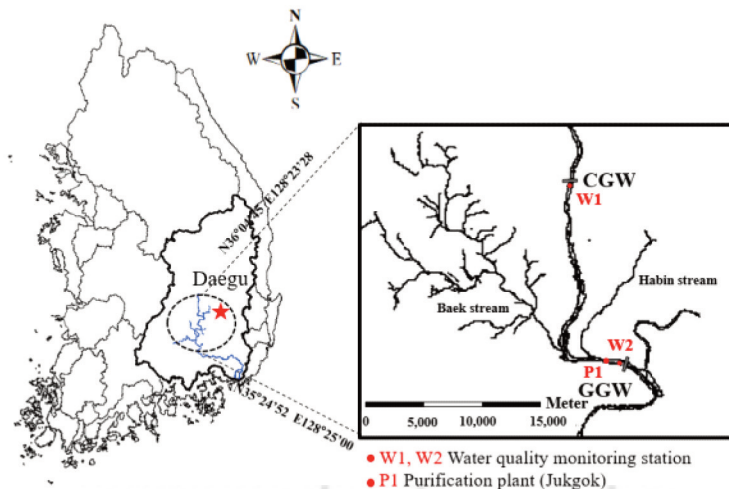


Figure 1. Locations of the study site and weirs; Chilgok Weir (CGW) and Gangjeong-Goryong Weir (GGW).

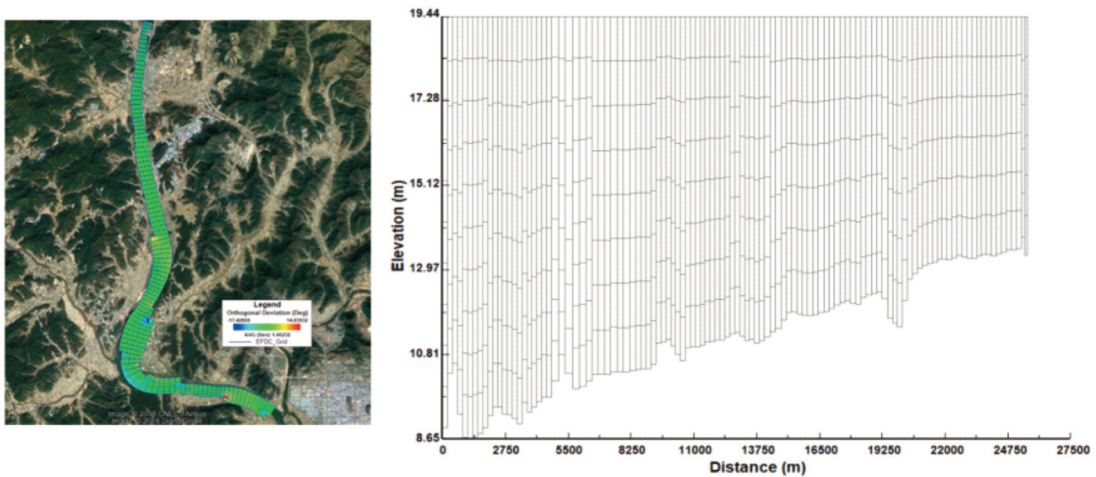


Figure 2. Orthogonal curvilinear (left) and sigma-Z (right) grid used in simulations.

여 기온(°C), 증발량(m/day) 등 9개 항목에 대해 입력하였으며, 유량경계조건은 K-water 강정고령보 수문자료를 이용하여 물수지분석을 통해 칠곡 유입량을 산정하고 지류하천 유입량은 유역 면적비를 고려하여 산정하였다. 상류경계조건의 수온 및 수질입력자료는 물환경정보시스템과 실시간수질정보시스템의 왜관(W1 지점, Figure 1) 측정망 자료를 사용하였고 지류하천 역시 각각의 측정망 자료를 사용하여 구성하였다.

본 연구에서 사용한 EFDC 모델의 매개변수는 Park et al. (2019)의 선행연구에서 보정한 매개변수를 대부분 사용하였으나, 조류 군집별 최대성장 속도

와 세포수 당 Chl-a 함량은 2018년 자료에 맞게 다시 산정 하였다(Table 1). 일반적으로 수질모델링 과정에서 모델의 검정 과정은 보정 과정에서 결정된 매개변수를 그대로 적용하지만, 조류 군집별 모의에서는 해마다 조류 발생 패턴과 우점하는 조류 종이 상이하여 동일한 매개변수를 적용하는 것은 현실성이 없다. 특히, 조류 군집별 세포수 당 Chl-a 함량의 경우 동일한 남조류라고 하더라도 우점하는 조류 종에 따라 다를 수 있기 때문에 실험결과를 이용하여 다시 산정하는 것이 더 합리적이다. 따라서, 연구대상 지역에서 2017년과 2018년은 월별 강우량과 조류의 종

Table 1. Calibrated model parameter values for each algae group

Parameter	Cyanobacteria	Diatom	Green	Units
Maximum Growth Rate	1.75	1.25	1.75	/d
Optimal Minimum Temperature	20	17	15	°C
Optimal Maximum Temperature	40	20	30	°C
Predation Rate	0.07	0.04	0.1	/d
Basal Metabolism Rate	0.05	0.05	0.05	/d
Nitrogen Half-Saturation	0.04	0.04	0.04	mg/L
Phosphorus Half-Saturation	0.002	0.002	0.002	mg/L
Settling Velocity	0	0.1	0.1	m/d
Chl-a / Cell	2.0E-07	3.07E-06	3.55E-07	µg/cell
Carbon : Chlorophyll	0.025	0.025	0.025	mgC/µgChla
Background Light Extinction coefficient	0.305			/m
Light Extinction due to Chlorophyll	0.01			/m per mg/L
Chlorophyll Light Extinction Exponent	1			-

별 출현 패턴이 달라 일부 조류 관련 매개변수를 변경하여(Table 1) 선행연구 Park et al. (2019)와 동일하게 수질 및 조류 그룹별 항목에 대해 검정하고 유량 및 인부하 변동 시나리오 분석을 수행하였다.

모델의 재현성은 모의결과와 실측 수온, 수질, 조류 자료를 그래프와 통계적 지표로 비교·평가하였다. 실측자료는 환경부에서 제공하는 2018년 조류데이터의 수가 현저히 부족하여 K-water의 “과학적 녹조 발생 원인 및 천이기작 분석연구 2차년도” 연구에서 수집한 다사, 백천, 하빈천 지점의 수질측정망 자료를 추가로 사용하였다(K-water, 2018). 그리고 K-water에서 수집한 10분 단위 고빈도 수온데이터(High Frequency Data)를 제공받아 모델의 수온 검정에 사용하였다. 또한 Park et al. (2019)에서 보정한 것과 동일하게 K-water(2018)에서 제공한 강정고령보의 수온, DO, 수질 등 11개 항목에 대해 실측값과 모의값을 시계열로 비교하였다. 실측값과 모의값의 오차에 대한 통계지표는 RMSE (Root Mean Square Error), AME (Absolute Mean Error)와 MAPE (Mean Absolute Percentage Error)를 사용하였으며, RMSE와 AME는 변량과 동일한 단위를 가지며 0 값에 가까울수록, 그리고 MAPE는 0%에 가까울수록 모델의 예측 성능이 높은 것으로 평가된다.

3. 시나리오 구성

1) 수위, 유량 및 유입수 인부하 변동에 따른 시나리오 분석

검정한 EFDC 모델로 유량, 수위변화에 따른 성층 변화와 유량조절과 유입수 인부하 변동에 따른 수질 및 조류그룹별 생체량 변동 특성을 분석하기 위해 모의 시나리오를 구성하였다(Table 2).

