

Research Paper

EFDC 모델에 의한 세종보의 부영양화 및 제어대책 평가

윤여정 · 장은지 · 박형석 · 정세웅

충북대학교 환경공학과

Evaluation of Eutrophication and Control Alternatives in Sejong Weir using EFDC Model

Yeojeong Yun · Eunji Jang · Hyung-Seok Park · Se-Woong Chung

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

요약: 본 연구의 목적은 금강의 중류에 위치한 갑천과 미호천의 직접적 영향을 받는 대청댐과 세종보 구간에 대해 3차원 수리-수질 해석 모델인 EFDC를 구축하고 모델을 보정한 후, 대청댐의 유량조절과 갑천 및 미호천의 부하량 삭감 시나리오에 따른 세종보 구간의 영양상태와 수질개선 효과를 평가하는데 있다. EFDC 모델은 2012년 9월부터 2013년 4월까지 측정된 수위, 수온 및 수질 변수를 사용하여 보정하였으며, 모델은 실측 수위의 변화와 수온 및 수질의 공간적, 시간적 변화를 재현했다. 연구결과, 연구대상 하천구간에서 영양염류와 조류 생체량의 공간 분포는 횡단 방향의 변화가 크다는 것을 확인 하였다. 또한 조류 성장 제한 요인 분석 결과, 갑천과 미호천에서 세종보에 이르는 인 부하가 부영양화와 녹조발생을 일으키는 요인으로 나타났다.

시나리오 모의결과, 갑천과 미호천의 오염 부하량 감축은 청원-1지점의 경우 Chl-a 4.7~18.2%, T-P 5.4~21.9%, 연기지점은 Chl-a 4.2~17.3%, T-P 4.7~19.4% 저감하여 대상 하천의 수질 개선과 부영양 지수 개선에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 한편, 대청댐 및 세종보의 유량을 조절하는 시나리오인 청원-1지점의 경우 Chl-a 1.5~2.4%, T-P 2.5~3.8%, 연기지점은 Chl-a 1.2~2.1%, T-P 0.9~1.5% 저감되어 수질 개선에 거의 영향을 미치지 않았다. 따라서 세종보의 녹조저감과 수질개선 목표를 달성하기 위해서는 갑천과 미호천의 수질 개선이 필수적이며 가장 중요한 선결 조건이라 판단된다.

주요어: EFDC, 세종보, 금강, 부영양화, 녹조

Abstract: The objectives of this study were to construct a three-dimensional (3D) hydrodynamic and water quality model (EFDC) for the river reach between the Daecheong dam and the Sejong

First Author: Yeojeong Yun, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea, E-mail: jjbyyj0105@naver.com

Corresponding Author: Se-Woong Chung, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: chung@chungbuk.ac.kr

Co-Author: Eunji Jang, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea, E-mail: eunji880813@naver.com

Hyung-Seok Park, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea, E-mail: qwrs07@gmail.com

Received: 31 August, 2018. Revised: 27 September, 2018. Accepted: 19 October, 2018.

weir, which are directly affected by Gap and Miho streams located in the middle of the Geum River, and to evaluate the trophic status and water quality improvement effect according to the flow control and pollutant load reduction scenarios. The EFDC model was calibrated with the field data including water level, temperature and water quality collected from September, 2012 to April, 2013. The model showed a good agreement with the field data and adequately replicated the spatial and temporal variations of water surface elevation, temperature and water quality. Especially, it was confirmed that spatial distributions of nutrients and algae biomass have wide variation of transverse direction. Also, from the analysis of algal growth limiting factor, it was found that phosphorous loadings from Gap and Miho streams to Sejong weir induce eutrophication and algal bloom. The scenario of pollutant load reduction from Gap and Miho streams showed a significant effect on the improvement of water quality; 4.7~18.2% for Chl-a, 5.4~21.9% for TP at Cheongwon-1 site, and 4.2~17.3% for Chl-a and 4.7~19.4% for TP at Yeongi site. In addition, the eutrophication index value, identifying the trophic status of the river, was improved. Meanwhile, flow control of Daecheong Dam and Sejong weir showed little effect on the improvement of water quality; 1.5~2.4% for Chl-a, 2.5~3.8% for TP at Cheongwon-1 site, and 1.2~2.1% for Chl-a and 0.9~1.5% for TP at Yeongi site. Therefore, improvement of the water quality in Gap and Miho streams is essential and a pre-requirement to meet the target water quality level of the study area.

