영산강 다기능보 운영에 따른 플러싱 및 조류 배제 효과 모델링 Modeling the Flushing Effect of Multi-purpose Weir Operation on Algae Removal in Yeongsan River

정선아[†] · 이해숙 · 황현식* · 김호준

Sun-a Chong[†] · Hye-suk Yi · Hyun-sik Hwang* · Ho-joon Kim

한국수자원공사 K-water 연구원 · *한국수자원공사 물관리센터

K-water Institute, K-water · *Water Resources Operations Center, K-water

(Received September 25, 2015; Revised October 22, 2015; Accepted October 28, 2015)

Abstract : The purpose of this study was to model the effect of flushing discharge on algae removal by multi-purpose weir operation in Yeongsan River (Seungchon Weir) using a 3-dimensional (3D) model. The chlorophyceae *Eudorina* sp. formed bloom in May 2013. Flushing discharge was conducted in two different ways for algal bloom reduction. To elucidate the spatial variability, a high-resolution 3D model, ELCOM-CAEDYM, was used to simulate the spatial variations of water quality and chl-a over a month. The results showed that ELCOM-CAEDYM could reproduce highly spatially resolved field data at low cost, and showed very good performance in simulating the pattern of algal bloom occurrence. The effect of each flushing discharge operation was analyzed with the results of modeling. The results of case 1, flushing discharge using an open movable weir, showed that the algal bloom between the Seochang Bridge and the Hwangryong River junction is rapidly flushed after operating the movable weir, but the residual algae remained in the weir pool as the discharge decreased. However, the results of case 2, fixed weir overflow with a small hydropower stop, showed that most of the algae was removed after flushing discharge and the effect of algae removal was much bigger than that in case 1, as per modeling results and observed data.

Key Words : Flushing Discharge, Multi-purpose Weir, Algae Removal, *Eudorina* sp., ELCOM-CAEDYM

요약 : 본 연구는 영산강 수계 승촌보에서 시행되었던 조류배제를 위한 다기능보 운영 사례를 대상으로, 3차원 모델링을 통한 효과 분석을 목적으로 수행되었다. 2013년 5월 영산강 승촌보 구간에서 녹조류 *Eudorina* sp.가 대량 발생하였으며, 집적된 녹조의 배제를 위하여 서로 다른 방법으로 두 차례에 걸쳐 플러싱 방류를 시행하였다. 조류 발생의 공간적 분포에 대한 상세 분석과 이해를 위해 고해상도의 3차원 모형 ELCOM-CAEDYM을 적용하여 1개월 동안의 수질과 chl-a 분포를 모의하였다. 모델링 결과 ELCOM-CAEDYM 모형은 실제 조류의 발생 패턴을 우수하게 모의하였으며, 저비용으로 조류 발생에 대한 고해상도의 공간적인 데이터를 재생산 하는데 적합할 것으로 판단되었다. 모델링 결과를 이용하여 두 가지 방법의 플러싱 방류 CASE를 분석한 결과, 가동보를 이용하여 플러싱 방류를 실시한 CASE1의 경우 서창교~황룡강 합류지점에 발생하였던 조류는 가동보 운영에 의하여 빠르게 하류로 이동되었으나, 이후 방류량이 감소하면서 보 내에 잔류하였던 것으로 분석되었다. 반면, 소수력발전을 중단하고 고정보를 통한 월류를 실시한 CASE2는 비교적 배제 효과가 크게 나타나 대부분의 조류가 플러싱되어 감소된 것을 관측 자료와 모델링 결과로서 확인할 수 있었다.

주제어 : 플러싱 방류, 다기능보, 조류저감, 유도리나, ELCOM-CAEDYM

1. 서론

다기능 보가 위치한 4대강의 본류 구간은 1960년대 이후 급속한 산업화와 도시화, 인구밀도 증가에 따른 수질오염이 심화되어 왔으며, 정부에서는 4대강의 수질개선을 위하여 물관리종합대책(1998), 물환경관리기본계획(2006) 등의 중요 대책수립과 수질오염총량제의 실시 등 많은 노력을 기울여왔다. 그 결과로 생분해성 유기물인 BOD의 농도는 전반적으로 개선되었으나, COD 등 난분해성유기물과 인(P) 및 질소(N)와 같은 영양염의 오염도는 오히려 증가되거나 감소 효과가 크지 않은 것으로 평가되어 여전히 개선해야 할 과제로서 남아있다. 또한 하류 구간에서의 빈번한 조류 발생은 최근 사회적인 문제로 대두되면서 시급한 해결 방안이 요구되고 있다.