성층변화 시나리오는 유량과 수위를 상·하향 조정하여 9가지 시나리오(TS1-TS9)로 구성하였으며, 수위는 강정고령보의 운영수위 별로 관리수위(EL, 19.5 m), 지하수 제약수위(EL, 17.8 m), 하한수위(EL, 14.9 m) 기준으로 나누었으며, 유량은 Kim et al. (2017)에서 수행한 시나리오와 동일하게 2018년 실측유량을 Q로 하여 1.5배 (1.5Q), 2배 (2Q)로 늘려가며 모의하였다. 2018년도의 성층이 강한 시기를 선정하여 상·하층간의 온도차 분석으로 수온성층변화를 분석하였다. 또한 유량조절 시나리오(DIS1-DIS3)는 2018년 운영수위(EL, 18.32 m) 기준으로 유량만을 Q, 1.5Q, 2Q로 상향조정하여 구성하였다. 유입수 인부하 변동시나리오(IP1-IP3)는 운영수위(EL, 18.32 m)와 유량 Q 조건에서 인 농도만을 현재 농도 조건 (1C), 25% 저감(0.75C), 50% 저감(0.5C) 수준으로

Table 2. Simulation scenario according to water levels, flow rates and inflow phosphate concentration variations

Scenario	Water level	Flow rate	Inflow phosphate	
Water level and flow control	TS1	EL, 19.50 m	1.0Q	1.0C
	TS2	EL, 17.80 m	1.0Q	1.0C
	TS3	EL, 14.90 m	1.0Q	1.0C
	TS4	EL, 19.50 m	1.5Q	1.0C
	TS5	EL, 17.80 m	1.5Q	1.0C
	TS6	EL, 14.90 m	1.5Q	1.0C
	TS7	EL, 19.50 m	2.0Q	1.0C
	TS8	EL, 17.80 m	2.0Q	1.0C
	TS9	EL, 14.90 m	2.0Q	1.0C
Flow control	DIS1	EL, 18.32 m	1.0Q	1.0C
	DIS2	EL, 18.32 m	1.5Q	1.0C
	DIS3	EL, 18.32 m	2.0Q	1.0C
Phosphate reduction	IP1	EL, 18.32 m	1.0Q	1.0C
	IP2	EL, 18.32 m	1.0Q	0.75C
	IP3	EL, 18.32 m	1.0Q	0.50C

단계별로 낮추어 시나리오를 구성하였다. 여기서 1C 시나리오는 2018년 조사기간 동안 강정고령보의 평균 인 농도 0.056 mg-P/L에 해당하며, 0.5C 시나리오 는 미국 EPA (Environmental Protection Agency) 가 정의한 부영양화 임계점 농도인 0.02 mg-P/L (Kim et al, 2003)에 가까운 수준이다.

III. 결과 및 고찰

1. 모델 검정 결과

1) 수위와 수온 검정

선행연구에서 보정된 EFDC 모델의 검정을 위해 수위, 수온, 수질, 조류 순으로 실측자료와 오차를 비교하고 모델의 성능을 평가하였다. 모델의 예측수위와 실측수위 비교결과, RMSE 0.08 m, AME 0.04 m, MAPE 0.2% 로써 실제 강정고령보 수체의 수위 변화를 잘 재현하여 모델에서 사용한 지형자료와 물 수지 해석 신뢰도는 비교적 높은 것으로 평가하였다 (Figure 3).

수온항목의 검정 및 수온성층 재현성을 판단하기 위해 2018년 강정고령보 상류지점에서 10분단위로 측정된 수심별(상, 중, 하) 고빈도 수온 측정자료와 EFDC 모델의 수심별(Layer1~10) 모의값을 Profile 로 비교하여 Figure 4에 제시하였다. 고빈도 수온 측정자료는 2018년도 보 개방으로 인한 불규칙한 방류 패턴 등의 이유로 측정을 하지 못한 기간이 다소 길어

봄, 여름철의 기간에 한해서 가용한 자료를 활용하여 4월 20일(a)~6월 20일(h)에 대하여 일자별로 비교분석하였다. 모의결과는 일자별, 수심별로 실측값과 편차가 다소 보였지만, 대체적으로 수온성층 구조를 잘 재현해 내었으며 수온 성층기간에 상하층의 온도 변화를 적절히 모의하는 것을 확인할 수 있다. 보 구간 수온의 시계열 변동 특성에 대한 모의 결과를 평가하기 위해 모델의 수심평균 수온값을 출력하여 다사측정망의 수온 측정자료와 Time series로 비교하였다 (Figure 5). 모델은 실측값과의 RMSE와 AME가 각각 1.00°C, 1.34°C였으며, MAPE는 4.6%로써 수체의 시간에 따른 수온 변화를 잘 재현하였다.

2) 수질 및 조류 검정 결과

수질 및 조류 그룹별 항목에 대한 모의결과를 실측값과 함께 시계열로 도시하고 오차분석을 실시하였다 (Figure 5). 실측자료는 물 환경정보시스템의 다사측정망의 자료와 K-water에서 수집한 강정고령보 상류 500m 지점 중앙 수심평균 자료를 이용하였고(K-water, 2018), 동일지점에서 수심평균 모의값과 비교하였다.

검정결과, DO는 AME 1.21 mg/L, RMSE 1.67 mg/L, MAPE 14.8 %, TOC는 AME 0.885 mg/L, RMSE 1.092mg/L, MAPE 16.7 %로써 실측값을 적절히 재현하였다. 인 계열인 TP와 PO₄-P 항목에서는 각각 AME 0.017, 0.017 mg/L, RMSE 0.024,

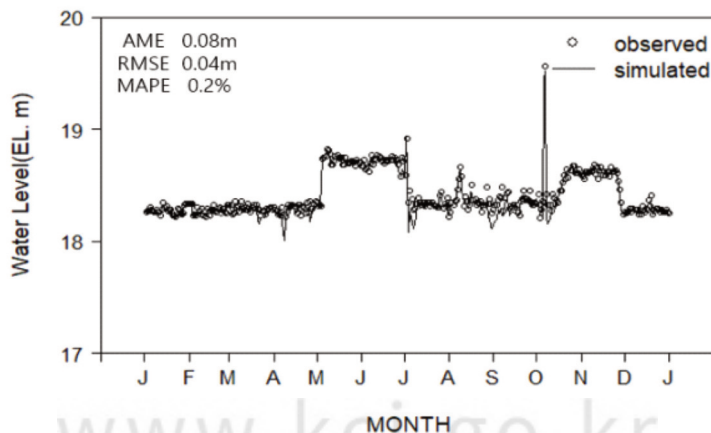


Figure 3. Comparison of simulated water level with observed data in 2018.

