

Research Paper

낙동강 강정고령보 수위저하 운영에 따른 수질 변동특성 분석

박대연 · 박형석 · 김성진 · 정세웅

충북대학교 환경공학과

Analysis of Water Quality Variation by Lowering of Water Level
in Gangjeong-Goryong Weir in Nakdong River

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

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

요약: 본 연구의 목적은 낙동강에 위치한 칠곡보와 강정고령보 구간을 대상으로 3차원 EFDC 모델을 구축하고, 보 구간의 운영 수위 저하 및 유속 증가와 같은 수리학적 특성 변화가 수질과 조류 생체량에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 보정결과, EFDC 모델은 10분 단위의 고빈도로 측정된 상층과 하층 수온의 시간적 변화를 적절하게 모의하였고, 유기물, 질소, 인계열 수질항목과 남조류의 시계열 변화를 적절히 재현하였다. 하지만, 규조류와 녹조류 세포 밀도에 대해서는 모의값이 실측값을 과대 산정하였다. 규조류와 녹조류 예측의 오차 요인은 조류의 신진대사와 관련된 매개변수의 불확실성과 동물플랑크톤에 의한 포식 기능이 모의에 포함되지 않은 것에 기인한 것으로 유추된다. 강정고령보의 보 운영 수위를 관리수위(EL. 19.44 m)에서 하한수위(EL. 14.9 m)까지 약 4.54 m 낮추어 운영하는 시나리오 모의결과, Chl-a와 조류 세포수 밀도가 급격히 감소했다. 특히, 녹조를 발생시키는 남조류 세포 수는 기존 관리수위에 비해 하한 수위 시나리오에서 표층 기준 56.1% 급감하였다. 연구결과는 임계유속 유지가 남조류 제어에 효과적이라는 선행연구들과 일치하며, 강정고령보에서 수위 저하와 체류시간 감소와 같은 수리학적 조절은 조류의 과잉 성장을 제한 할 수 있는 대안임을 시사한다.

주요어: 강정고령보, 낙동강, 수질, 남조류, 수위저하, EFDC

Abstract: The objectives of this study were to construct a three-dimensional water quality model (EFDC) for the river reach between Chilgok Weir and Gangjeong-Goryong Weir (GGW) located in Nakdong River, and evaluate the effect of hydraulic changes, such as water level and flow velocity, on the control of water quality and algae biomass. After calibration, the model accurately simulated the temporal changes of the upper and lower water temperatures that collected every 10 minutes, and appropriately reproduced changes in organic matter, nitrogen, phosphorus, and cyanobacteria. However, the simulated values were overestimated for the diatoms and green algae cell density,

First Author: Dae-Yeon Park, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: qkrtjdwlsl5@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: Hyung-Seok Park, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: qwrs07@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6218-1826

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

Received: 27 February, 2019. Revised: 20 March, 2019. Accepted: 14 May, 2019.

www.kci.go.kr

possibly due to the uncertainties of the parameters associated with algae metabolism and the lack of zooplankton predation function in the simulations. As a result of scenario simulation of running the water level of GGW from EL. 19.44 m to EL. 14.90 m (4.54 m drop), Chl-a and algae cell density decreased significantly. In particular, the cyanobacteria on the surface layer, which causes algal bloom, declined by 56.1% in the low water level scenario compared to the existing management level. The results of this study are in agreement with the previous studies that maintenance of critical flow velocity is effective for controlling cyanobacteria, and imply that hydraulic control such as decrease of water level and residence time in GGW is an alternative to limit the overgrowth of algae.

Keywords : Algal Bloom, Cyanobacteria, Nakdong River, Water Level, Weir

I. 서론

2012년 4대강사업 완료 이후 낙동강 본류에는 8개의 다기능 보가 설치되었다. 보 설치로 인해 하천은 체류시간이 늘어나고 정체수역이 형성되어 1차생산성이 높은 폐쇄성수역의 특징을 가지게 되었다(BAI 2013). 뿐만 아니라 4대강 사업 이후 지속된 가뭄과 여름철 고온 현상은 남조류의 과잉성장에 따른 녹조 현상을 빈번히 야기하였고, 보 구간의 녹조문제는 중요한 사회적 이슈로 자리잡게 되었다. 하천에서 유해 남조류의 과잉증식은 정수된 수돗물에서 맛과 냄새를 유발하는 물질의 원인이 되며, 독소를 포함하는 경우 수생태계와 사람의 건강에 위해가 될 수 있어 특별한 관리가 필요하다. 이러한 녹조문제를 해결하기 위해 정부에서는 댐과 보의 연계운영, 총인(TP) 방류수 수질기준 강화 등 여러 대책을 추진하였으며, K-water(K-water 2017; K-water 2018)에서도 녹조 우심지역을 선정하고 지역 특성에 맞는 대응방안을 수립하여 추진하고 있으나, 그 효과가 국부적이고 일시적이어서 근원적 대책 마련이 필요한 실정이다.

남조류는 수온이 20℃ 이상의 고온에서 최적의 성장하며, 남조류 대발생은 화학적, 물리적, 생물학적, 기후적 요인과 밀접한 관련이 있다(Fogg 1968; Reynolds 1987; Paerl 1988). 일반적으로 남조류의 성장에 영향을 미치는 요소는 영양염류(질소, 인), 유기물의 농도, 탁도, 부유물질, 빛, 풍속, 수심 등으로 매우 다양하기 때문에 정확한 발생 원인의 분석이 어려운 경우가 많다(Horne et al. 1994). 선행 연구에 따르면(Sherman & Webster 1998; Mitrovic et al.

2003), 보에 의해 흐름이 조절되는 하천에서는 유량, 유속, 수온성층이 남조류의 성장과 친이특성에 가장 민감한 영향을 미친다. Sherman et al. (1998)은 호주 Murrumbidgee강의 Maude 보 구간에서 실험을 통해 유량과 남조류 생체량이 서로 반비례 관계를 가진다는 점과 상·하층간의 온도차(수온성층)가 조류 우점과 밀접한 관련이 있다는 것을 보였다. 또 녹조 현상은 임계유속과도 밀접한 관련이 있는데 수온성층 파괴와 남조류의 과잉성장과 우점을 억제하기 위해서 필요한 임계유속은 0.05 m/s로 분석된 사례가 있다(MDBA 2012; Kim et al. 2017a; Hwang 2017).

국내에서도 보의 관리수위를 낮추어 유속을 증가시키고 체류시간을 감소시켜 녹조 문제를 완화하려는 노력이 추진 중이다. 환경부는 2017년 6월1일부터 녹조문제가 심하고 체류시간이 길며 수자원 이용에 영향이 없는 6개 보(강정고령보, 달성보, 함천창녕보, 창녕함안보, 공주보, 죽산보)를 대상으로 수질 개선과 녹조저감을 위해 보 개방(수위저하운영)을 시행하였다. 본 연구의 대상지역인 강정고령보의 경우, 2017년 6월 이후 당초 보 관리수위인 EL. 19.50 m 보다 1.25 m 낮은 양수제약 수위(EL. 18.25 m)로 운영되고 있다. 그러나, 보 운영 수위저하에 따른 수질 개선과 녹조저감 효과를 평가하기 위해 광범위하고 집중적인 실험이 진행되고 있으나, 단 기간의 측정 결과로 보 수위 저하의 효과를 평가하는데 어려움이 있다. 그 이유는 하천의 수질농도와 조류 밀도는 기상, 수량, 수질 등 물리적, 화학적, 생물학적 요인들의 복잡한 상호작용의 결과이므로, 실험을 통해 보 수위저하만의 효과를 구분하기는 불가능에 가깝기 때문

이다. 따라서, 보 수위저하에 따른 수질개선 및 녹조 저감 효과를 과학적으로 평가하기 위해서는 수리·수질·생태의 연동해석이 가능한 수치모델의 활용이 필요하다.