영산강은 4대강 중 수질 오염도가 가장 높은 것으로 알려져 있으며, 영산강 하류에서는 고농도 인과 질소로 인한 부영양화, 저층 산소고갈, 연중 고농도 식물플랑크톤 발생 등이 상시적인 환경문제로 보고되고 있다.¹⁾ 또한 4대강 사업 이후 2012년부터 시행된 수질예보제의 수질관리단계 발령 기준 “주의” 이상의 발령 빈도가 4대강 수계 중 가장 높은 것으로 조사되었으며,²⁾ “관심” 단계 이상 발령 일수는 2012년도에 119일, 2013년도에 49일을 기록하기도 하였다.³⁾ 영산강 보 지점에서 수질악화 및 조류 발생의 원인은 하수종말처리수의 직접적인 영향이 큰 것으로 조사되기도 하였는데, 광주시 하수종말 처리수 720,000 m³/일은 승촌보에 직접 유입하며 지속적으로 조류에 영양염을 공급함으로써 연중 고농도의 조류생체량과 과영양 상태를 유발하는 것으로 나타났다.²⁾ 그러나, 아직까지 4대강의 수질 및 생태환경에

[†] Corresponding author E-mail: jsa@kwat.or.kr Tel: 042-870-7455 Fax: 042-860-0369

대한 연구는 한강과 낙동강에 집중되어 있으며, 영산강 수생태에 대한 구조적 진단과 개선 방안에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.^{4,5)} 또한 4대강 보 설치구간에서의 조류 상승 발생 구간에 대한 원인 분석 및 보 운영을 통한 저감 방안에 대한 연구는 최근 시작 단계에 있는 실정이다.

최근 기후변화 및 4대강 사업 이후 조류 발생 증가 우려가 사회적 문제로 이슈화되고 있는 시점에서, 4대강 보 내 조류 발생 저감에 관한 새로운 수질관리방안 연구의 필요성이 제기되었다. 조류 발생을 저감하기 위해서는 환경기초시설 설치, 비점오염 저감 등 사전 예방적 성격의 유역 관리대책과 황토살포, 조류제거장치 및 수류확산장치 운영 등의 하천 내 수질 관리대책 등이 있을 수 있으나, 단기간에 효과가 나타나지 않거나 국부적 효과에 그치는 등의 문제가 있을 수 있다. 따라서 효율적인 증가방류 및 가동보 운영을 통한 조류저감 기술개발의 필요성이 새롭게 대두되었다. 플러싱(Flushing) 방류는 댐 및 보에서 하류하천의 오염물질 누출 사고에 대응하기 위해서 또는 수질환경과 생태계 서식환경을 개선하기 위해 일시에 많은 양의 물을 증가시켜 방류하는 운영방법을 일컫는다.⁶⁾ 국외 연구사례로는 호주 Barwon-Darling River system에서 플러싱 방류 등 유량조절을 이용한 조류 발생 억제 방안이 제안되기도 하였으며,⁸⁾ 프랑스에서는 운하 수질관리와 조류 저감을 위한 플러싱 방류효과에 대한 연구가 보고된 바 있다.⁹⁾ 한편 미국에서는 유해 조류 대발생시 소규모 만에서의 in-lake mesocosm 실험이 수행되어 플러싱에 의한 조류 저감 효과가 입증되기도 하였다.¹⁰⁾ 국내에서는 대청댐의 플러싱 방류가 하류 금강 구간에서의 수질개선에 기여하는 효과를 분석하기 위하여 현장실험 및 모델적용 분석한 연구사례가 대표적이다.^{6,7)} 또한 2013년도에는 하절기 낙동강의 독성 남조류 수화 현상을 감소시키기 위하여 남강댐의 증가방류를 통한 플러싱이 시도되기도 하였다.²⁾ 그러나 영산강 수계의 경우 4대강 중에서 유일하게 상류에 대형 댐이 존재하고 있지 않아 댐 증가방류에 의한 댐-보 연계운영이 어려운 실정에 있으며, 다기능보 자체의 운영을 통한 해결 방안 도출이 요구되고 있다.

대청댐 플러싱 방류 사례에서는 단기 플러싱 방류가 하류 하천의 용존성 영양염류 농도저감에 뚜렷한 영향을 나타낸 것으로 보고된 바 있으나,^{6,7)} 보 설치 구간에서의 조류 성장 특성 및 성장속도를 감안하지 않은 증가방류는 조류의 영양염 이용률을 증가시켜 오히려 조류 발생이 증가되거나 하류보에 집적되는 부작용을 초래할 수 있다. 따라서 최적 가동보 운영을 위해서는 플러싱 효과에 관한 면밀한 조사 연구가 필요하며, 최소의 유량 사용으로 정체수역에 국부적으로 집적된 조류를 효율적으로 저감 할 수 있는 플러싱 방법 도출이 필요할 것으로 사료된다. 이를 위해서는 다양한 시나리오의 분석을 통해 적정 대안의 도출이 가능한 모델을 이용하는 방법이 가장 효율적일 것이다. 본 연구의 목적은 영산강 수계를 대상으로 3차원 수리·수질 모델을 이용하여 상승 조류 발생 수역의 조류 발생을 재현하고 발생 원인을 분석하며, 다기능보의 플러싱 방류를 통한 조류의 배제 효