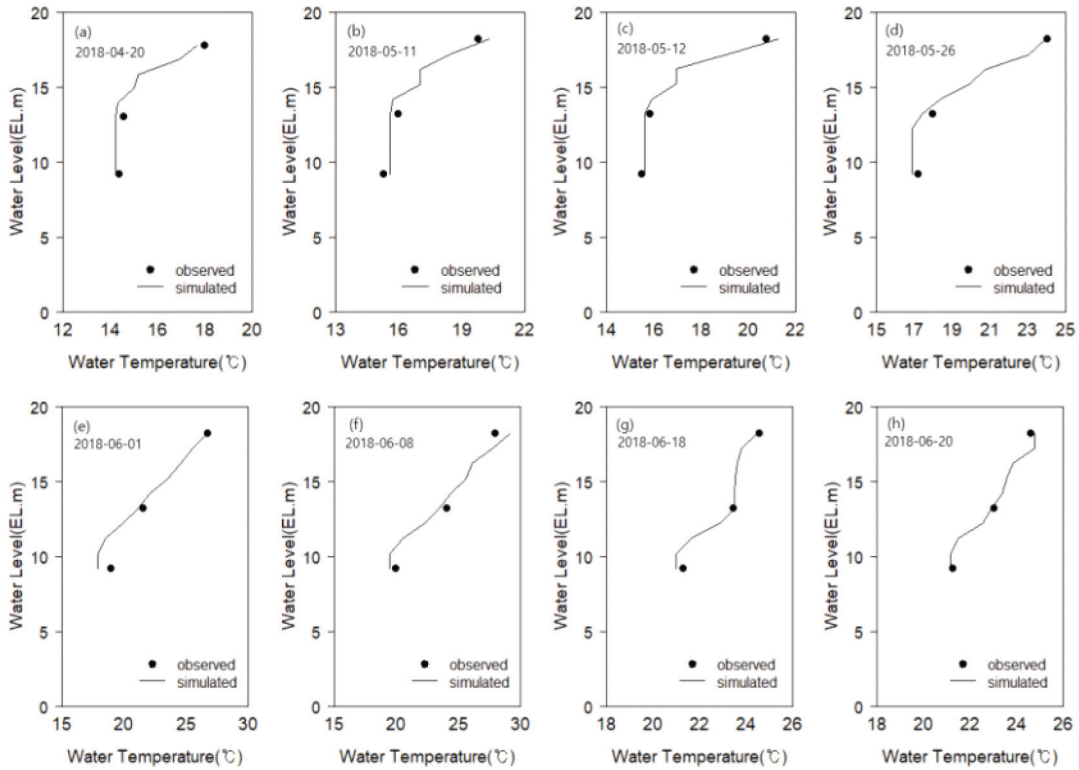


Figure 4. Comparison of simulated and observed water temperature by depth.

0.022 mg/L, MAPE 30.6, 10.6 %였으며 시계열 변동특성을 잘 재현해내었으며, 질소 계열인 TN, NH₄-N, NO₃-N 항목에서는 각각 AME 0.21, 0.052, 0.21 mg/L, RMSE 0.27, 0.065, 0.27 mg/L, MAPE 8.5, 78.4, 11.9 %로써 NH₄-N을 제외한 모든 항목에서 실측값을 적절히 재현하였다. 하지만, Chl-a, Cyanobacteria, Diatom, Green algae 항목에 대한 오차 통계값은 각각 AME 10.83 mg/m³, 8.524, 2.561, 8.391 cells/mL, RMSE 16.23 mg/m³, 16,909, 3,313, 12,096 cells/mL로 실측값을 과대평가 하는 경향을 보였다. 전반적으로 DO, 유기물, 인과 대부분의 질소계열 항목과 같은 이화학적 수질지표에 대해서는 시계열 변동특성을 적절히 잘 재현하였지만, 조류 그룹별 생체량 예측에 있어서는 계절별 변동 특성은 적절히 재현하였으나, 일부기간에 실측값과 편차가 크게 나타났다. 일반적으로 대상 수체는 봄과 가을에 규조류가 우점하고 여름철에는 녹조류와 남조류가 우점하는 특성을 보이며, 강우 발생 시 조

류 밀도가 급격히 감소하는 현상이 나타난다. 모의 결과는 이러한 조류 그룹의 계절별 천이특성은 적절히 반영하였으나, 여름철 7월말-8월초 일부기간에 남조류가 급격히 증가하는 현상을 적절히 재현하지 못하였다. 이 기간 동안 Chl-a와 남조류 밀도가 급격히 증가하면서 NH₄-N의 농도가 급격히 감소되는 현상이 나타났으나, 모델은 이를 제대로 모의하지 못하여 NH₄-N의 MAPE가 78.4%로 높게 나타났다. 이러한 결과는 시간적·공간적으로 충분하지 않은 실측 조류 자료와 매개변수를 이용한 조류 군집별 예측 모델링의 한계로 해석된다. 조류 군집별 세포 밀도 예측 오차의 요인은 다양하며, 상류 유입경계에서 조류 그룹별 실측자료 부족, 조류 관련 매개변수들의 불확실성, 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 포식관계 미포함 등이 포함된다. 특히, 강우시 수질과 조류 밀도 측정자료가 충분히 모델의 경계조건에 반영되지 못한 것도 주요한 오차 발생 요인에 해당한다.

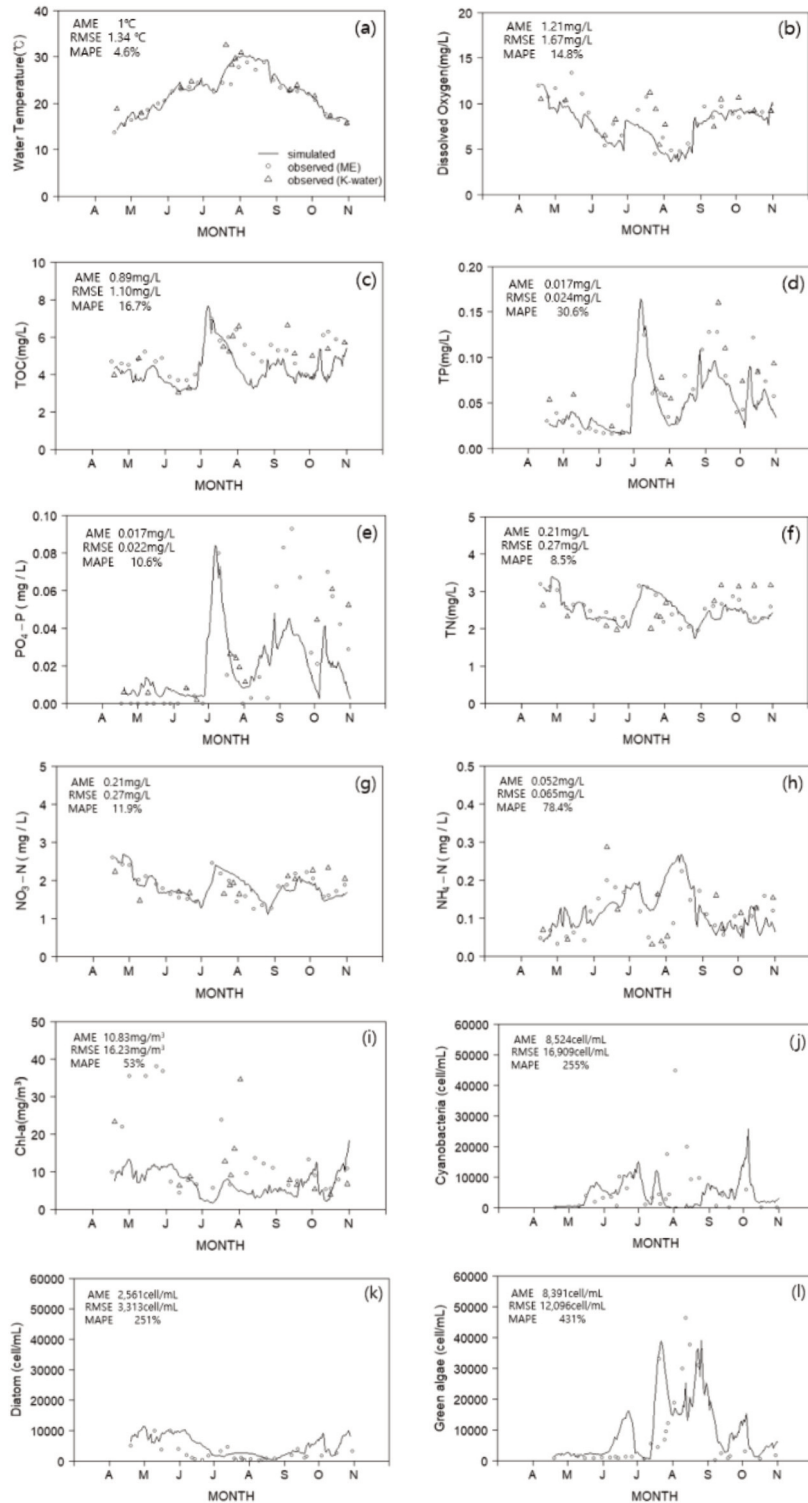


Figure 5. Comparison of simulated water quality concentration and cell density of each algae group with observed data.