Keywords : EFDC, Sejong Weir, Geum River, eutrophication, algal bloom

I. 서론

우리나라의 연평균 강수량은 세계 평균의 1.6배에 달하지만, 강수량이 대부분 여름철에 집중되어 물의 이용 및 치수 측면에서 모두 취약하다. 또한 전 지구적 기온상승과 기후변화는 수생태계에도 영향을 끼칠 수 있다는 보고에 따라 체계적인 수자원 관리가 필요한 실정이다. 한편, 이명박 정부는 전국 주요 하천의 이수, 치수, 수질 환경 개선을 목표로 하는 '4대강 정비사업(2009-2012)'을 단기간에 수행하였으며, 하도 준설과 16개의 보를 설치함으로써 수자원을 확보하고자 하였다(MLTMA 2009). 그러나 사업 후 하천의 정체수역과 체류시간이 증가하면서 보 구역의 수질악화와 남조류 증식에 의한 잦은 녹조발생의 원인을 제공했다는 보고도 있다(Kim 2013; Committee of research and evaluation for 4-rivers project 2014). 또한 보의 관리수위를 일정하게 유지함으로써 하천수의 수온구조와 수질에 영향이 더욱 커질 것으로 예상된다(Han et al. 2013). 2017년 문재인 정부 출범 후 환경부는 일부 보의 개

방 또는 관리수위보다 낮게 운영함으로써 수질을 개선하고자 노력하고 있으며, 이에 대한 평가가 진행 중에 있다. 일반적으로 하천의 수질은 유역의 오염부하량과 수체 내에서 이들 물질의 물리적, 생물화학적 반응 과정, 그리고 물리적 수리학적 흐름 특성 등에 의해 결정된다. 따라서 보 구간의 수질개선을 위해서는 이러한 요인들의 변화가 수질에 미치는 정량적 평가가 필요하며, 최소한의 비용으로 최대의 효과를 얻을 수 있는 대안을 마련해야 한다.

연구 대상지역인 금강의 대청댐-세종보 구간은 주변에 대전시와 청주시 등 대도시가 위치하고 있으며, 유역에서 배출되는 대형 하수처리장의 방류수 영향으로 인해 하천수질이 악화되는 문제가 지속되어 왔다(Kim et al. 2012b). 4대강 정비사업으로 금강에는 세종보, 공주보, 백제보 3개의 보가 설치되어 운영 중에 있으며, 환경부에서 각 보를 대상으로 정기적으로 수질과 조류 모니터링을 실시하고 있다. 금강은 Chl-a의 농도로 평가 할 경우, WHO(World Health Organization) 부영양화 판별 기준인 50 mg/m³을 초과하는 경우가 빈번히 발생하고 있어 수

질오염과 생태계 건강성에 대한 우려가 커지고 있다. 특히 세종보는 행정수도인 세종시가 인접해 있으며, 친수공간으로써의 활용가치가 증가하고 있어 수질관리가 더욱 중요하게 대두되고 있다.

4대강 사업 이후 변화된 금강의 하천환경을 고려하여 수질오염 원인을 해석하고 경제적이면서도 효과적인 수질개선 대책을 모색하기 위하여 수질모델링 기술이 활용될 수 있다. 그동안 금강을 대상으로 적용된 하천 수질모델은 단면 평균 1차원 모형인 CE-QUAL-RIV1과 KORIV-1, 횡방향 평균 2차원 모형인 CE-QUAL-W2, 수심평균 2차원 모형인 RMA4 등이 적용된 바 있다(Chung 2004; Jung et al. 2008; Song 2013). 그러나 단면평균 1차원 모형은 수질의 횡방향과 수직방향을 평균화하여 해석하고, 횡방향 평균 2차원 모형은 오염 지류하천과 점오염원 유입에 따른 횡방향 혼합구간을 고려하지 못하는 한계를 가지고 있다. 또한 수심평균 2차원 모형은 수심이 깊은 보 구간 등의 수질 해석에 한계를 가진다. 따라서 보의 설치로 정체수역이 확대되고 수심이 깊어진 하천환경과 갑천 및 미호천의 오염지류하천 유입에 따른 오염물질의 공간적 확산 영향을 적절히 고려하기 위해서는 3차원 수리-수질 모형을 이용한 해석이 요구된다.