과를 분석하는 것이다. 실제 적용되었던 조류 저감을 위한 다기능보 운영 사례를 대상으로, 3차원 ELCOM-CAEDYM 모델을 이용하여 모델링을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지

우리나라 4대강 중의 하나인 영산강은 길이 129.5 km, 유역 면적 3,455 km²로서, 3개의 직할하천, 5개의 지방하천, 151개의 준용하천으로 구성된다. 유역 면적이 전라남도 총면적의 23%를 차지하며, 행정구역상으로는 광주광역시 등 2시 8군을 포함한다. 영산강은 담양군 용추봉에서 발원하여 광주광역시, 나주시 등을 지나 서·남해로 유입되는 강이며, 유역 내 대표적인 지류 하천으로는 유역면적 564.3 km²의 황룡강과 유역면적 657.2 km²의 지석천이 있다.¹¹⁾ 영산강 상류에는 용수공급을 위한 담양댐, 광주댐, 장성댐, 나주댐 등 4개의 댐이 건설되어 있으며, 1981년에는 영산강 하구둑이 완공되어 해수유입이 차단되었다. 2011년 4대강 사업의 일환으로 영산강 수계에는 승촌보, 죽산보가 건설되었으며, 이 중 연구대상지인 승촌보는 광주광역시 남구 승촌동에 있는 다기능보로 담양댐으로부터 하류 50.8 km에 위치하며, 유역면적은 1,327 km²이다. 저수용량은 9.0 백만 m³로서 4대강에 건설된 16개 보 중에서 금강의 세종보와 한강의 강천보에 이어 3번째로 작은 저수용량을 가지고 있다.¹²⁾ 다기능보는 트러스타입 리프트게이트 형식의 4개의 가동보(길이 180 m, 월류언 표고 EL. 2.5 m)와 콘크리트 중력식 형식의 3개의 고정보(길이 304.5 m, 월류언 표고 EL. 7.5 m)로 구성된다. 또한, 어도는 보 좌안에 조립형 아이스하버식 1개와 구하도에 볼랜드식 어도 1개가 위치하며 발전용량 800 kw, 최대 발전수량 28 m³/sec의 수력발전소를 설치하여 운영 중이다.¹²⁾

2.2. 모델 원리

4대강의 보설치 구간은 수심 폭이 넓고 수심 5 m 이상이 대부분을 차지하는 대하천에 해당한다. 또한 방류는 가동보, 고정보, 소수력발전, 어도 등으로 세분화되어 있어 횡방향의 해석이 중요한 부분을 차지하며 수리·수질모의 적용시 높은 해상도의 지형격자가 요구된다. 이러한 특성을 잘 재현하기 위해 본 연구에서는 3차원 수리-수질 연동 모형인 ELCOM-CAEDYM을 승촌보 구간에 적용하였다.

ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)은 호수, 저수지, 하구, 해양 등에 적용 가능한 3차원 수리 동력학 모델로서, 서호주 대학(The University of Western Australia)의 물연구센터(CWR, Centre for Water Research)에서 개발되었다. 이 모델은 CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)과 연결(Coupling)되어 호수와 저수지의 수질 및 생태계의 동적 모델링을 위한 3차원 수리 해석 결과를 제공하며 현재 유체물리학 연구에 활발히 적용

되고 있다. 지배방정식은 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이송·확산방정식이 포함된다. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하며, 기본적으로 유체의 특성에 대해서는 Boussinesq 가정과 수직방향의 운동량 방정식은 정수압(Hydrostatic pressure) 이론을 사용하지만, 비정수압(Non-hydrostatic)이 중요한 경우에는 non-hydrostatic code 옵션을 사용하여 수직방향의 운동량 방정식을 포함할 수 있다.¹³⁾

1) 운동량 방정식

• x-방향

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + f_v \quad (1)$$

• y-방향

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - f_u \quad (2)$$

• z-방향(Hydrostatic pressure assumption)

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

2) 연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

3) 자유수면 방정식

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{h_0}^\eta u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{h_0}^\eta v dz \right] = 0 \quad (5)$$

4) 물질 이송·확산 방정식

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \kappa_h \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \kappa_h \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \kappa_v \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + S_c \quad (6)$$

여기서 u 는 x방향 유속(m/s), v 는 y방향 유속(m/s), w 는 z방향 유속(m/s), g 는 중력가속도(9.81 m/s^2), η 는 표면 수위(m), ρ 는 밀도(kg/m^3), ρ_0 는 물의 밀도(kg/m^3), ρ' 는 밀도차(kg/m^3), ν_h 는 운동량의 와확산계수(m^2/sec), p 는 압력(N/m^2), f 는 전향력계수($2 \omega \sin \phi$, ω 는 지구자전각속도 $7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, ϕ 는 위도), κ_v 는 오염물질의 수직방향 와확산계수(m^2/sec), 그리고 κ_h 는 오염물질의 수평방향 와확산계수(m^2/sec)이다.

CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)은 다양한 수리모델과 쉽게 연결될 수 있도록 설계된 수생태계 모델이다. CAEDYM 모형의 장점은 수체 내에서의 다양한 물질 순환과 여러 종의 조류 그룹을 포함한 생태계 순환의 모델링이 가능하다는 점이다. 즉, 이 모델은 C, N, P, Si 항목의 다양한 순환과정, DO 순환, 6개 그룹의 무기 부유물질(SS)과 같은 수질모의항목과 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류 등의 생태모의 항목을 포함한다. CAEDYM은 7개 그룹의 식물성플랑크톤을 모의할 수 있어 환경요인에 따른 조류 발생의 특성을 비교적 정확하게 모델링할 수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁴⁾

2.3. 모델 구성 및 적용

승촌보 구간의 지형파일을 구성하기 위해 4대강 보 구간에 구축된 HEC-RAS 모형의 하상단면 입력자료를 이용하

Fig. 1. The bathymetry of ELCOM model for Seung-chon Weir waterbody.

Fig. 2. Algal bloom occurrence in Yeongsan River (May 2013) (a) spatial coverage of surface bloom visual observations, (b) algal bloom in Seung-yong Bridge (23 May 2013) and (c) Seung-chon Weir (23 May 2013).

였다. 보구간 하천의 바닥지형 3차원 XYZ 좌표를 얻고자 HEC-RAS로부터 추출된 500 m 간격의 단면 XYZ 좌표를 ArcView 프로그램을 이용하여 각각 TIN과 GRID 생성 절차를 거친 후 최종 10 m × 10 m 해상도의 DEM을 구성하였다. 추출된 XYZ 좌표를 이용하여 최종 20 m × 20 m × 1 m (X*Y*Z) 크기의 활성 셀(cell) 184,639개로서 지형격자를 완성하였다. 전술된 대로 승촌보에서의 방류는 가동보, 고정보, 소수력발전, 어도 등으로 세분화되어 있어 횡방향의 정확한 수리적 해석과 구조물 반응을 위하여 고해상도의 격자를 구성하였고, 모형에서는 격자 크기를 반영하여 총 14개의 방류 경계조건(가동보 4개, 고정보 8개, 소수력 1개, 어도 1개)을 구성하여 모의하였다.

다기능보 운영방법별 조류배제 효과를 분석하기 위하여 실제 조류 발생 및 이에 따른 다기능보 운영 사례를 대상으로 모델 분석을 실시하였다. 대상 사례는 2013년 5월 승촌보의 녹조류(*Eudorina* sp.) 대량 발생에 의한 보 운영 사례를 선정하였다. 승촌보 상류 4 km지점까지 국지적으로 조류가 부유하였으며, 서창교~황룡강 합류지점까지 좌안 저수로 사면에 조류가 집적 되는 현상이 관찰되었다. 녹조류 발생 분포현황은 Fig. 2와 같다. 발생된 조류는 *Eudorina* sp.로서 모내기철 논에서 주로 발생하는데, 모내기 후 강우시 물고작업 등으로 영산강으로 유입된 후 높은 수온과 풍부한 영양염으로 인해 수체 내에서 대량 번식한 것으로 추정된다. 집적된 녹조의 배제를 위하여 5월 9일 및 5월 23일~27일 등 두 차례에 걸쳐 다기능보 운영을 통한 방류를 시행하였으며, 실제 운영된 사례를 모의 분석하였다.

시뮬레이션 기간은 2013년 5월 1일부터 5월 31일까지 1개월을 모의기간으로 하였다. 계산간격은 60 sec로 하였으며, 지정된 계산간격의 CFL number가 1 이하의 값을 나타내어 모델이 수치적으로 안정하였음을 확인하였다. 기상자료는 기상청 광주기상대 관측 자료를 이용하였으며 시간별

기온, 풍향, 풍속, 기온, 일사량, 상대습도, 운량 항목을 경제조건으로 하여 입력하였다. 유입 유량 및 다기능보 방류량 자료는 K-water의 실시간수문정보시스템(HDAPS) 및 4대강 다기능보 수문 운영현황 시스템(4RDS)의 시간별 자료를 이용하였다. 다기능보의 운영은 고정보, 가동보, 어도 및 소수력 발전유량을 위치별로 정확히 반영하여 설정하였다. 유입지류인 황룡강의 수온과 수질은 K-water에서 자체 조사한 구간단위의 자료를 이용하였으며, 영산강 상류 경계지점은 환경부 수질측정망 관측 자료를 이용하여 구성하였다.¹⁵⁾ 경제조건으로 입력된 수질 항목은 총 11개 항목(DO, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, Chlorophytes, DOCL, POCL, DONL, PONL, DOPL, POPL)이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델 재현성 검토