3. 시나리오 분석

1) 유량 및 수위시나리오에 따른 성층 변동패턴 분석

강정고령보 상류 500m 지점에서 발생한 수온성층을 완화 및 해소하기 위해 유량과 수위를 증감시키면서 성층강도의 변화를 분석하였다(Figure 6). 유량의 변화 없이 수위만 낮추었을 경우 1Q 조건에서 5월 11일(Figure 6(a))과 6월 1일(Figure 6(c))의 경우에는 표층 수온이 0.14~0.22 감소한 반면, 5월 12일(Figure 6(b))과 6월 8일(Figure 6(d))에서는 표층 수온이 오히려 0.19~1.15℃ 증가하였다. 하천 구간의 수온은 상류 유입수온과 수심, 그리고 체류시간동안의 복사열

등에 의해 결정되므로 이러한 상반된 결과는 해당 일의 유입수 수온과 체류시간의 차이 때문으로 보인다. 1.0Q 유량조건(TS1-TS3 시나리오)에서 수위 저하 시나리오는 상·하층간의 온도차(ΔT)를 약간 감소시키는 효과는 있지만, 수온성층이 해소되지 않고 여전히 강한 성층구조가 유지되었다. 1.5Q 유량조건(TS4-TS6 시나리오)의 경우, 수위를 낮출수록 ΔT 는 0.32~6.99℃까지 감소하면서 성층이 TS1-TS3에 비해 완화되거나 해소되었다. 2.0Q 유량조건(TS7-TS9 시나리오)의 경우에는, 수위를 낮출수록 ΔT 는 0.04~6.08℃까지 감소하면서 더욱 성층강도를 완화시키고 일부 해소하였다. ΔT 가 5.6℃ 이하인

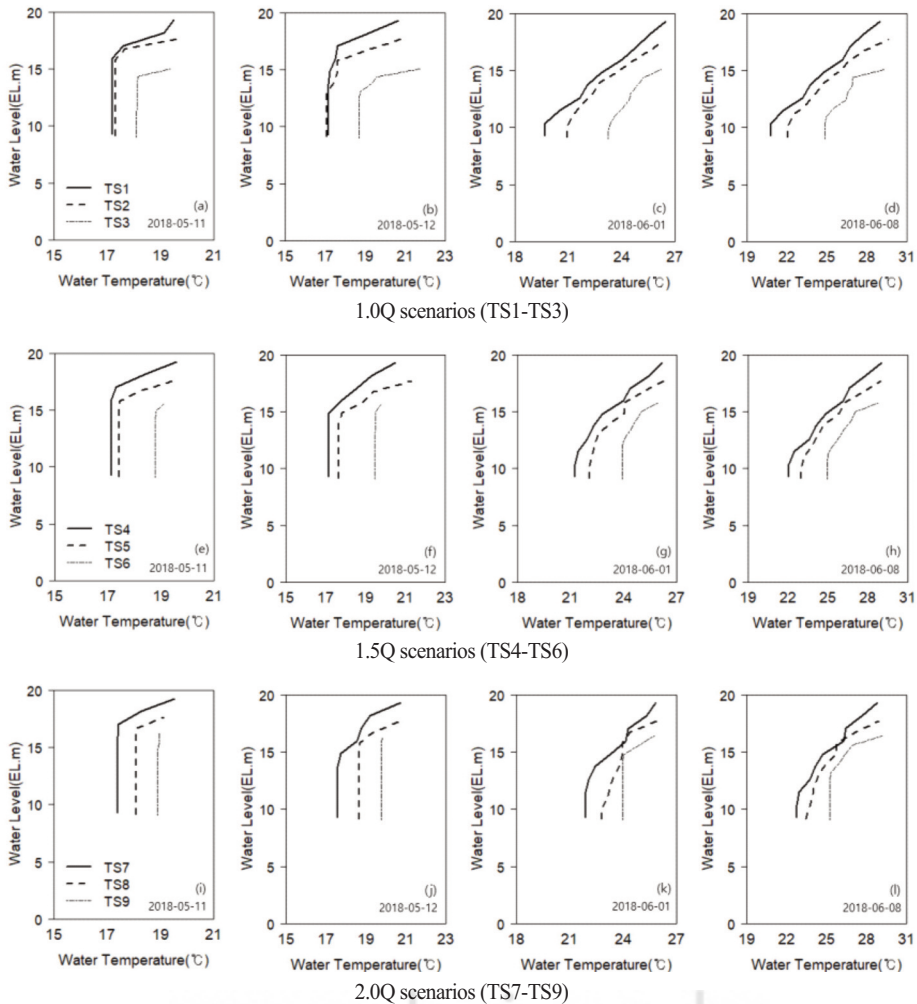


Figure 6. Simulated water temperature profiles on the selected dates according to the flow rate and water level scenarios: (a)-(d) 1.0Q, (e)-(h) 1.5Q, (i)-(l) 2.0Q.

5월에는 Figure 6(i)와 Figure 6(j)와 같이 수위가 저하될수록, 유량이 증가될수록 수체의 ΔT가 1℃ 이하로 떨어지면서 수온성층이 완전히 파괴되었다. 이때 유량은 192.61 m³/s, 181.76 m³/s로 흘렀으며, 수위는 EL. 16.06 m, EL. 16.12 m, 수심 평균유속은 0.1 m/s, 0.095 m/s 로 분석되었다. 하지만, ΔT가 8.8℃ 이상으로써 수온성층강도가 큰 6월의 경우(Figure 6(k), Figure 6(l)), 수위를 저하시키거나 유량을 증가시키어도 불구하고 ΔT가 여전히 1℃ 이상으로 수온성층이 유지되고 있다. 6월인 Figure 6(k)와 Figure 6(l)의 TS9 시나리오일 때 유량은 33.70 m³/s, 37.17 m³/s로써 5월보다 유량이 적었으며, 수위는 EL. 15.31 m, EL. 15.32 m, 수심 평균유속은 0.052m/s, 0.055m/s로 분석되었다. 보 구간의 성층해소에 필요한 적정유량과 임계유속은 수체의 수심과 성층강도에 따라 차이가 있지만, 본 연구에서 강정고령보 구간의 수온성층 해소에 필요한 임계유속은 대략 0.1 m/s로 판단된다. 이러한 결과는 Kim et al.(2017)이 금강의 백제보 구간에서 수온성층 해소에 필요한 임계유속으

로 제시한 0.1 m/s과 잘 일치한다.