그 동안 국내에서는 하천의 수질문제 분석을 위해 다양한 수질모델이 적용된 바 있다. 가장 대표적인 수질모델은 2차원 횡방향 평균 모델인 CE-QUAL-W2와 3차원 모델인 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code), ELCOM 모델 등이 포함된다. Kim & Chung (2011)은 CE-QUAL-W2 모델을 사용하여 용담댐 하류 하천을 대상으로 수리·수질 변화를 모의하였고 부유고형물(SS) 농도변화를 반영하여 모의하였다. 최근에는 컴퓨터 하드웨어와 모델링 기술의 급격한 발전과 함께 3차원 수리해석 모델의 활용이 증가하는 추세이며, 시공간적으로 보다 정밀한 분석이 가능한 수준에 이르렀다. Yin & Seo (2013)는 경인 아라뱃길의 수리·수질 모의를 위해 EFDC-WASP 모델을 연계하여 사용한 바 있으며, Kim et al. (2017b)은 새만금호의 상류제수문 방류조건에 따른 하류 하천의 수질 변화를 모의하기 위해 유역유출모형인 SWAT과 EFDC 모델을 연계하여 적용하였다. 그러나, 이들 선행연구들은 대부분 유기물, 부유물질, 부영양화 항목 등 이화학적 수질지표를 대상으로 수질모의가 이루어 졌으며, 남조류 과잉성장에 따른 녹조문제를 다루지는 못했다. 최근 Kim (2018)은 금강 중하류에 위치한 백제보 구간의 녹조현상과 임계

유속 관계해석을 위해 EFDC 모델을 적용하였으며, 보 운영 수위조건에 따른 남조류 세포 수의 시·공간적 변동특성과 성장 제한요인을 분석하였다. 그러나 Kim (2018)의 연구에서도 남조류, 규조류, 녹조류의 조류 군집별 측정 자료가 부족하였으며, 단기간의 자료로 보정이 이루어진 한계가 있었다.

본 연구의 목적은 낙동강 수계 중류에 위치한 강정고령보 구간을 대상으로 3차원 수리-수질모델인 EFDC를 구축하고, 고빈도 수온자료와 실측 수질자료를 이용하여 모델을 보정한 후 보 관리수위의 저하에 따른 수질 변화와 녹조저감 효과를 평가하는데 있다. 모델의 보정은 환경부 실측자료와 K-water의 고빈도 수온자료를 활용하였으며, 보정된 모델은 보 운영 수위 저하에 따른 수체 내 수온, 수질 및 조류 군집별 농도변화를 예측하는 데 적용되었다. 또한 EFDC 모델의 3차원 모의결과를 이용하여 보 수위저하에 따른 조류 분포의 공간적 변화를 확인하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상지역

2012년 완료된 4대강 사업으로 낙동강에는 8개의 다기능 보가 설치되었다. 본 연구대상지역(Fig. 1)인 강정고령보는 낙동강 중류(대구광역시 달성군 다사읍 죽곡리)에 위치하고 있으며, 유역면적은 11,667 km², 총 저수용량은 92백만 m³이다. 보의 높이는

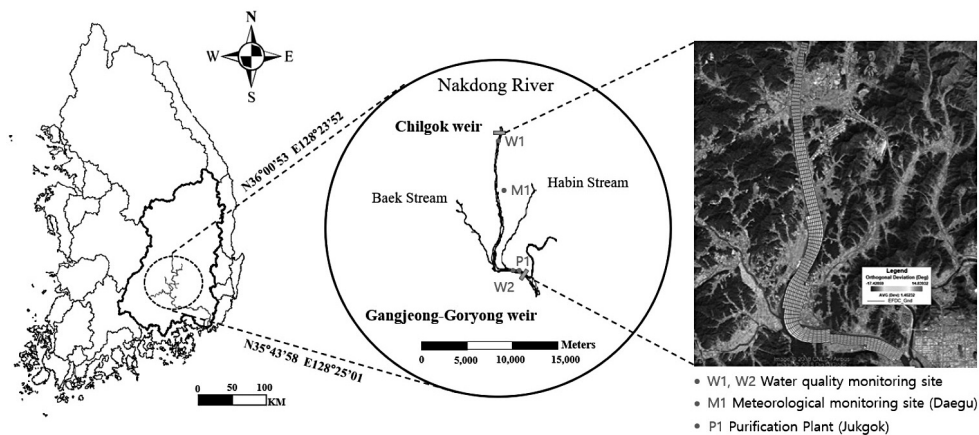


Figure 1. Location of study site, and numerical grid system from Chilgok weir to Gangjeong-Goryong weir.

11.5 m, 길이는 953.5 m(고정보 833.5 m, 가동보 120 m) 규모로써 소수력 발전으로 전력을 생산 및 공급하고 있다. 평상시 관리수위는 EL. 19.50 m로 운영되고 있으며, 2017년 6월 4일 이후 수위저하운영으로 양수계약 수위인 EL. 18.25 m로 운영되고 있다.

2. 모델구축

1) 수치모델

칠곡보와 강정고령보 구간의 3차원 수리 및 수질 모의를 위해 EFDC모델을 사용하였다. EFDC 모델은 3차원 범용 수리수질 모델로써 버전은 크게 Hydro Version과 1.01 Full Version으로 구분되는데, 본 연구에서는 최근에 Dynamics Solutions International (DSI 2016a)에서 Full Version을 개선한 EFDC+ 모델을 사용하였다. EFDC 모형의 지배방정식에는 연속방정식, 운동방정식, 물질이송 방정식 등이 있으며 이에 대한 상세한 기술은 Hamrick (1992)를 참조할 수 있다.

2) 지형자료

지형자료는 낙동강 구간 단면측량자료(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Busan Territory Management Administration 2009)를 사용하였으며, 표고값을 추출하여 실제 지형을 모델에 재현하였다. 칠곡보에서 강정고령보까지 25.2 km 구간에 대해 CVL GRID 프로그램을 사용하여 수치격자를 구성하였다. 수치 격자는 수평방향으로 Curvilinear Orthogonal 좌표계를, 수직방향으로는 Sigma Z-grid (SGZ) 좌표계를 사용하였다. SGZ 좌표계는 계산 구간별 수심을 고려하여 수층의 Layer 수를 각기 달리하여 수직 격자를 구성하는 방법으로써 수온성층해석을 재현하는데 적절하다(Craig 2014). 수평격자의 총 cell수는 894개, 수직방향의 Layer 수는 수심별로 2~10개의 수층으로 구성하였으며, 격자의 직교성(Orthogonality)은 평균 $1.45^{\circ}(-17.42^{\circ}\sim 14.83^{\circ})$ 로써 적절한 것으로 평가되었다(DSI 2016b).

3) 초기조건 및 경계 조건

모의기간은 2017년 4월 1일부터 10월 31일까지이며, 수위, 수온, 수질 순으로 모델을 순차적으로 보정하였다. 초기조건 구성은 수위, 수온, 수질 항목 등이 있다. 초기수위는 4월 1일의 실측 수위 EL. 19.44 m, 바닥의 조도계수는 0.03으로 입력하였다. 초기수온 및 수질은 수질측정망 다사지점(W2, Fig. 1 참조) 자료를 사용하였다. 수온은 모의 시작시점인 4월1일에 측정된 12.4°C 를 입력하였으며, 수질항목은 모의 시작 시점에 가장 근접한 4월 3일에 측정한 수질 및 조류 군집별 농도 등 21개의 항목을 입력하였다. 기상경계조건은 기온($^{\circ}\text{C}$), 증발산량(m/day), 상대습도(%), 강수량(m/day), 풍향(16방 위, DEG), 풍속(m/s), 일사량(W/m^2), 운량, 대기압(mbar) 항목 등이 포함되며, 기상청 기상자료개방포털에서 제공하는 대구 종합관측기상대의 시계열 자료를 수집하여 입력하였다.

유량 경계조건은 K-water 물 정보포털에서 제공하는 강정고령보 수문자료를 활용하였으며, 지류는 유역 면적비를 고려하여 유량을 백천과 하빈천에 분배해 주었다. 유출 경계조건은 방류조건(어도, 자연 월류, 소수력, 가동보)에 맞게 강정고령보 방류량을 나누어 입력하였다.

유입부 경계조건은 환경부 실시간수질정보시스템과 물 환경정보시스템에서 제공하는 왜관관측소(Fig. 1)의 수온 및 수질자료를 수집하여 입력하였으며, 지류 경계조건에는 백천, 하빈천 각각의 관측소 자료를 입력하였다. 부가적으로 지류의 수질 측정 자료가 부족하여 K-water의 “과학적 녹조발생 원인 및 천이기간 분석연구 1차년도” 연구에서 수집한 지류하천 수질자료를 추가 입력하였다(K-water 2017). 모델의 수온 예측성능을 확인하기 위해 K-water에서 10분 단위로 측정된 고빈도 수온자료를 수집하여 비교하였다. 또한, 수질 보정을 위해 K-water(2017)에서 강정고령보 표층의 수온, DO, TN, TP, Chl-a, Cyanobacteria 등 11개 항목에 대해 수집하여 모의 결과와 함께 시계열로 비교 분석하였다. 오차분석은 RMSE (Root Mean Square Error)와 AME (Absolute

Table 1. Calibrated model parameter values for each algae group

Parameter	Cyanobacteria	Diatom	Green	Units
Maximum Growth Rate	2.5	2.5	2.5	/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	2.64E-07	1.79E-06	2.32E-06	µg/cells
Carbon : Chlorophyll	0.025	0.025	0.025	mgC/µgA
Background Light Extinction coefficient	0.305			/m
Light Extinction due to Chlorophyll	0.010			/m per mg/L
Chlorophyll Light Extinction Exponent	1			—

Mean Error), R^2 (R Square)을 사용하였으며, RMSE와 AME는 0에 가까울수록 R^2 은 1에 가까울수록 신뢰도가 높은 것으로 평가된다.