Yin and Seo(2013)은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 수리모형과 WASP 수질모형을 연계하여 수리 동역학적 변화를 예측하고 이를 수질모델에 적용했을 시에 발생할 수 있는 수리, 수질 상황에 대한 분석 및 관리대안 수립을 지원할 수 있는 시스템을 구축한 바 있다. 이와 같이 국내에서는 EFDC 모형과 WASP 모형을 순차적으로 연계한 비연동(Decoupled) 수리-수질 모델링 기법을 적용한 사례들이 많다. 그러나 이러한 방법은 수리모델의 보정에 필요한 시간을 단축하는 장점은 있으나, 수리-수질의 연동해석이 중요한 경우 오차의 원인이 될 수 있다. 특히, 녹조현상과 같이 조류의 시공간적 변화가 수리 및 수온과 밀접히 관련된 경우에는 수리-수질 연동(Coupled)해석 모델을 적용하는 것이 더 과학적인 해석이 가능하다. Kim et al.(2012a)은 4대강 사업 이전의 금강 대청조정지대부터 금강하구

까지의 구간을 대상으로 금강 유역에의 EFDC 적용성을 판단한 바 있지만, 수층(Layer)를 1개로 하여 2차원으로 해석한 한계가 있다. Seo(2012)는 금강 공주보가 설치되는 지점을 포함하는 상·하류 구간을 대상으로 EFDC 모형을 이용한 수치모의를 통하여 홍수기의 공주보 설치로 인한 치수안정성, 대상구간과 보 주변에서의 정밀 흐름 분석, 만곡부에서의 2차류 및 편수위 분석을 실시한 바 있다.

본 연구의 목적은 금강의 종류에 위치한 갑천과 미호천의 직접적 영향을 받는 대청댐과 세종보 구간에 대해 3차원 수리-수질 해석 모델인 EFDC를 구축하고 실측자료를 이용하여 모델을 보정한 후, 대청댐의 유량조절과 갑천 및 미호천의 오염부하량 삭감 시나리오에 따른 세종보 구간의 영양상태와 수질개선 효과를 평가하는데 있다.

II. 연구 방법 및 모형의 구성

1. 대상지역

연구 대상지역이 속해있는 금강유역(Fig. 1)은 동경 126°40'25" ~ 128°03'53", 북위 35°34'47" ~ 37°03'03" 사이인 한반도 중서부에 위치하고 있다. 충청남·북도의 약 절반과 전라북도의 1/4정도를 차지하고 있고, 경상 남·북도 일부와 경기도 일부를 포함하고 있는 우리나라 제 3의 유역으로서, 유역면적은 9,912.15 km²이고, 유로 연장은 392.79 km이다(DRCMA 2009). 금강 유역에 포함된 주요 지류하천은 미호천, 갑천, 논산천을 포함한 국가하천 11개소, 초강, 보청천, 유구천 등을 포함한 지방하천이 480개 소에 달하며 대상 모의 구간인 대청조정지대-세종보 구간으로 갑천과 미호천이 유입되고 있다. 갑천 유역에는 대천하수처리장(시설용량 900천m³/day), 미호천 유역에는 청주하수처리장(시설용량 280천m³/day)이 위치하고 있으며, 모델의 보정기간인 2012년 9월부터 2013년 4월까지 갑천(갑천 A)의 총인 평균농도는 0.14 mg/L, 미호천(미호천 C)의 총인 평균농도는 0.11 mg/L로 대청조정지대-세종보 구간의 수질오염총량관리를 위한 총인 목표수질인 0.018 mg/L보다 높은 수준을 나타냈다.