2) 유량조절에 따른 체류시간 감소와 유입수 인농도 감소로 인한 조류 저감 효과분석

강정고령보의 유량과 유입수 인농도를 상·하향 조정함에 따라 이화학적 수질 지표항목과 조류 그룹별 항목간의 변동특성 분석을 위해 시나리오를 수행하였다. 비교분석 지점은 강정고령보 상류 500m 다사 측정망 부근으로 선정하였으며, 각 시나리오간의 값이 차이가 있는지 통계적 유의성을 판별하기 위해 정규성 유무에 따라 T-test, Wilcoxon signed-rank test를 수행하였고(Table 3) 시나리오간의 각 항목별로 최소값(Min), 최대값(Max), 중위값(Median), 평균값(Average), 표준편차(St.dev), 변동율(% Change)을 제시하였다(Table 4-5). 또한 상류경계조건 수질농도가 유량시나리오 결과에 미치는 영향을 나타내기 위하여 함께 boxplot으로 시각화하였으며(Figure 7), 유입수 인부하 변동시나리오도 함께 시각화하였다(Figure 8). 유입수 인부하 시나리오인 인(P)이 조

Table 3. Wilcoxon signed-rank test, and median difference of water quality variables according to scenarios of flow rate and inflow phosphate load

Items	Wilcoxon signed-rank test ^{(a),(c)}		Wilcoxon signed-rank test ^{(b),(d)}	
	p-value	Median difference	p-value	Median difference
Flow rate				
Water temperature	p < 0.05	-0.25 mg/L	p < 0.05	-0.29 mg/L
DO		-0.22 mg/L		-0.29 mg/L
TOC		-0.06 mg/L		-0.11 mg/L
TN		-0.011 mg/L		-0.011 mg/L
NH ₄ -N	0.7432	0.000 mg/L	0.8855	0.004 mg/L
NO ₃ -N	p < 0.05	0.028 mg/L	p < 0.05	0.025 mg/L
TP		-0.0024 mg/L		-0.0046 mg/L
PO ₄ -P		-0.0015 mg/L		-0.0035 mg/L
Chl-a		0.97 mg/m ³		1.49 mg/m ³
Depth-averaged cyano	p < 0.05	-10 cell/mL	p < 0.05	-550 cell/mL
Depth-averaged diatom		782 cell/mL		1,274 cell/mL
Depth-averaged green		1,020 cell/mL		1,060 cell/mL
Surface cyano		-503 cell/mL		-593 cell/mL
Surface diatom	464 cell/mL	769 cell/mL		
Surface green	0.8459	660 cell/mL		580 cell/mL
Depth-averaged velocity	p < 0.05	-0.019 m/s	p < 0.05	-0.039 m/s
Surface velocity		-0.023 m/s		-0.039 m/s

Table 3. Continued

Items	Wilcoxon signed-rank test ^{(a), (c)}		Wilcoxon signed-rank test ^{(b), (d)}	
	p-value	Median difference	p-value	Median difference
Inflow phosphate load				
Chl-a	p < 0.05	0.51 mg/m ³	p < 0.05	1.27 mg/m ³
Depth-averaged cyano		580 cell/mL		1,100 cell/mL
Depth-averaged diatom		100 cell/mL		347 cell/mL
Depth-averaged green		970 cell/mL		2,330 cell/mL
Surface cyano		120 cell/mL		1,100 cell/mL
Surface diatom		34 cell/mL		88 cell/mL
Surface green		1,076 cell/mL		2,487 cell/mL

^{a)} test between flow rate DIS1 vs. DIS2, ^{b)} test between flow rate DIS1 vs. DIS3

^{c)} test between inflow phosphate IP1 vs. IP2, ^{d)} test between inflow phosphate IP1 vs. IP3

류성장에 대한 어떠한 제한요인으로 작용하는지를 파악하기 위해 Phosphate Liming Factor에 대해서도 Boxplot과 Time series로 시각화하였고(Figure 9) 시, 공간적인 Chl-a 분포를 분석하였다(Figure 10).

시나리오 분석에 고려된 변수들의 정규성 검정결과, 모두 p-value < 0.05 로 정규분포를 따르지 않는 비정규분포를 나타냈다. Wilcoxon signed-rank test 분석결과, DIS2 시나리오는 NH₄-N, 수심평균 및 표층 녹조류 밀도, DIS3 시나리오는 수심평균 녹조류 밀도 항목을 제외한 모든 항목에서 DIS1과 차이가 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다. DIS3 시나리오에서 수온, DO, TOC, TP, PO₄-P, 수심평균 및 표층 남조류 세포수 밀도, 수심평균 및 표층 유속 항목이 증가하는 경향을 보였고 TN, NH₄-N, NO₃-N, Chl-a, 수심평균 및 표층 규조류와 녹조류 세포밀도 항목이 감소하는 경향을 나타내었다. 유량을 상향 조정함에 따라 체류시간이 감소하여 TP 침강 제어효과 감소에 의해 TP의 농도가 증가된 것으로 해석할 수 있으며, 질소계열(TN, NH₄-N, NO₃-N)의 경우 제거기작이 없어 유량 상향조정 경우 농도의 변화가 거의 없거나 약간 감소하였다.

유량 2.0Q 조건인 DIS3 시나리오에서 Chl-a 농도는 8.7% 감소효과를 보였다. DIS2와 DIS3 시나리오의 모의 유속 비교결과, DIS1 시나리오의 비해 대폭 증가하는 것으로 나타났다(Table 4). 이에 따라 규조류와 녹조류의 세포수 밀도의 저감 효과도 나타

났지만, 선행연구 결과(Sherman & Webster 1998; Mitrovic et al, 2003; Park et al, 2019)와 달리 남조류 세포수 밀도는 유량이 증가하였을 때 오히려 증가하였다. 이러한 상반된 결과의 원인은 상류 경계조건의 조류 그룹별 농도에 있다. DIS3 시나리오의 경우 평균유속이 DIS1에 비해 132.9%로 급증하였으며, 상류경계조건의 높은 남조류 농도(Figure 7(j))가 하류에 그대로 영향을 미쳐 규조류와 녹조류와 달리 농도가 상승하는 결과를 초래하였다. 인 계열 항목의 농도도 같은 이유로 유량증가와 함께 보 앞 구간 농도가 증가하는 것으로 모의되었다. 반면, 상류유입 농도가 낮은 질소계열, Chl-a, Diatom, Green 항목의 경우에는 감소하였다. 이러한 결과는 하천에 설치된 보 구간의 수질과 조류 그룹별 생체량은 단순히 유량 증가에 따른 체류시간 감소만으로 저감할 수 있는 것이 아니라 상류에서 유입되는 농도의 저감이 병행되어야 함을 의미한다.

반면, IP 시나리오의 경우, 인 농도를 하향조정함에 따라 Chl-a와 모든 조류 그룹의 세포수 밀도는 모두 감소하였다(Figure 8). Chl-a 농도는 IP1 조건 대비 IP2 시나리오에서 5.6% 감소, IP3 시나리오에서는 13.6% 감소효과를 보였다(Table 5). 조류성장에 대한 인 제한인자 분석결과, IP 시나리오에서 유입수의 인 부하농도를 하향 조정할수록 조류성장 limiting factor 값이 더 작아졌다(Figure 9(a)). limiting factor (P) 값은 0에 가까울수록 제한요인으로 크게 작용하