4) 조류모델링

EFDC 모델에서 사용하는 일반적인 조류 모의방법은 실측 Chl-a 농도를 탄소단위로 환산하여 경계조건으로 입력하고 모의결과를 출력 후 다시 Chl-a 농도로 환산하는 방법을 사용한다(Tetra Tech 2007). Chl-a 농도로 총 조류의 농도를 모의하는 방법은 수체 내에 존재하는 모든 조류군집의 농도 변화를 간접지표로 예측하는데 적합하지만, 계절별 조류의 군집변화를 고려하지 못하는 한계가 있다. 특히, 단위 세포당 Chl-a 함량이 상대적으로 적은 남조류 군집에 대해서 예측하기 어렵다. 본 연구에서 조류의 모의는 남조류, 녹조류, 규조류 3개 군집으로 구분하고 군집별 조류 세포 수 밀도(cells/mL)를 탄소단위의 농도로 변환하여 EFDC 모델의 입력자료로 사용하였다.

강정고령보 조류 분율산정에 사용한 조류 세포 수 밀도 자료는 2017년 국립환경과학원 보 구간 수생태계 모니터링 자료를 사용하였으며, 실측한 조류군집별 세포 수(Cells)와 Chl-a 농도를 최적화 목적함수에 입력하여 조류 군집별 Chl-a/Cell 비(α)를 산정하였다. 산정한 Chl-a/Cell 비를 이용해 조류군집별

(Cyanobacteria, Diatom, Green Algae) Chl-a 농도를 산정한 후 군집별 값을 사용하여 모델에서 사용하는 탄소단위의 농도로 환산하여 입력자료로 구성하였다. 본 연구에서 적용한 조류 그룹별 중요 매개변수 값들은 Table 1과 같다. 모의결과로 출력되는 탄소 단위의 조류 농도는 입력과정에 사용한 분율산정 매개변수들을 이용하여 다시 세포 수 밀도로 환산하여 실측자료와 비교하였다.

3. 보 운영수위 시나리오 구성

보정된 EFDC 모델로 보 운영 수위조건에 따른 수온성층, 수질 및 조류 변동특성을 분석하기 위해 3가지 시나리오를 구성하였다. 강정고령보는 관리수위 아래로 양수제약수위(EL. 18.25 m), 지하수제약수위(EL. 17.8 m), 운영 하한수위(EL. 14.9 m), 보 완전개방 최저수위(EL. 10.9 m) 등이 있다. 본 연구에서는 관리수위 (Type 1), 양수제약수위 (Type 2), 보 운영 하한수위 (Type 3) 3가지로 시나리오를 구성하였으며, 보 완전개방 최저수위는 수리해석의 안정성 문제로 포함하지 않았다.

III. 결과 및 고찰

1. 모의기간 동안 유량과 수온 변동 특성

강정고령보의 상층과 하층에서 10분 단위로 측정

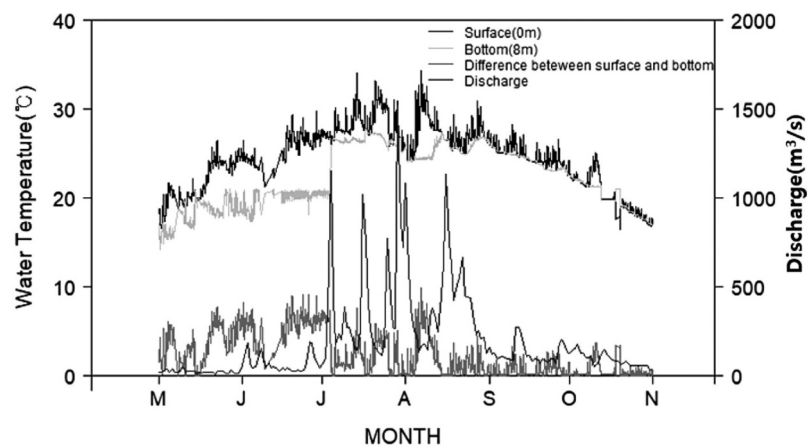


Figure 2. Temporal variations of surface and bottom water temperature along with river discharge from May to November, 2017.

한 고빈도 수온 측정자료와 보 방류량자료의 시계열 변화는 Fig. 2와 같다. 모의기간 동안 상층과 하층의 온도차를 분석한 결과, 1°C 이상 차이 나는 수온성층이 지속적으로 형성되었다. 연중 5월 중순부터 7월초까지 1°C 이상 차이 나는 수온성층이 약 50일간 지속되었고, 상층과 하층의 최대 수온 차이는 9.89°C로 매우 높게 나타났다. 보 구간 수체의 상층과 하층의 수온차이는 유량과 밀접한 관계를 보였다. 저유량이 지속되는 봄, 여름철 기간에는 수온성층이 강하게 형성되었으며, 강우로 인해 하천 유량이 급격히 증가하는 시점에 수온성층 현상이 일시적으로 해소되는 경향을 보였다. 하지만 가을철 이후 기간에는 기온의 영향으로 저유량이 지속되는 반면 수온성층은 해소

되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 적정한 하천 유량 유지가 보 상류에서 지속적으로 형성되는 수온성층현상을 완화시킨다는 선행연구사례와 일치한다 (Kim 2018).

2. 모델 보정 결과

1) 수위와 수온 보정

모델 구축에 사용한 유입량과 방류량 자료의 신뢰도를 평가하기 위해 실측수위와 모델 예측수위를 비교하였다(Fig. 3). 2017년 실측 수위를 모의 수위자료와 비교한 결과, RMSE 0.0271 m, AME 0.0167 m, R^2 0.9981로써 대상 수체의 수위변화를 적절히 재현하고 있어 모델에 사용된 지형자료와 유량자료

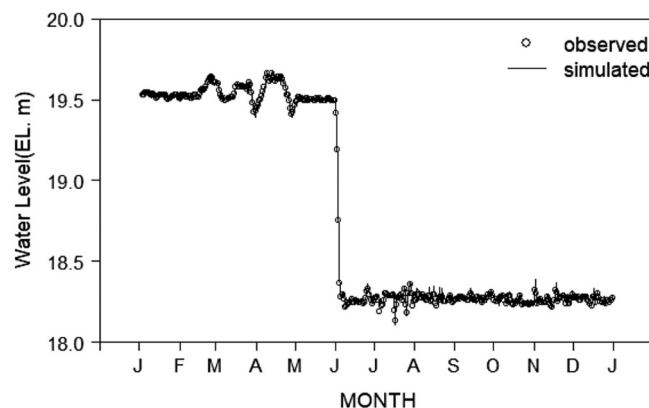


Figure 3. Comparison of observed and simulated water surface elevation.

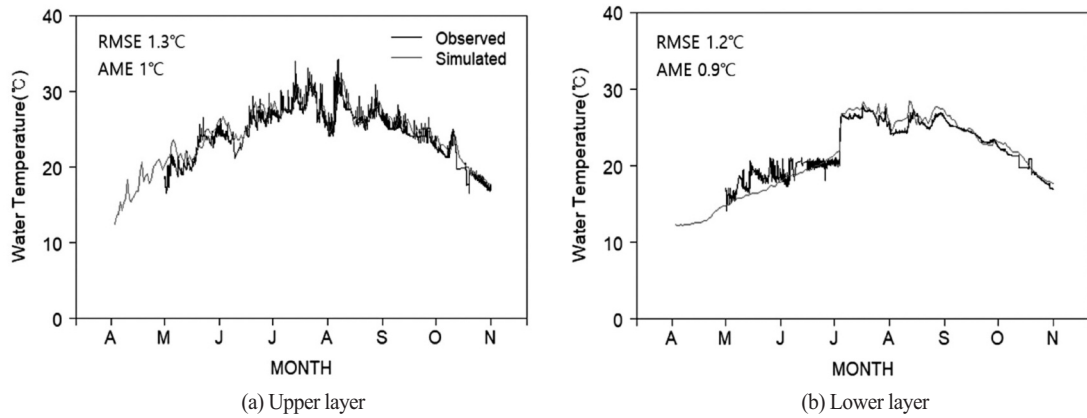


Figure 4. Comparison of simulated water temperatures with observed high-frequency temperature data at (a) upper layer and (b) lower layer in Gangjeong-Goryong Weir.

의 신뢰도는 높은 것으로 평가하였다. 실측 수위와 모의 결과는 모두 2017년 6월초 이후 보 운영수위의 급격한 변화를 보여준다.