모델에서 계산된 수위 값과 실측 수위 값의 비교를 통해 모델이 유출입량에 의한 4대강 다기능보의 물수지를 재현하는지 알아보았다. 모델의 오차정도에 대해서는 RMSE (Root Mean Square Error, 평균자승근오차), AME (Absolute Mean Error, 절대상대오차)를 산정하였으며 각각 지수에 대한 계산식은 아래와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$AME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (8)$$

Fig. 3. Comparison between simulated and observed values of water surface elevation in Seung-chon Weir (May 2013).

여기서 O는 관측값, P는 예측값, n은 관측 및 예측값 데이터 쌍의 개수를 의미한다. 승춘보의 실제 유입과 평상시 방류 및 플러싱 방류 조건 등을 모두 반영하여 수위 변동을

모의한 결과 Fig. 3과 같이 재현성이 높은 것으로 평가되었다.

한편 기초수질, 영양염, 조류생체량 등 수질 항목별 보정 결과는 Fig. 4와 같다. 보 앞 지점에서 주간별로 조사된 관측 자료와 모델에서 계산된 값을 비교 검토하였다. 대부분의 항목이 관측 값과 유사하게 모의 되는 것을 확인하였다. 단, PO₄-P 항목은 5월 20일 이후 다소 과소평가 되었는데, 이는 상류로부터의 경계 조건(영산강 본류 및 황룡강)이 부정확하였기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 보다 정확한 모델링을 위해서는 보 앞 지점뿐만 아니라 상류의 주요 유입수의 경계조건에 대한 체계적인 모니터링이 필요하다고 할 수 있겠다. Chl-a는 *Eudorina* sp. 발생에 의한 농도 증가와 배제를 위한 방류방법 변경 등의 효과가 비교적 잘 반영되어 우수하게 모의 된 것으로 평가된다. 모델 보정에 적용된 수리 및 수질관련 매개변수를 Table 1~2에 정리하여 나타내었으며, 타 연구에서 적용되었던 매개변수를 함께 나타내었다. 또한, 보정결과 수질항목에 대한 모델 오차(RMSE, AME)는 Table 3에 제시하였다.

Table 2. Water quality parameters used in CAEDYM application to Yeongsan River

Parameter	Description	Unit	Assigned value	Reference
$\mu_{\max}$	Maximum specific growth rate	/day	1	1.1 ¹⁷ -1.2 ¹⁸
Y_{cc}	Average ratio of C to chlorophyll a	mg-C/mg-Chl.a	15	40 ¹⁷
I _{st}	Light saturation for max. production	$\mu E/m^2/s$	100	100 ¹⁸ -130 ¹⁷
K_{pa}	Half saturation constant for P	mg/L	0.003	0.008 ^{17,18}
K_{na}	Half saturation constant for N	mg/L	0.060	0.030 ¹⁸
K_{Ca}	Half saturation constant for C	mg/L	2	-
K_{sa}	Half saturation constant for Si	mg/L	0	-
Phytoplankton parameters	IN _{min/max}	Min/max internal N concentration	mg-N/mg-Chl.a	3.0/9.0
	IP _{min/max}	Min/max internal P concentration	mg-P/mg-Chl.a	0.3/0.6
	IC _{min/max}	Min/max internal C concentration	mg-C/mg-Chl.a	15/80
	v_T	Temperature multiplier for growth	-	1.06
	T_{sta}	Standard temperature	°C	20.0
	T_{opt}	Optimum temperature	°C	25.0
	T_{max}	Maximum temperature	°C	33.0
	k_r	Respiration rate coefficient	/day	0.065
	v_R	Temperature multiplier for respiration	-	1.08
Nutrient parameters	koN2	Denitrification rate coefficient (20 °C)	/day	0.01
	KN2	Inverted half-saturation constant for effect of oxygen on denitrification	mg/L	0.5
	vON	Temperature multiplier for denitrification	-	1.08
	koNH	Nitrification rate coefficient (20 °C)	/day	0.050
	KOn	Half-saturation constant for effect of oxygen on nitrification	mg/L	2
	vN2	Temperature multiplier for nitrification	-	1.08
	PON1 _{max}	Rate coefficient of PONL to DONL (20 °C)	/day	0.010
	DON1 _{max}	Rate coefficient of DONL to NH ₄ (20 °C)	/day	0.003
	POP1 _{max}	Rate coefficient of POPL to DOPL (20 °C)	/day	0.01
	DOP1 _{max}	Rate coefficient of DOPL to PO ₄ (20 °C)	/day	0.005

Fig. 4. Model calibration of surface water quality near the Seung-chon Weir (a) water temperature, (b) dissolved oxygen, (c) phosphate, (d) chlorophyll-a.