Table 4. Basic statistics of simulation results according to flow rate scenarios

Item	Scenario	Min	Max	Median	Average	Std.dev	% Change
Water temperature	DIS1	14.27	30.61	23.17	22.98	4.39	
	DIS2	14.33	31.16	23.42	23.27	4.50	1.2
	DIS3	14.60	31.46	23.46	23.40	4.54	1.8
DO	DIS1	2.90	12.11	8.11	7.55	2.09	
	DIS2	2.67	12.06	8.33	7.85	1.98	4.0
	DIS3	2.89	12.01	8.40	7.98	1.91	5.7
TOC	DIS1	3.15	8.82	4.47	4.66	1.14	
	DIS2	3.24	8.74	4.53	4.73	1.10	1.6
	DIS3	3.42	8.85	4.58	4.78	1.07	2.6
TN	DIS1	1.686	3.411	2.634	2.663	0.319	
	DIS2	1.744	3.429	2.644	2.652	0.327	-0.4
	DIS3	1.690	3.432	2.645	2.646	0.338	-0.7
NH ₄ -N	DIS1	0.036	0.327	0.112	0.126	0.067	
	DIS2	0.035	0.338	0.112	0.124	0.067	-1.7
	DIS3	0.035	0.341	0.108	0.123	0.067	-1.9
NO ₃ -N	DIS1	1.031	2.696	2.000	1.999	0.319	
	DIS2	1.086	2.713	1.973	1.985	0.328	-0.7
	DIS3	1.038	2.708	1.975	1.977	0.338	-1.1
TP	DIS1	0.011	0.187	0.034	0.049	0.038	
	DIS2	0.012	0.184	0.036	0.051	0.037	2.9
	DIS3	0.014	0.188	0.039	0.052	0.036	5.0
PO ₄ -P	DIS1	0.001	0.095	0.008	0.019	0.021	
	DIS2	0.001	0.093	0.010	0.020	0.020	3.4
	DIS3	0.001	0.094	0.012	0.020	0.019	6.9
Chla	DIS1	1.7	20.4	7.6	8.0	4.3	
	DIS2	1.7	19.3	6.6	7.7	4.1	-4.3
	DIS3	1.6	17.5	6.1	7.3	3.9	-8.7
Depth-averaged cyano	DIS1	0	27,699	2,950	3,986	4,350	
	DIS2	0	24,267	2,960	4,473	4,643	12.2
	DIS3	1	23,168	3,500	4,799	5,019	20.4
Depth averaged diatom	DIS1	269	17,171	4,997	5,956	4,118	
	DIS2	167	16,411	4,215	5,671	4,022	-4.8
	DIS3	160	14,964	3,723	5,413	3,886	-9.1
Depth averaged green	DIS1	345	44,931	5,630	8,864	9,453	
	DIS2	327	40,986	4,610	8,700	9,011	-1.8
	DIS3	303	38,456	4,570	8,256	8,643	-6.9
Surface Cyano	DIS1	0	27,684	3,557	4,627	4,774	
	DIS2	0	27,793	4,060	5,415	5,712	17.0
	DIS3	1	34,655	4,150	5,800	6,588	25.3
Surface Diatom	DIS1	233	18,029	4,492	5,983	4,560	
	DIS2	155	17,417	4,028	5,599	4,308	-6.4
	DIS3	152	15,069	3,724	5,307	4,080	-11.3
Surface Green	DIS1	345	45,093	6,000	9,247	9,327	
	DIS2	326	52,294	5,340	9,330	9,648	0.9
	DIS3	303	48,697	5,420	8,879	9,405	-4.0
Depth-averaged velocity	DIS1	0.005	0.403	0.035	0.081	0.095	
	DIS2	0.005	0.695	0.054	0.128	0.157	58.9
	DIS3	0.006	1.250	0.074	0.188	0.247	132.9
Surface velocity	DIS1	0.002	0.443	0.061	0.102	0.100	
	DIS2	0.007	0.763	0.084	0.155	0.166	51.5
	DIS3	0.008	1.375	0.100	0.219	0.265	114.6

Table 5. Basic statistics of simulation results according to phosphate load scenarios

Item	Scenario	Min	Max	Median	Average	Std.dev	% Change
Chl-a	IP1	1.71	20.41	7.58	8.01	4.26	
	IP2	1.71	17.56	7.06	7.57	3.93	-5.6
	IP3	1.61	14.09	6.31	6.92	3.46	-13.6
Depth- averaged cyano	IP1	0	27,699	2,950	3,986	4,350	
	IP2	0	24,417	2,370	3,608	3,987	-9.5
	IP3	0	20,058	1,850	3,150	3,548	-21.0
Depth averaged diatom	IP1	269	17,171	5,000	5,955	4,117	
	IP2	258	14,813	4,900	5,711	3,791	-4.1
	IP3	254	11,938	4,653	5,318	3,323	-10.7
Depth averaged green	IP1	345	44,931	5,630	8,864	9,453	
	IP2	344	39,152	4,660	7,629	8,323	-13.9
	IP3	342	31,410	3,300	6,180	7,038	-30.3

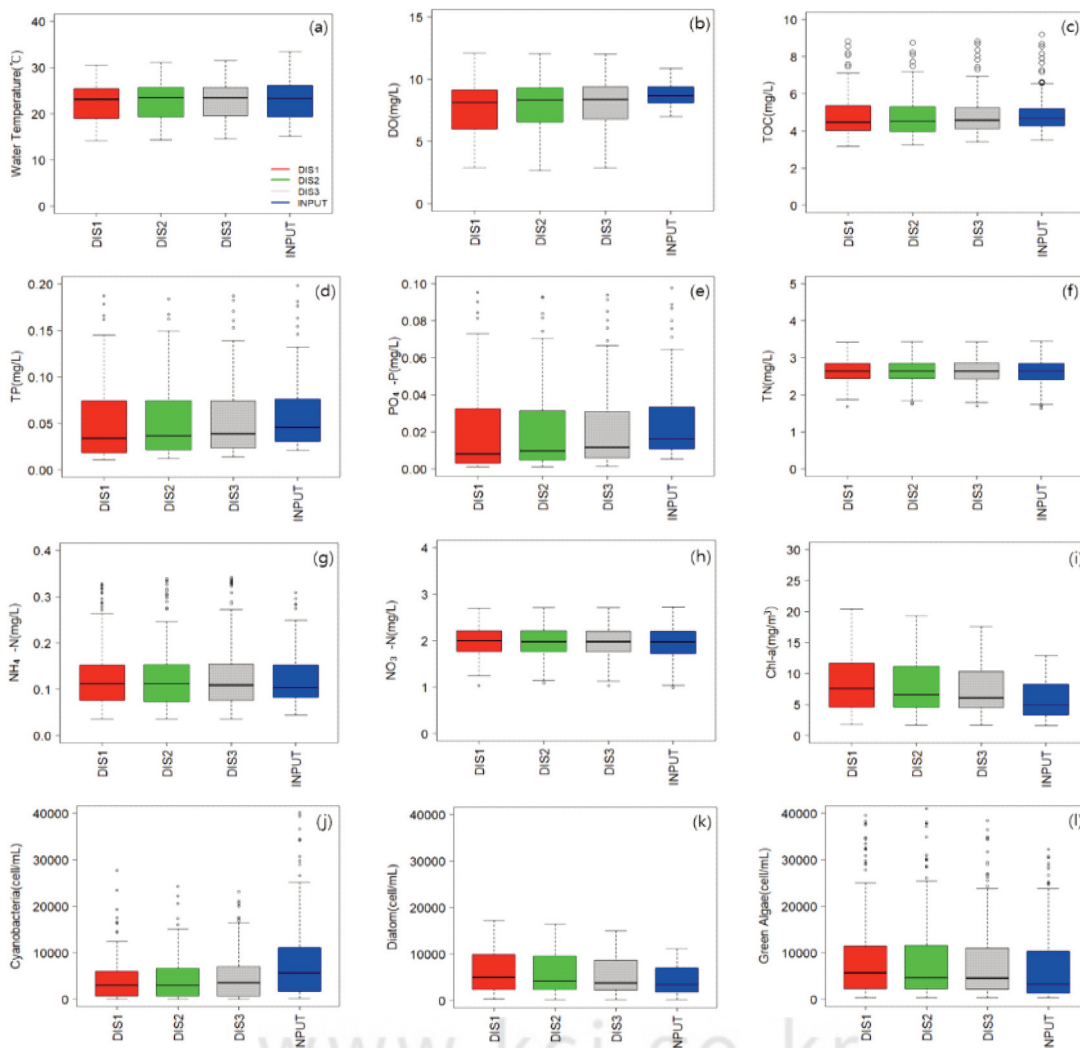


Figure 7. Comparison of water quality and algae cell density according to flow rate scenarios.

여 조류성장이 억제된다. 2018년 실험기간 동안 보 구간 모니터링 지점의 TP 평균농도는 0.056 mg/L였으며, 인의 제한인자 값은 중위값이 0.76였으나, 0.75C와 0.5C 시나리오에서는 각각 0.71과 0.63으로 낮아졌다. 그리고 인의 제한인자 값은 수온이 상승하고 조류 성장이 활발해지기 시작하는 5월말에 급격히 감소하는 특성을 보였다(Figure 9(b)).