표층(0m)과 심층(8~10m)에서 실측한 고빈도 수온 측정자료와 모의결과를 시계열로 비교하여 Fig. 4에 제시하였다. 모의결과는 표층과 심층에서 모두 실측자료의 시계열 변동 특성을 잘 재현하고 있다. 또 수온성층이 형성되는 여름철에 수온변동이 적절히 재현된 것으로 나타났으며, 모델의 오차 분석 결과 표층의 경우 AME 1°C, RMSE 1.3°C 심층의 경우 AME 0.9°C, RMSE 1.3°C로 수온항목에 대한 모델 보정이 적절한 것으로 분석되었다.

2) 수질 및 조류 보정 결과

모델의 보정은 수온, DO, TOC, TP, PO₄-P, TN, NO₃-N, NH₄-N, Chl-a, Cyanobacteria, Diatom, Green algae 등 12개 항목에 대해 시계열 추세 비교와 오차분석을 통해 이루어졌다. 실측값과 모의값의 시계열 추세 비교는 환경부 물 환경정보시스템 다사관측소 지점의 수심평균 실측자료(Fig. 5, 6에서 ME로 표기)와 K-water에서 수집한 보 상류 500m 지점 중앙 수심평균 자료(K-water 2017)의 수질 및 조류 자료를 이용하였고, 동일지점에서 수심평균 모의값과 비교하였다. 오차분석은 환경부 수심평균 실측

Table 2. Error analysis between simulated results and observed data

Items		Error analysis	
		AME	RMSE
Water temperature (°C)		0.9	1.1
Water quality	DO (mg/L)	2.2	2.8
	TOC (mg/L)	0.769	0.902
	TP (mg/L)	0.015	0.025
	PO ₄ -P (mg/L)	0.007	0.011
	TN (mg/L)	0.203	0.276
	NO ₃ -N (mg/L)	0.183	0.258
	NH ₄ -N (mg/L)	0.049	0.060
Algae	Chl-a (mg/m ³)	6.54	8.06
	Cyanobacteria (cells/mL)	14,988	22,928
	Diatom (cells/mL)	3,630	5,585
	Green Algae (cells/mL)	7,405	9,416

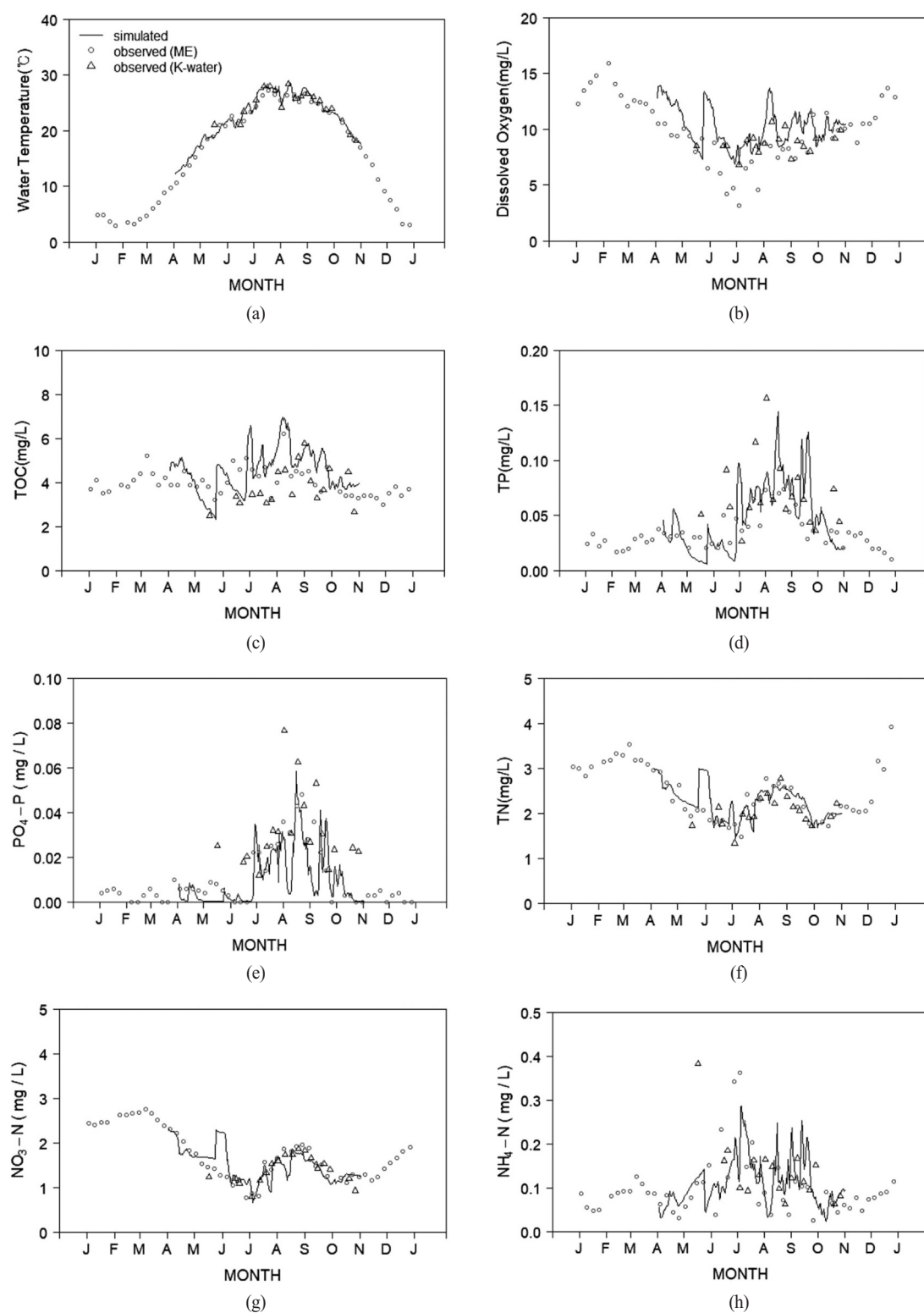


Figure 5. Comparison of simulated water temperature and water quality concentration with observed data (ME, K-water).

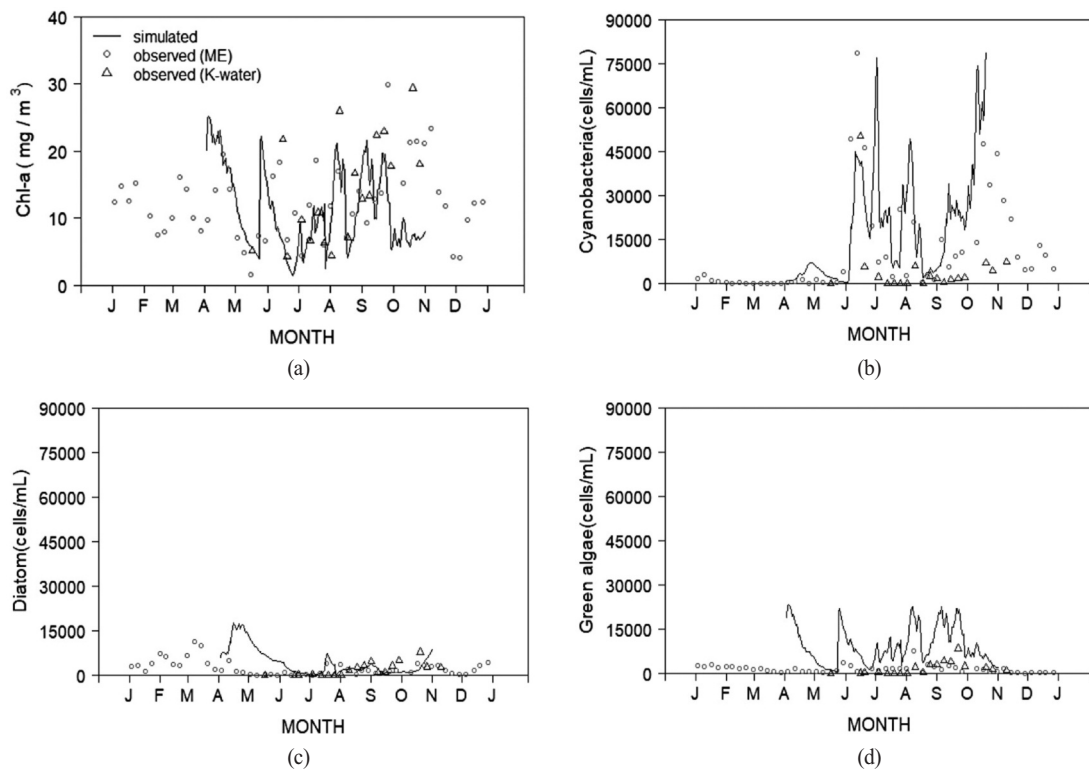


Figure 6. Comparison of simulated chl-a and cell density of each algae group with observed data (ME, K-water).