Table 1. Hydrodynamic parameters used in ELCOM application to Yeongsan River

Parameters	Variable	Unit	Assigned value	Reference
Horizontal eddy diffusivity	DX	m ² /s	1	-
Bottom drag coefficient	CD	-	0.005	0.005 ¹⁶⁾
Extinction coefficient for NIR (700-2,000 nm)	λ_{NIR}	/m	1	1 ¹⁶⁾
Extinction coefficient for PAR (400-700 nm)	λ_{PAR}	/m	0.25	0.25 ¹⁶⁾
Extinction coefficient for UVA (320-400 nm)	λ_{UVA}	/m	1	1 ¹⁶⁾
Extinction coefficient for UVB (300-320 nm)	λ_{UVB}	/m	1	1 ¹⁶⁾
Mean albedo for short wave radiation	α_{SW}	-	0.08	0.08 ¹⁶⁾

Table 3. Water quality model error statistics for the Seung-chon Weir

Constituent	RMSE	AME
Temperature (°C)	3.3	2.4
DO (mg/L)	2.1	1.4
PO ₄ -P (mg/L)	0.037	0.027
Chl-a (mg/m ³)	16.1	12.2

3.2. 조류 발생의 공간적 분포 및 원인 분석

2013년 5월 영산강에서 발생한 녹조류 *Eudorina* sp.는 2012년 5월에도 승촌보에서 대규모로 발생이 관찰되었다. 최 등²¹⁾의 조사 결과에 따르면 *Eudorina* sp.는 영산강 상류에서 봄철에 많이 발생하는 조류 종으로 기록되어 있으며 연중 7번째로 많은 생체량이 관찰된 종으로 보고되었다. 따라서 4대강 사업 이전에도 수온이 급격히 상승하고 모내기 작업이 이루어지는 5월에 출현 빈도가 높고 많은 양으로 발생되었을 것으로 추정된다. 또한 발생 패턴을 분석하였을 때 매년 비슷한 시기에 우점할 확률이 매우 높은 것으로 판단되었다. 이와 같이 발생 가능성이 높은 5월 녹조류의 발생을 대상으로 재현성이 높은 예측 모형을 구축한다면 향후 보 운영 관리에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

조류 발생이 가장 극심하였던 시기(5월 23일)의 조류 발생 분포를 모델이 적절하게 재현하는지 검토한 결과, Fig. 5와 같이 승촌보 상류~승용교까지의 국지적인 조류 발생과 서창교~황룡강 합류지점 구간에서 조류가 집적되는 현상(Fig. 2)을 모델이 매우 유사하게 재현함을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 조류 발생의 공간적 분포는 보가 설치된 대하천 구간의 수리적인 특성과 매우 밀접하게 연관되어 있음이 파악되었는데, 공간적인 유속분포를 모의한 Fig. 6과 같이 조류가 집적되는 구간은 갑자기 유속이 느려지는 정체구간과 정확하게 일치하였다. 따라서 본 연구에서 수행된 고해상도

Fig. 5. The distribution of simulated chl-a concentration in Yeongsan River (23 May 2013).

Fig. 6. The distribution of simulated velocity in Yeongsan River (23 May 2013).

의 3차원 수리수질모형은 상습적인 조류 발생 구간과 발생 규모를 예측하는데 적합한 것으로 판단된다. 4대강 보구간은 유하거리가 길어 조류 발생시 모니터링에 많은 비용과 시간이 소요되지만 본 연구에서와 같은 모델링 결과를 이용하면 저비용으로 조류 발생에 대한 고해상도의 공간적인 데이터를 재생산 하는데 효율적인 것으로 사료된다.

3.3. 플러싱 방류에 의한 조류 배제효과 분석

2013년 5월 승촌보 조류 발생에 따른 상류 집적 조류의 배제를 위한 방류는 총 2회에 걸쳐 이루어졌으며, 상세 내용은 Table 4와 같다. CASE1 (2013년 5월 9일 시행)은 사전 시험 방류 성격의 조치로서 리프트게이트 형식의 4개의 가동보

중 2개의 가동보(2, 3번)를 30 분간 0.5 m 하부 개방하여 플러싱 방류를 실시하였으며, 방류량은 $406 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었다. 또한 CASE2 (2013년 5월 23일~27일 시행)는 소수력 발전을 중지하고 월류 수심을 증대하여 고정보의 월류를 통해 조류배제를 시도하였다. 5월 23일 소수력 발전방류를 중지하

Table 4. Analysis case of weir operation for algae removal

Scenario	Date	Weir operation	Total outflow volume (m^3)
CASE1	2013.5.9	#2, 3 movable gate open (0.5 m, 0.5 h) small hydro power stop	0.4×10^6
CASE2	2013. 5.23~27	Small hydro power stop increase a overflow at fixed weir	10.0×10^6

Fig. 7. Discharge of Seungchon weir in May 2013 (a) movable weir, (b) fixed weir, (c) small hydropower and fishway.