유량조절 시나리오(DIS1-DIS3)와 인 부하량 조절 시나리오(IP1-IP3)에 따른 수심평균 Chl-a 농도의 공간별 분포를 보면 (Figure 10), 유량증가 보다 인부

하 저감이 구간 전체적으로 더 높은 저감 효과를 나타내었다. 그러나, 강정고령보 상류에서 Chl-a 농도가 가장 높은 우심 구간은 보 상류 만곡부에서 나타났으며, 우심 구간의 Chl-a 농도는 인 부하량 저감보다 유량 증가에서 더 큰 저감 효과를 보였다. 이러한 결과는 유량증가의 플러싱 효과로 볼 수 있으며, 정체수역에서의 조류 과잉성장 제어를 위해서는 유량증가가 효과적임을 시사한다.

시나리오 모의결과를 종합하면, 유량조절 조건보다 인 부하량 저감 효과가 더 높은 조류 저감효과를

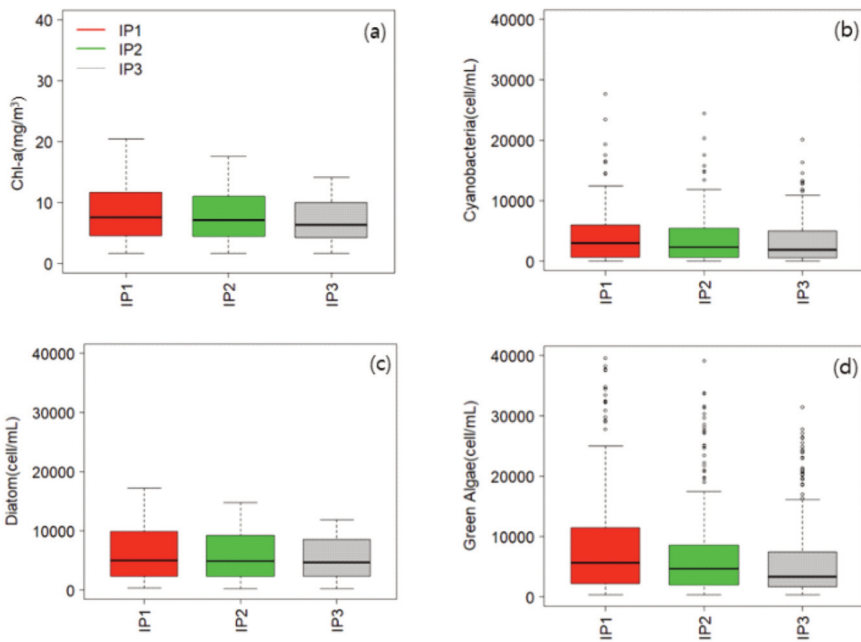


Figure 8. Comparison of algae cell density by group according to inflow phosphate loading scenario.

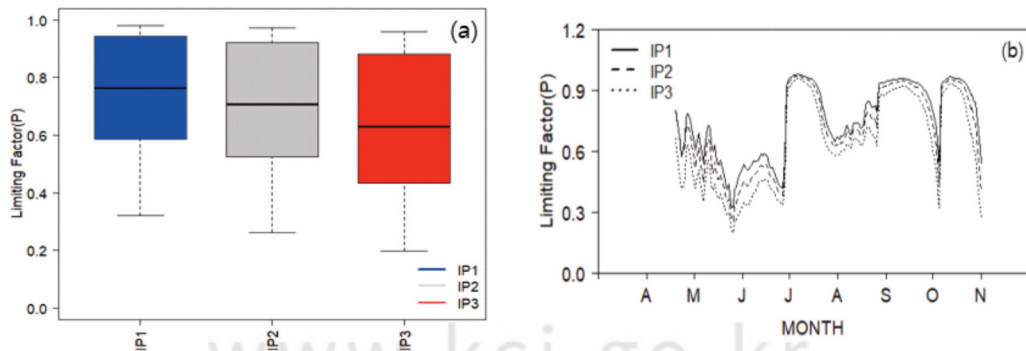


Figure 9. Phosphate limiting factor of algae growth according to inflow phosphate scenarios.

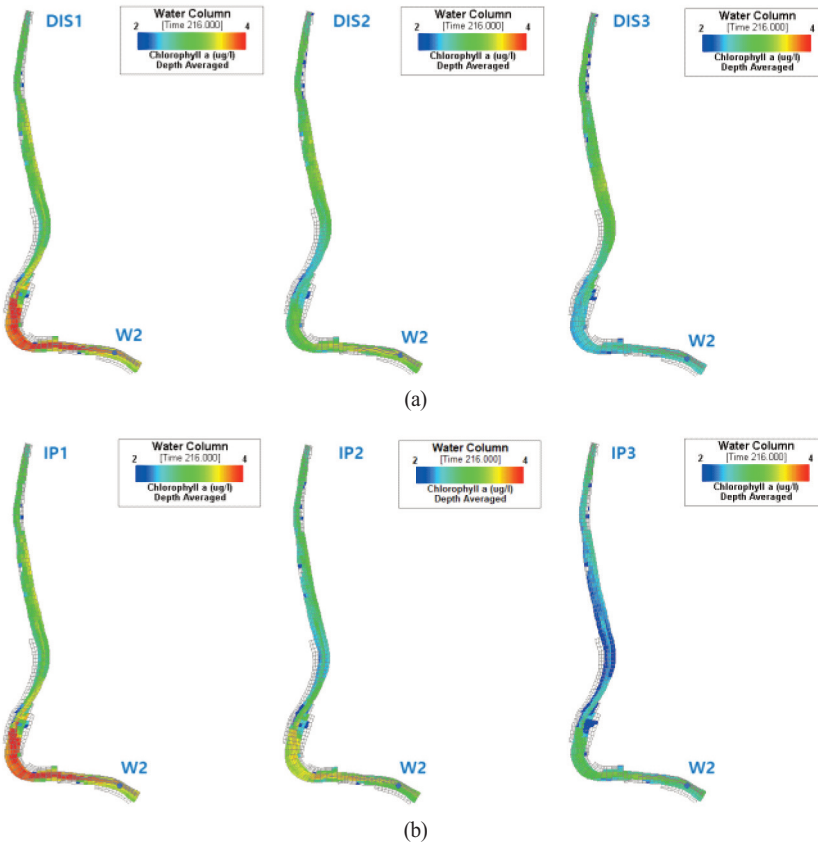


Figure 10. Spatial distribution of depth-averaged Chl-a concentration according to (a) the flow rate and (b) phosphate loading scenarios on August 4, 2018 (julian day 216).

보인 것으로 나타났으나, IP3 시나리오는 미국 EPA에서 제시한 부영양화 임계점 농도인 0.02 mg-P/L에 근접한 조건이므로 비점오염원의 기여율이 큰 낙동강 하류 구간에서 달성하기는 경제성과 기술적 측면에서 어려움이 있다. 따라서 보 구간의 녹조제어를 위해서는 수리학적 제어와 지류를 포함한 유입하천의 인 부하 저감 노력을 병행하는 대책이 필요하며, 경제성 분석을 통해 가장 경제적인 수량·수질 통합 관리방안 마련이 이루어져야 한다.

VI. 결론

본 연구에서는 낙동강 중하류에 위치한 칠곡-강정 고령보 구간을 대상으로 2018년 실측자료를 기반으로 선행연구에서 보정한 3차원 EFDC 모델을 검증하고, 보 구간의 유량에 따른 체류시간과 유입수 인능

도 변화가 수질 및 조류 그룹별 세포수 밀도 변화에 어떠한 영향을 미치는지 평가하고자 하였다. 또한 구간 내 수온 성층해소에 필요한 적정유량과 임계유속도 분석하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1) 모델 검증 결과, EFDC 모델은 강정고령보 구간의 수위와 수온의 시계열과 수직 분포, DO, 유기물, 질소, 인 계열의 시계열 변화를 적절히 모의하였다. 그러나, 조류 그룹별 생체량 예측에 있어서는 계절별 변동 특성은 적절히 재현하였으나, 일부기간에 실측값과 큰 편차가 나타났다.