데이터와 EFDC 모델 수심평균 모의결과로 각 수질 및 조류항목별로 AME와 RMSE 오차를 산정하였다 (Table 2).

전반적으로 모의값은 실측 수온과 수질 농도의 시계별 변동특성을 적절히 재현하였다. 환경부 실측자료와 모델의 오차분석 결과, 수온은 AME 0.9℃, RMSE 1.1℃ 로써 수온 보정이 적절히 이루어진 것으로 판단되었다. DO의 AME는 2.2 mg/L, RMSE는 2.8 mg/L 으로서 봄철에 실측값을 과대평가하는 경향을 보였다. 하천의 DO는 대기와의 기체교환, 유기물과 질소의 산화, 퇴적물 산소요구량, 그리고 조류의 광합성 및 호흡 등 매우 복잡한 과정에 의해 변동되며, 봄 철 기간 동안 DO모의 결과가 실측값보다 높은 이유는 후술한 규조류의 과다 산정에 따른 영향이다. TOC는 AME 0.769 mg/L, RMSE 0.902 mg/L 로 실측값을 적절히 재현하였으며, 인계열 (TP, PO₄-P) 항목에서는 AME 0.015, 0.007 mg/L, RMSE 0.025, 0.011 mg/L 로 TP 항목에서 실측값

에 대해 과대평가되었으나, 시간적 변동특성은 적절하게 반영하고 있다. 질소계열(TN, NO₃-N, NH₄-N) 항목에서는 AME 0.203, 0.183, 0.049 mg/L, RMSE 0.276, 0.258, 0.060 mg/L 로 실측값을 적절하게 잘 재현하였다.

실측 Chl-a와 조류 군집별 세포 수 밀도는 시계열 변동성이 매우 크게 나타났고, 일부 기간에 모의값은 실측값과의 편차가 크게 나타났다. Chl-a, Cyanobacteria, Diatom, Green algae 항목에 대한 오차 통계값은 AME 6.54 mg/m³, 14,988, 3,630, 7,405 cells/mL, RMSE 8.06 mg/m³, 22,928, 5,585, 9,416 cells/mL로 분석되었다. 대체로 가을에 규조류가 우점하고, 여름철에 녹조류와 남조류가 우점하며 강우시 조류 밀도가 감소하며 소강상태를 보이는 특성은 적절히 재현하였다. 하지만, Diatom 세포 수는 봄에 실제 값과 큰 차이를 보였으며, 녹조류는 전 기간에 걸쳐 실측값보다 모의값이 높게 산정되었다. 조류 군집별 세포 수 예측의 오차 요인은 복잡한 물

리적, 화학적, 생물학적 상호 작용에 대한 이론적 한계와 입력자료 구성에 사용한 매개변수들의 불확실성, 그리고 동물플랑크톤에 의한 포식의 영향을 포함하지 않은 것 등에 기인한 것으로 추측된다. 특히, 남조류와 달리 하천에서 규조류와 녹조류는 동물플랑크톤에 의한 포식에 의해 하향조절(top-down control) 영향이 매우 큰 특성이 있다(Chapra et al. 2017). 본 연구에서는 자료의 부족으로 동물플랑크톤을 입력자료로 포함하지 못하였다. 규조류와 녹조류 매개변수에 대한 추가적인 보정은 현재 강정고령보에서 진행 중인 조류와 동물플랑크톤 관계 연구가 완료되면 진행할 예정이다. 본 연구의 주요 목적은 보 수위저하 운영에 따른 수질과 남조류 세포 수 밀도 변화의 상대적인 비교가 목적이므로 현재 보정된 모델을 적용하는데 무리가 없다고 판단하였다.

3. 보 운영수위 변화에 따른 수리, 수질 변동특성

강정고령보의 운영 수위를 하향 조정함에 따라 수질항목의 변동특성을 분석하였다. 비교지점은 강정고령보 앞 500 m 지점(W2)으로 하였으며, 시나리오별 수심 평균값 모의결과를 각각의 항목별로 최소, 최대, 중위값, 평균, 표준편차, % Change값으로 기초통계분석을 실시하였다(Table 3). 그리고 보 운영수위 변화에 따른 수질과 조류 세포 수 밀도 변화의 통계적 유의성을 판별하기 위해 수질 항목별 정규성검정(Normality test)을 통해 정규분포의 유무를 파악한 후, 정규분포를 만족하는 경우 T-test, 만족하지 않는 경우 비모수통계 기법인 Wilcoxon signed-rank test로 차이를 평가하였다(Table 4, 5). 또 시각적으로 보 수위 변화에 따른 각 수질 항목의 증가와 감소 추세를 파악하기 위해 시계열 그래프로 도식

Table 3. Basic statistics analysis of simulation results according to operational water level of the weir

Item	Water level	Min	Max	Median	Average	Std.dev	% Change
Wtemp (°C)	EL. 19.44m	12.4	28.6	24.3	23.0	4.2	—
	EL. 18.25m	12.3	28.7	24.3	23.1	4.2	0.0
	EL. 14.9m	12.3	30.0	24.5	23.4	4.0	0.7
DO (mg/L)	EL. 19.44m	5.0	13.5	9.2	9.1	2.0	—
	EL. 18.25m	5.0	13.7	9.3	9.2	2.1	1.0
	EL. 14.9m	5.3	11.8	7.7	7.9	1.2	-15.8
TOC (mg/L)	EL. 19.44m	1.91	6.77	3.78	3.90	1.05	—
	EL. 18.25m	2.02	6.91	3.84	3.98	1.03	1.6
	EL. 14.9m	1.83	5.43	3.19	3.45	0.86	-15.8
TP (mg/L)	EL. 19.44m	0.0033	0.0973	0.0180	0.0284	0.0246	—
	EL. 18.25m	0.0032	0.0979	0.0184	0.0291	0.0250	2.0
	EL. 14.9m	0.0132	0.0992	0.0331	0.0409	0.0232	83.4
PO ₄ -P (mg/L)	EL. 19.44m	0.0001	0.0456	0.0004	0.0055	0.0097	—
	EL. 18.25m	0.0001	0.0452	0.0004	0.0056	0.0099	-0.7
	EL. 14.9m	0.0102	0.0483	0.0151	0.0207	0.0104	3,252.3
TN (mg/L)	EL. 19.44m	1.478	2.876	2.275	2.302	0.281	—
	EL. 18.25m	1.424	2.876	2.242	2.286	0.281	-1.4
	EL. 14.9m	1.457	2.874	2.254	2.275	0.278	-0.9
NO ₃ -N (mg/L)	EL. 19.44m	0.697	2.326	1.624	1.618	0.281	—
	EL. 18.25m	0.650	2.325	1.602	1.602	0.276	-1.4
	EL. 14.9m	0.687	2.334	1.664	1.633	0.286	2.4
NH ₄ -N (mg/L)	EL. 19.44m	0.034	0.290	0.108	0.117	0.056	—
	EL. 18.25m	0.029	0.289	0.098	0.109	0.057	-8.9
	EL. 14.9m	0.072	0.313	0.148	0.148	0.052	38.0

Table 3. Continued

Item	Water level	Min	Max	Median	Average	Std.dev	% Change
Chl-a (mg/m ³)	EL. 19.44m	0.49	19.13	6.57	7.46	4.55	—
	EL. 18.25m	0.50	20.67	6.58	7.79	4.81	0.1
	EL. 14.9m	0.05	6.67	2.21	2.41	1.63	-66.4
Cyano (cells/mL)	EL. 19.44m	440	57,971	5,765	12,836	14,689	—
	EL. 18.25m	685	72,484	8,334	15,959	18,034	44.6
	EL. 14.9m	19	36,505	3,024	6,479	8,576	-47.5
Cyano (surface)	EL. 19.44m	153	57,970	6,640	13,550	15,334	—
	EL. 18.25m	212	72,747	9,538	16,500	18,456	43.7
	EL. 14.9m	10	35,771	2,913	6,424	8,607	-56.1
Diatom (cells/mL)	EL. 19.44m	78	16,973	2,048	4,194	4,581	—
	EL. 18.25m	63	18,352	2,079	4,190	4,689	1.5
	EL. 14.9m	18	7,057	1,533	1,845	1,450	-25.1
Green (cells/mL)	EL. 19.44m	196	20,321	4,334	5,281	4,446	—
	EL. 18.25m	271	22,031	4,527	5,644	4,721	4.5
	EL. 14.9m	16	6,134	1,021	1,315	1,227	-76.4

Table 4. Normality and Wilcoxon signed-rank test, and median difference of water quality variables