Fig. 8. Changes of the spatial distribution of chl-a concentration (CASE1) (a) before flushing, (b) after flushing.

고 수위를 증가시킨 후 시행되었기 때문에 실제 고정보를 통한 방류는 5월 24일부터 시작되었다(Fig. 7).

ELCOM-CAEDYM 모델을 이용하여 각각의 CASE를 재현하여 분석하였다. CASE1의 경우 상류에서는 플러싱 효과가 있었지만 보 앞 지점에서는 발생된 조류가 배제되지 못하고 잔류하였던 것으로 나타났다(Fig. 8). 즉, 보 상류 서창교 지점까지 발생하였던 조류는 가동보 운영에 의하여 빠르게 하류로 이동되었으나 이후 방류량이 감소하면서 전량 배제되지 못하였으며, 가동보의 종류가 리프트게이트 형식으로서 하부 배제로 운영되었으므로 상층에 부유하였던 조류생체량의 상당 부분은 보 내에 체류하였던 것으로 분석되었다. 5월 중순이후 상류로부터 영양염이 공급되고 수온이 빠르게 상승하자 같은 양상으로 조류가 다시 성장하였으며, 5월 20일 이후 급격히 증가하자 이를 저감하기 위해 고정보 월류를 통한 플러싱(CASE2)이 시행되었다. CASE2는 고정보로의 월류와 동시에 5월 27~28일 40 mm의 강우의 영향으로 상류 유역과 황룡강으로 부터의 유입이 증가하여 배제효과가 더욱 크게 나타났으며, 대부분의 조류가

플러싱되어 저감된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 9). 한편 이와 같은 결과는 주요 조류 발생 지점에서의 표층 조류농도 변화를 비교 분석하여 정량적으로 분석하였다(Fig. 10). 다기능보 운영 CASE1의 경우 상류인 서창교 부근에서는 집적된 조류가 배제되어 chl-a의 농도가 100 mg/m^3 에서 47 mg/m^3 으로 급감하였으나, 승촌보 앞 지점에서는 농도 저감 현상이 뚜렷하지 않았다. 반면 CASE2 운영 이후에는 서창교 지점의 chl-a 농도는 최고 187 mg/m^3 에서 최저 55 mg/m^3 으로 승촌보 앞 지점에서는 최고 200 mg/m^3 에서 최저 50 mg/m^3 으로 감소하여 집적된 조류의 배제 효과가 보 전 구간 에 걸쳐 나타났음을 알 수 있었다.

이와 같은 결과를 종합하면 조류의 발생 규모와 공간적 분포를 고려하여 조류 배제를 위한 방류 시간과 유량이 결정되어야 하며, 보별로 상류와 유입지류 영향 특성이 상이하기 때문에 각각의 특성을 반영하여 운영방안이 수립되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 조류방제 및 다기능보 운영 효과 분석 도구로서의 모델 활용성을 확인하였으며, 향후 유사한 사례 발생시 3차원 모델을 이용한 사전예측으로 보다 효과적인 보 운영이 가능할 것으로 사료된다.

Fig. 9. Changes of the spatial distribution of chl-a concentration (CASE2) (a) before flushing, (b) after flushing.

Fig. 10. The temporal variability of surface chl-a concentration (a) Seung-chon Weir, (b) 1 km downstream from Seo-chang Bridge.

4. 결론

1) 4대강 다기능 보 건설 이후 하천 환경변화 및 보 내에서 발생하는 녹조를 효과적으로 저감시키고, 하류에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 과학적이고 체계적인 녹조 저감기술 개발이 필요하다.

2) 본 연구는 영산강 수계 승촌보에서 시행되었던 조류배제를 위한 다기능보 플러싱 운영 사례를 대상으로, 3차원 모델링을 통하여 효과를 분석하고 향후 조류 저감을 위한 가동보 운영방안 수립의 사전연구로서 수행되었다.

3) 집적된 녹조의 배제를 위하여 5월 9일(CASE1) 및 5월 23일~27일(CASE2) 등 두 차례에 걸쳐 방류를 시행하였다. CASE1을 분석한 결과 서창교~황룡강 합류지점에 발생하였던 조류는 가동보 운영에 의하여 빠르게 하류로 이동되었으나, 이후 방류량이 감소하면서 보 내에 잔류하였던 것으로 분석되었다. 반면, CASE2는 고정보로의 월류와 함께 상류에서의 유입량이 증가하면서 비교적 배제 효과가 크게 나타나 대부분의 조류가 플러싱되어 배제된 것을 확인 할 수 있었다.