2) 수위와 유량을 조절하는 시나리오 모의결과, 수위를 낮출수록 유량을 증가시킬수록 수온성층이 완화되었다. 수온성층이 완전 해소된 조건은 수위 EL, 16.06 m, 유량 181.76 m³/s, 수심 평균유속 약 0.1 m/s로 분석되었다. 이러한 결과는 금강 백제보 연구

에서 제시한 임계유속 0.1 m/s와 잘 일치한다.

3) 유량조절 시나리오 모의결과, 2Q 유량 시나리오(DIS3)에서 Chl-a는 8.7% 감소하였고 규조류와 녹조류 세포수 밀도도 감소하였으나, 남조류 세포수는 오히려 증가하였다. 그 이유는 유량이 증가함에 따라 유속이 빨라져 상류경계의 높은 남조류 농도가 하류에 직접 영향을 끼친 것으로 나타났다.

4) 유입수 인 부하 농도(평균 0.056mg/L)를 50% 수준으로 저감하는 시나리오(IP3) 모의결과, Chl-a는 13.6% 감소하였으며, 인 부하 농도를 저감할수록 조류성장 제한 인자는 감소하여 모의구간 전반에서 조류 생체량 감소 효과가 나타났다.

5) 칠곡보-강정고령보 구간에서 Chl-a 농도가 가장 높은 우심 구간은 보 상류 만곡부에서 나타났으며, 우심 구간의 Chl-a 농도는 인 부하량 저감보다 유량 증가 조건에서 더 큰 저감 효과를 보였다.

연구결과를 종합하면, 강정고령보 구간의 조류 과잉 성장을 제어하기 위해서는 수위와 유량조절과 같은 수리학적 제어와 함께 유입하천의 인 부하와 조류 농도 저감을 위한 대책을 병행하여야 하며, 비점오염 부하량의 기여율이 큰 수계 특성상 인 부하량 저감에는 많은 비용이 소요되는 경제성 문제가 있으므로 유량과 인 부하량의 적절한 통합 관리 방안 마련이 이루어져야 한다.

사사

“본 연구는 K-water (과제번호 C5201902341)와 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 18AWMP-B083066-05).” 그리고 고빈도 수온자료를 제공해주신 K-water 연구원에게 감사의 뜻을 표합니다.

References

- Alexander JH, Charles RG. 1994. *Limnology*, Singapore, McGraw-Hill.
- Craig PM. 2014. Sigma-Zed. A Computationally Efficient Approach to Reduce the Horizontal Gradient Error in the EFDC's Vertical Sigma Grid. Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD, Singapore, October 2014).
- Chong SA, Yi HS, Yi, Hwang HS, Kim HJ. 2015. Modeling the Flushing Effect of Multi-purpose Weir Operation on Algae Removal in Yeongsan River J. Korean Soc. Environ. Eng. 37(10): 563-572. [Korean Literature]
- Fogg GE. 1968. The Physiology of an Algal Nuisance. Proc Roy Soc Lond B. 173: 175-189.
- Hamrick JM. 1992. A Three-dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code : Theoretical and Computational Aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point. V A.
- Hwang SJ. 2012. Forecasting System for Water Quality Using Artificial Neural Networks : The Kangjung-Koryung Weir on the Nakdong River. Ph.D. Dissertation. Kyungbook National University. [Korean Literature]
- Jeon JH, Chung SW, Park HS, Jang JR. 2011. Evaluation of EFDC for the Simulations of Water Quality in Saemangeum Reservoir. Journal of Korean Society on Water Quality. 27(4): 445-460. [Korean Literature]
- Kim BC, Kim EK, Pyo DJ, Park HD, Heo WM. 1992. Toxic Cyanobacterial Blooms in Korean Lakes. J. KSWQ Sep. 1995. 11: 231-237 [Korean Literature]
- Kim BC, Kim JG, Jeon MS. 2003. Study of Institution Improvement for Efficient Lake Management in Algae Control. Water Management Policy Discussion [Korean Literature]
- Kim SJ, Seo DI, Ahn KH. 2011. Estimation of Proper EFDC Parameters to Improve the Reproducibility of Thermal Stratification in Korea Reservoir. Journal of Korea Water

- Resources Association. 44(9): 741-751. [Korean Literature]
- Kim BC. 2014. Algal bloom and Limiting Factor in Rivers and Lakes. Water Environment Policy Forum p. 97-113 [Korean Literature]
- Kim DH, Kim SM. 2016. Analysis of Downstream Water Quality Improvement by Agricultural Reservoir Release Using QUAL2K. Journal of Agriculture & Life Science 50(5): 205-216. [Korean Literature]
- Kim DM, Park HS, Chung SW. 2017. Relationship of the Thermal Stratification and Critical Flow Velocity Near. Journal of Korean Society on Water Environment. 33(4): 449-459. [Korean Literature]
- K-water. 2018. Analysis on the Mechanism of Algal Bloom and Seasonal Succession in 2nd Year. K-water. [Korean Literature]
- Kim EJ, Park CM, Na MJ, Park H, Kim BS. 2018. Impact Analysis of Tributaries and Simulation of Water Pollution Accident Scenarios in the Water Source Section of Han River Using 3-D Hydrodynamic Model. Journal of Korean Society on Water Environment. 34(4): 363-374. [Korean Literature]
- Mitrovic SM, Oliver RL, Rees C, Bowling LC, Buckney RT. 2003. Critical Flow Velocities for the Growth and Dominance of *Anabaena Cardinalis* in Some Turbid Freshwater Rivers, *Freshwater Biology*. 48: 164-174.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Busan Regional Construction and Management Administration. 2009. Primary River Planning of Nakdong River Basin. [Korean Literature]
- Min YH, Hyun DY, Eum CH, Lee SH. 2011. A Study on the Relationship Between Concentration of Phosphorus, Turbidity, and pH in Water and Soil. *Analytical Science & Technology*. 24(4): 304-309. [Korean Literature]
- Park DY, Park HS, Kim SJ, Chung SW. 2019. Analysis of Water Quality Variation by Lowering of Water Level in Gangjeong-Goryong Weir in Nakdong River. *J. Environ. Impact Assess.* 28(3): 245-262 [Korean Literature]
- Paerl HW. 1988. Growth and Reproductive Strategies of Freshwater Blue-green Algae (Cyanobacteria). In SANDGREN CD (Ed.). New York : Cambridge University Press. p. 261-315.
- Reynolds CS. 1987. Cyanobacterial Water Blooms. *Adv. Bot. Res.* 13: 67-143.
- Sherman BS, Webster IT. 1998. Transitions between *Aulacoseira* and *Anabaena* Dominance in a Turbid River Weir Pool, *Limnology and Oceanography*. 43(8): 1902-1915.
- Tetra Technologies, incorporated (Tetra Tech). (2007a). The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation Volume 1 : Hydrodynamics and Mass Transport, Technical report.
- Tetra Technologies, incorporated (Tetra Tech). (2007b). The Environmental Fluid Dynamics Code User Manual US EPA Version 1.01, Technical report.
- Tetra Technologies, incorporated (Tetra Tech). (2007c). The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation Volume 3: Water Quality Module
- WHO. 1999. Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management.
- Xia L, Xiaohua L, Yuwei C. 2011. The Effects of Temperature and Nutrient Ratios on *Microcystis* Blooms in Lake Taihu, China. An 11-Year Investigation, *Harmful Algae*, 10: 337-343.