Items	Wilcoxon signed-rank test ^{a)}		Wilcoxon signed-rank test ^{b)}	
	p-value	median difference	p-value	median difference
Wtemp	p < 0.05	-0.01°C	p < 0.05	-0.16°C
DO		-0.10 mg/L		1.46 mg/L
TOC		-0.060 mg/L		0.596 mg/L
TP		-0.0004 mg/L		-0.0151 mg/L
PO ₄ -P		0.000004 mg/L		-0.0147 mg/L
TN		0.033 mg/L		0.021 mg/L
NO ₃ -N		0.022 mg/L		-0.040 mg/L
NH ₄ -4		0.0095 mg/L		-0.0409 mg/L

^{a)} test between water level EL.19.44m vs. EL.18.25m^{b)} test between water level EL.19.44m vs. EL.14.90m

Table 5. Normality and Wilcoxon signed-rank test, and median difference of algae and flow velocity

Items	Wilcoxon signed-rank test ^{a)}		Wilcoxon signed-rank test ^{b)}	
	p-value	median difference	p-value	median difference
Chl-a	p < 0.05	-0.0062 mg/m ³	p < 0.05	4.3655 mg/m ³
Cyanobacteria		-2,569 cells/mL		2,741 cells/mL
Cyanobacteria (surface_mid)		-1,258 cells/mL		8,092 cells/mL
Cyanobacteria (surface_down)		-2,899 cells/mL		3,727 cells/mL
Diatom	0.7728	-32 cells/mL		515 cells/mL
Green Algae	p < 0.05	-193 cells/mL		3,313 cells/mL
Velocity (depth average_mid)		-0.005 m/s		-0.046 m/s
Velocity (depth average_down)		-0.004 m/s		-0.034 m/s
Velocity (surface_mid)		-0.008 m/s		-0.044 m/s
Velocity (surface_down)		-0.006 m/s		-0.039 m/s

^{a)} test between water level EL.19.44m vs. EL.18.25m^{b)} test between water level EL.19.44m vs. EL.14.90m

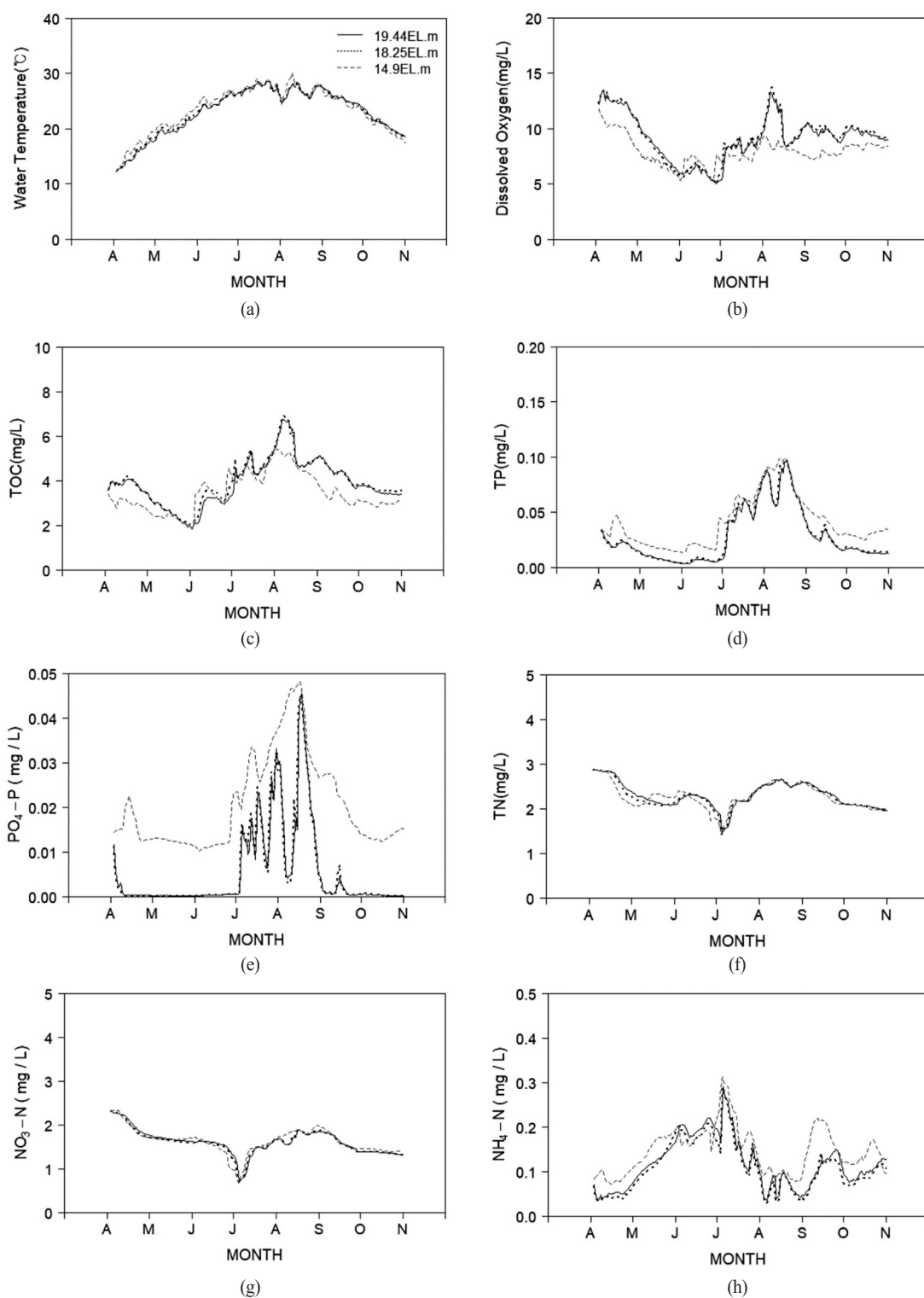


Figure 7. Comparison of water temperature and water quality concentration according to operation water level scenario of the weir.

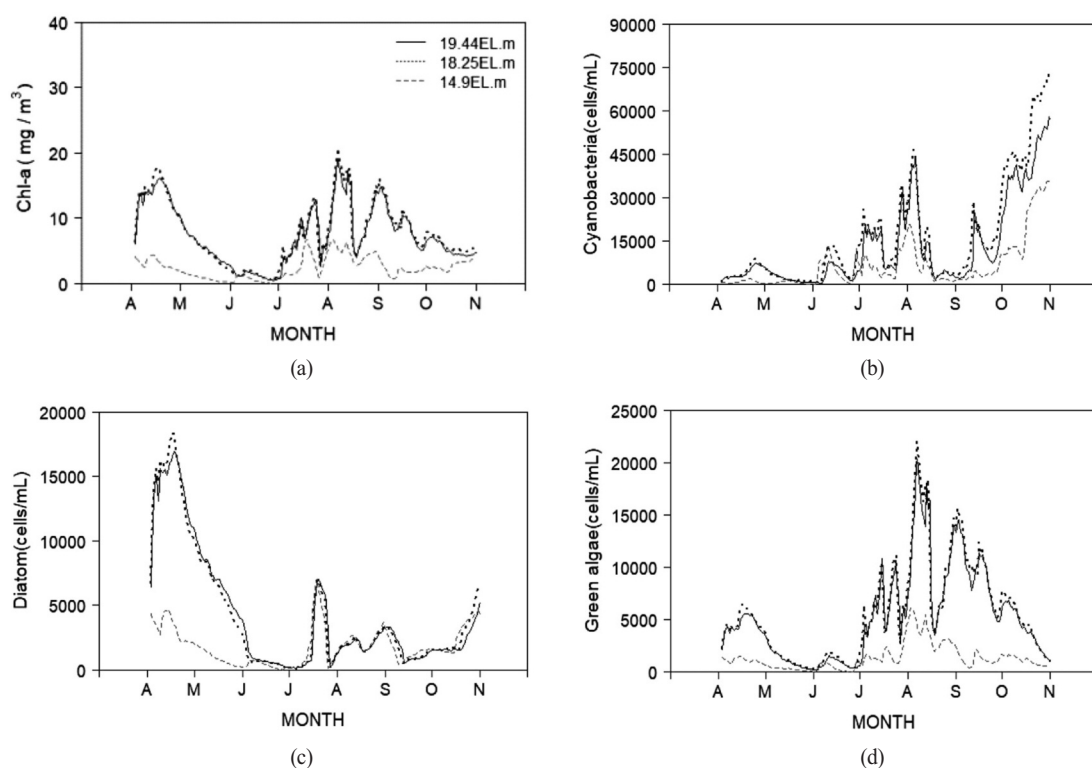


Figure 8. Comparison of chl-a and cell density of each algae group according to operation water level scenario of the weir.

화하여 Fig. 7, 8에 나타내었으며, 시공간적인 남조류 분포 변화를 분석하기 위해 칠곡보-강정고령교 구간 내 중류와 하류 두 지점을 선정하여 수심 평균 유속 비교(Table 6) 및 표층의 남조류 분포를 분석하였다(Fig. 9, 10).