4) 이와 같은 결과를 토대로 조류의 발생 규모와 공간적 분포를 고려하여 방류 시간과 유량이 결정되어야 하며, 보 별로 상류와 유입지류 영향 특성이 상이하기 때문에 각각의 특성을 반영하여 운영방안이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

5) 또한, 향후 유사한 사례 발생시 3차원 모델을 이용한 사전예측으로 보다 효과적인 보 운영이 가능할 것으로 사료된다.

KSEE

References

1. Son, M. S., Park, J. H., Lim, C. H., Kim, S. K. and Lim, B. J., "Seasonal change of phytoplankton community and water quality in Yeongsan River watershed," *Korean J. Environ. Biol.*, **31**(2), 105~112(2013).
2. K-water, Development of methods for optimal algae control

reflecting the algae growth characteristics of weirs in four major rivers, K-water Institute Research Report(2013).

3. Korea Ministry of Environment, Algal bloom and management annual report 2014, pp. 86~89(2015).
4. Kim, Y. J., "Dynamics of phytoplankton community in Yeongsan River," *Algae*, **18**(3), 207~215(2003).
5. Jeong, B. K., Kim, Y. J., Jung, S. W., Lee, H. Y. and Shin, Y. S., "Temporal variation and identification of a centric diatom, *Stephanodiscus* spp. during winter-spring blooms in the Yeongsan River," *Korean J. Limnol.*, **47**(4), 273~281 (2014).
6. Chung, S. W. and Kim, Y. K., "Impact of a flushing discharge from an upstream dam on the $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations during winter seasons in Geum River," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **21**(6), 609~616(2005).
7. Chung, S. W., Ko, I. H., and Kim, Y. K., "Effect of reservoir flushing on downstream river water quality," *J. Environ. Manage.*, **86**, 139-147(2008).
8. Mitrovic, S. M., Chessman, B. C., Bowling, L. C. and Cooke, R. H., "Modelling suppression of cyanobacterial blooms by flow management in a Lowland River," *River Res. Appl.*, **22**, 109~114(2006).
9. Fovet, O., Genthon, O., Litrico, X. and Belaud, G., "Managing invasive algae with flushing flows : new perspectives for canal control," Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2012, Albuquerque New Mexico, pp. 2177~2187(2012).
10. Hayden, N. J., Roelke, D. L., Brooks, B. W., Grover, J. P., Neisch, M. T., Valenti, T. W., Prosser, K. N., Gable, G. M., Umphres, G. D. and Hewitt, N. C., "Beyond hydraulic flushing : deep water mixing take the harm out of haptophyte algal bloom," *Harmful algae*, **20**, 42~57(2012).
11. Yeongsan River Flood Control Office Home Page, <http://www.yeongsanriver.go.kr/>(2010).
12. K-water, Dam Operation Handbook, pp. 14~15(2013).
13. Hodges, B. and Dallimore, C., Estuary, lake and coastal ocean model : ELCOM user manual, Centre for Water Research, University of Western Australia(2007).
14. Hipsey, M. R., Romero, J. R., Antenucci J. P., and Hamilton, D. P., Computational aquatic ecosystem dynamics model :

- CAEDYM user manual, Centre for Water Research, University of Western Australia(2004).
15. Water Information System Home Page, <http://water.nier.go.kr/>(2015).
 16. Chung, S. W., Hipsey, M. R. and Imberger, J., "Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified lake: Daecheong Reservoir, Korea," *Environ. Modelling*, **24**, 1467~1482(2009).
 17. Vilhena, L. C., Hillmer, I. and Imberger, J., "The role of climate change in the occurrence of algal blooms : Lake Burrigorang, Australia," *Limnol. Oceanogr.*, **55**(3), 1188~1200(2010).
 18. Linden, L., Daly, R. I. and Burch, M. D., "Suitability of a coupled hydrodynamic water quality model to predict changes in water quality from altered meteorological boundary conditions," *Water*, **7**, 348~361(2015).
 19. Westernhagen, N. V., Measurements and modelling of eutrophication processes in Lake Rotoiti, New Zealand, The University of Waikato(2010).
 20. Missaghi, S. and Hondzo, M., "Evaluation and application of a three-dimensional water quality model in a shallow lake with complex morphometry," *Ecol. Modelling*, **221**, 1512~1525(2010).
 21. Choi, M. K., Kim, B. H. and Choi, K. C., "Freshwater algae in the upstream of the Yongsan River system(1) - on the drinking water supplying area of Kwangju districts," *Korean J. Sanitation*, **10**(1), 45~65(1995).