양수제약수위(EL. 18.25 m) 시나리오와 하한수위(EL. 14.9 m) 시나리오 모의결과에 대한 정규성검정 결과, 모든 항목에서 $p\text{-value} < 0.05$ 로 통계적으로 비정규분포를 보여 비모수통계 기법인 Wilcoxon Signed-Rank Test를 적용하였다.

Table 6. Changes of flow velocity at mid-stream and downstream according to the operation water level scenario

Scenario	Statistical index	Mid stream (m/s)	Down stream (m/s)
Type 1	Min	0.0020	0.0007
	Max	0.2529	0.2778
	Average	0.0429	0.0483
Type 2	Min	0.0020	0.0011
	Max	0.3132	0.3396
	Average	0.0533	0.0577
	% Change	24.3%	19.5%
Type 3	Min	0.0059	0.0042
	Max	0.6147	1.1507
	Average	0.1265	0.1312
	% Change	195.1%	171.8%

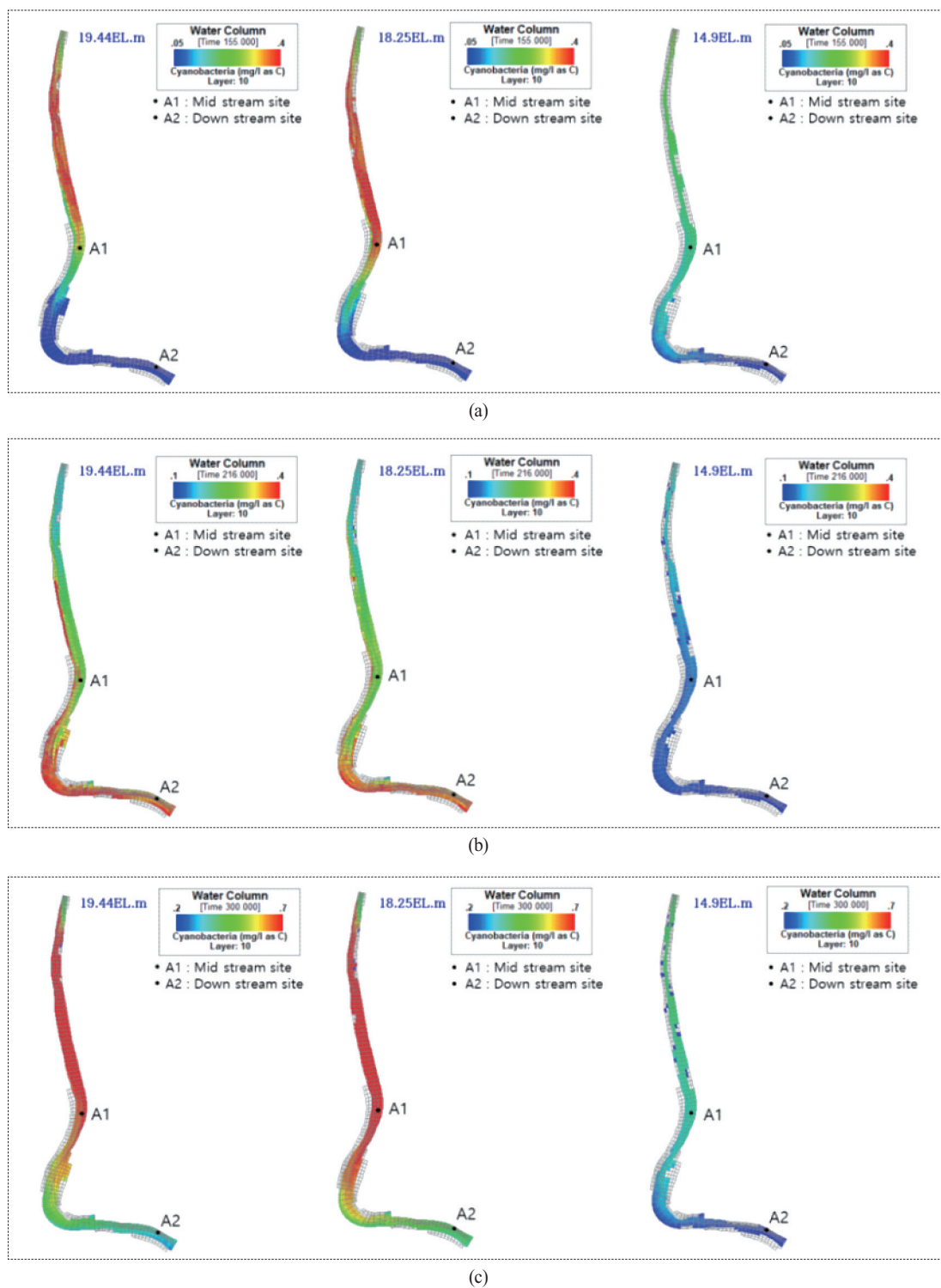


Figure 9. Spatial distribution of cyanobacteria biomass as carbon unit at water surface according to the operation water level scenario of the weir on (a) 2017-06-04 (julian day 155), (b) 2017-08-04 (julian day 216), (c) 2017-10-27 (julian day 300).

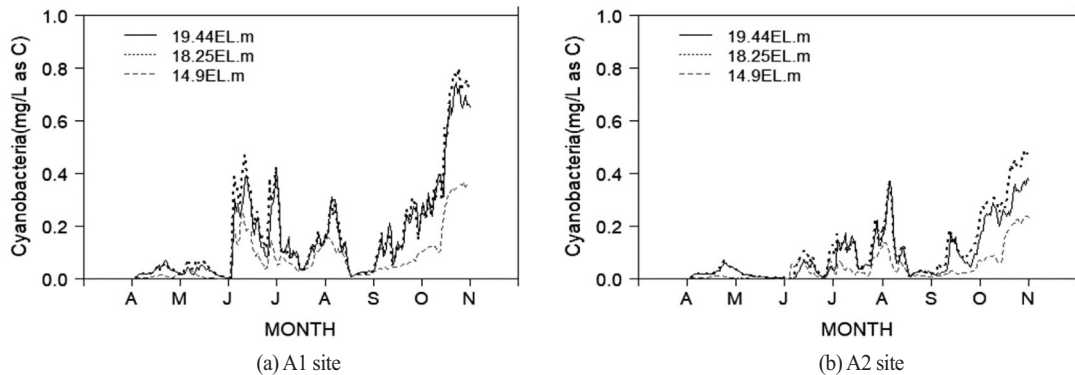


Figure 10. Temporal variations of cyanobacteria biomass as carbon unit at water surface according to the operation water level scenario of the weir at (a) middle point (A1) and (b) downstream point (A2).

수위변화에 따른 수질차이에 대한 검정결과, 관리수위와 양수제약수위 간에는 Diatom 항목에서 통계적으로 유의하지 않은 결과(p -value = 0.7728)를 나타내었고, Diatom을 제외한 나머지 모든 항목에서는 차이가 통계적으로 유의한 결과(p -value < 0.05)를 나타내었다. 기초통계분석과 가설검정을 바탕으로 Time series와 함께 분석한 결과, 양수제약수위(EL. 18.25 m) 시나리오에서는 DO, TOC, TP, Chl-a, Cyanobacteria, Diatom, Green algae 항목 등이 증가하는 경향을 나타냈으며, PO_4 -P, TN, NO_3 -N, NH_4 -N 항목이 감소하는 경향을 나타냈다.

반면 하한수위(EL. 14.9 m) 시나리오에서는 수온, TP, PO_4 -P, NO_3 -N, NH_4 -N 항목 등이 기존 관리수위 대비 0.7%, 83.4%, 3,252%, 2.4%, 38%로 증가하였으며, 반면에 DO, TOC, TN, Chl-a, Cyanobacteria, Diatom, Green Algae 항목 등이 기존 관리수위 대비 15.8%, 15.8%, 0.9%, 66.4%, 47.5%, 25.1%, 76.4%로 감소하였으며, 특히 조류 항목에서 급감하였다.

두 비교 지점에서의 수심 평균유속과 남조류 공간 분포 분석결과, 양수제약수위(EL. 18.25 m) 운영 시 중류(A1)와 하류(A2)의 유속은 관리수위 운영 시에 비해 평균 24.3%, 19.5% 증가하였으며, 하한수위(EL. 14.9 m) 운영 시 유속은 평균 195.1%, 171.8%로 급격히 증가하였다. 하한수위까지 낮추어 모의한 시나리오에서 기존 관리수위 시나리오에 비해 급증한 유속으로 인해 표층의 남조류 성장이 제한되어 녹

조문제의 개선효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 남조류의 공간적 분포 변화를 Julian day 155, 216, 300에 대해 시나리오별로 비교한 결과, 시각적으로 확연히 하한수위 시나리오에서 남조류의 세포밀도가 보 상류 하천 전반에 걸쳐 낮아지는 것으로 분석되었다. 칠곡보-강정고령보 구간 내 하류 쪽으로 갈수록 남조류 세포 수 밀도가 감소하는 것으로 모의되었다.

동일한 수위 저하 시나리오 인데 Type 2(EL. 18.25 m)와 Type 3(EL. 14.9 m) 결과가 서로 상이한 것은 수위 저하에 따른 수질 및 녹조 제어 효과가 선형이 아닌 것을 보여준다. Type 2(EL. 18.25 m)는 기존 관리수위(EL. 19.44 m)보다 불과 1.19 m 감소하여 충분한 체류시간 감소와 유속 증가가 이루어지지 않은 반면, 수체의 수온과 총인 농도는 약간 상승하였다(Tables 4, 5). 수온 상승은 조류의 성장속도 증가의 원인이 되므로, 수위저하에 따른 체류시간 감소 효과보다 온도 상승효과가 더 클 경우 오히려 조류 생체량은 증가할 수 있다. 또한 수위 감소에 따라 보 체적이 감소하면 상류에서 유입되는 부하량은 동일하므로 농도는 상승할 수 있다. 그러나 Type 3(EL. 14.9 m)의 경우는 기존관리 수위보다 4.54 m 낮은 수위조건이며, 체류시간과 유속 증가가 충분히 이루어져 수체의 수온과 총인 농도 상승에도 불구하고 조류 생체량은 급감한 것으로 해석된다. 또한 Table 6에 제시된 Type 2와 Type 3의 유속을 비교하면, Type 2는 Kim et al. (2017a)이 금강에서 제시한 성

층해소에 필요한 임계유속 0.1 m/s의 50% 수준에 불과한 반면, Type 3의 평균 유속은 Type 2의 2.5배에 가까우며 Kim et al. (2017a)이 제시한 임계유속을 초과하는 것을 볼 수 있다. 즉, 보 운영수위 저하에 따른 녹조 저감 효과를 기대하기 위해서는 임계유속 이상의 충분한 유속이 유지되는 정도의 수위 저하가 필요한 것으로 판단된다(Sherman & Webster 1998; Mitrovic et al. 2003).

VI. 결론

본 연구에서는 4대강사업 후 녹조문제가 빈번하게 발생하고 있는 낙동강 칠곡보-강정고령보 구간을 대상으로 3차원 수리해석 모델을 구축하였다. 모델을 실측자료로 보정한 후 보 운영 수위저하에 따른 수온, 수질 및 조류 군집별 변화를 예측하고 녹조문제의 원인이 되고 있는 남조류의 시·공간적 변동특성을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 고빈도 수온 모니터링 결과, 무강우 기간 동안 보 앞 지점은 수온 성층이 지속적으로 형성되었으나, 강우 시 수층이 혼합하고 성층이 일시적으로 해소되었고, EFDC 모델은 대상 하천에서 상층과 하층의 수온 시계열 변화를 적절히 재현하였다.
- 2) 유기물과 질소, 인 계열의 수질항목과 남조류 세포 수 모의결과는 실측자료의 시계열 변동 특성을 적절히 재현하였으나, 규조류는 봄철에, 녹조류는 전체 기간에 실측값을 과다 산정하였다. 규조류와 녹조류 예측의 오차는 복잡한 물리적, 화학적, 생물학적 상호 작용에 대한 모델의 이론적 한계와 매개변수의 불확실성, 특히 동물플랑크톤에 의한 포식 영향을 포함하지 않은 것이 중요한 원인으로 유추된다. 규조류와 녹조류 매개변수에 대한 추가적인 보정은 현재 진행 중인 조류와 동물플랑크톤 관계 연구가 완료되면 진행할 예정이다.
- 3) 수질항목과 조류 세포 수 밀도에 대한 정규성검정 결과, 모든 항목에서 비정규성 분포를 나타

냈으며, 보 운영수위 변화에 따른 수질변화를 Wilcoxon signed-rank test로 검정한 결과, 기존 관리수위와 양수제약수위 간 규조류 세포 수 밀도를 제외한 모든 항목에서 그 차이가 통계적으로 유의하였다(p -value < 0.05).

- 4) 보 운영 수위를 하한수위(EL, 14.9 m)까지 낮추었을 경우 TP, PO_4 -P, NH_4 -N 등 일부 수질항목에 대해서는 농도가 증가한 반면, Chl-a와 조류 세포 수 밀도는 급격히 감소하였다. 특히 녹조현상의 원인이 되는 남조류 세포 수 밀도는 기존 관리수위 대비 보 앞 500 m 지점 기준 수심 평균 47.5%, 표층 56.1%로 급격히 감소하여 녹조현상이 개선되는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과는 임계유속 유지와 유량증가가 보 구간의 남조류 제어에 효과적이라는 선행연구들과 일치하며, 수위저하에 따른 유속증가와 체류시간 감소로 조류의 성장이 제한된 것으로 해석된다.
- 5) 보 수위를 하한수위까지 저하하여 운영 할 경우에 대해 남조류의 공간적 분포 변화를 비교한 결과, 칠곡보-강정고령보 구간 전반에 걸쳐 남조류 세포 수 밀도는 낮아졌으며, 중, 하류 쪽으로 갈수록 감소 영향이 크게 나타났다.

그러나, 본 연구결과는 2017년이라는 제한된 기상과 유량조건에 대해 모의한 결과이므로 향후 다양한 기상과 유량조건에서 보의 개방효과를 모니터링하고 모델의 적합성을 검증할 필요가 있다. 또한 다양한 조류 종의 경쟁관계를 보다 정확히 모의하기 위해서는 동물플랑크톤을 포함하여 모의할 필요가 있으며, 조류의 기능성 그룹별 매개변수의 최적화가 필요하다.

사 사

이 논문은 2017년 K-water의 “과학적 녹조발생 원인 및 천이기작 분석” 연구과제 중 직접 실험한 자료를 일부 사용하여 수행하였음. 모델 검증을 위해 고빈도 수온자료를 제공해 주신 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).
- Chapra SC, Boehlert B, Fant C, Bierman Jr VJ, Henderson J, Mills D, Mas DML, Rennels L, Jantarasami L, Martinich J, Strzepek KM, Paerl HW. 2017. Climate Change Impacts on Harmful Algal Blooms in US Freshwaters: A Screening-Level Assessment. Environmental Science & Technology. 51(16): 8933-8943.
- Dynamic Solutions International. 2016a. EFDC Explorer8.0 and EFDC+ Guidance New Features and Functionality, Technical report.
- Dynamic Solutions International. 2016b. CVL Grid1.1 Users Guide, Technical report.
- 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 HS. 2017. Mitigation of Algal Bloom by Flow Management of Multipurpose Weirs in Nakdong River. Ph.D. Dissertation. Chungbuk National University, Chungbuk. [Korean Literature]
- Kim YK, Chung SW. 2011. Laterally-Averaged Two-Dimensional Hydrodynamic and Turbidity Modeling for the Downstream of Yongdam Dam, Journal of Korean Society on Water Environment. 27(5): 710-718. [Korean Literature]
- Kim DM, Park HS, Chung SW. 2017a. Relationship of the Thermal Stratification and Critical Flow Velocity Near. Journal of Korean Society on Water Environment. 33(4): 449-459. [Korean Literature]
- Kim SM, Park YK, Lee DJ. 2017b. Prediction of Water Quality Change in Saemangeum Reservoir by Floodgate Operation at Upstream. J. Korea Water Resour. Assoc. 50(6): 373-386. [Korean Literature]
- K-water. 2017. Analysis on the Mechanism of Algal Bloom and Seasonal Succession in 1st Year. K-water. [Korean Literature]
- K-water. 2018. Analysis on the Mechanism of Algal Bloom and Seasonal Succession in 2nd Year. K-water. [Korean Literature]
- Kim DM. 2018. Simulations of the Correlation of Algal Bloom and Critical Velocity in a Regulated River. 10pages. Master's Course. Dissertation. Chungbuk National University. Chungbuk. [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 Territory Management Administration. 2009. Primary River Planning of Nakdong River Basin. [Korean Literature]
- Murray Darling Basin Authority. 2012. Barmah Millewa Forest Environmental Water Management Plan. Australian Government, Murray Darling Basin Authority.

- 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. 2007. The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation Volume 3: Water Quality Module.
- The Board of Audit and Inspection of Korea. 2013. Audit Result Report on the Status of Main Facilities Quality and Water Quality Management in Four River Restoration Projects. The Board of Audit and Inspection of Korea. [Korean Literature].
- Yin ZH, Seo DI. 2013. Water Quality Modeling of the Ara Canal, using EFDC-WASP Model in Series. J. Kor. Soc. Environ. Eng. 35(2): 101-108. [Korean Literature]