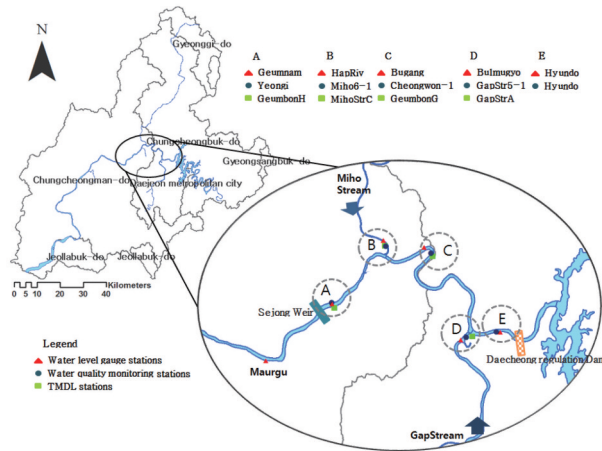


Figure 1. Locations of the study area

2. 모형 구성

1) 모형 개요

EFDC는 Virginia Institute of Marine Science의 Hamrick에 의해 개발되었으며, 미국 환경청(EPA)의 지원을 받아 Tetra Tech, Inc.에서 유지·관리되고 있는 3차원 범용 수리 모델이다. 또한 수질모델, 부유사 이동, 독성 물질 모델을 포함하고 있으며, 3차원 수리해석, 유사 수송 해석, 온·냉수 배출해석, TMDL수질 해석 등에 광범위하게 사용되고 있다. EFDC의 물리적 이론과 계산 기법은 Blumberg-Mellor 모형(Blumberg and Mellor 1987)과 미공병단의 Chesapeake Bay모형(Johnson et al, 1993)의 것과 같으며, 해수와 담수체계에 모두 적용 하도록 다양한 밀도장에서 3차원 정수압, 자유표면, 연직 평균 난류방정식의 해를 구하게 된다.

EFDC모델은 크게 Hydro버전과 Full버전으로 구분되는데, Hydro 버전은 Box형태의 수질 모형인 WASP의 수리모형으로 많이 활용되고, Full버전은 Hydrodynamics, Water Quality, Sediment transport, Toxic등의 모의가 가능하며 이 중 Sediment모의가 광범위하게 사용되고 있다(Hamrick 1992). 본 연구에서는 Dynamic Solution사의 Full 버전을 사용하여 수리-수질 연동해석을 수행하였다. 수질모의의 항

목은 조류(Algae), 탄소(Carbon), 인(Phosphorus), 질소(Nitrogen), 규소(Silica), 용존산소(Dissolved oxygen), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demend) 및 활성금속(Reactive Metal)등을 포함하여 총 22개의 수질상태 변수로 구성된다.

2) 입력자료구성

연구 대상 지역인 금강의 수치해석을 위한 격자는 2009년 국토교통부 대전지방국토관리청에서 금강 살리기 실시설계를 위해 측량한 평면도 및 횡단면도를 활용하여 격자를 구성하였으며, 하천 단면을 주하도와 홍수터로 구분하였다(Fig. 2). 수평방향으로는 직교곡선좌표계를 사용하였으며 총 활성화된 셀 개수는 2,096개이고 횡단방향 16개, 종단방향 416개이다. 횡단방향 격자 크기는 45.2 m ~ 140 m, 종단방향의 격자 크기는 14.3 m ~ 152.6 m로 구성하였다. 수직방향은 sigma 좌표계로 격자를 구성하였으며 수층을 각각 1개와 3개로 구분하여 결과를 비교하였다.

본 연구의 모의 기간은 2012년 9월부터 2013년 4월까지이며 수층의 초기조건은 초기 수위, 수온, 수질 농도 등으로 나누어진다. 초기 수위는 모의시작 시점에서 금강홍수통제소(<http://www.geumriver.go.kr/>) 자료를 참고하여 현도 24.15 m, 매포 20.29

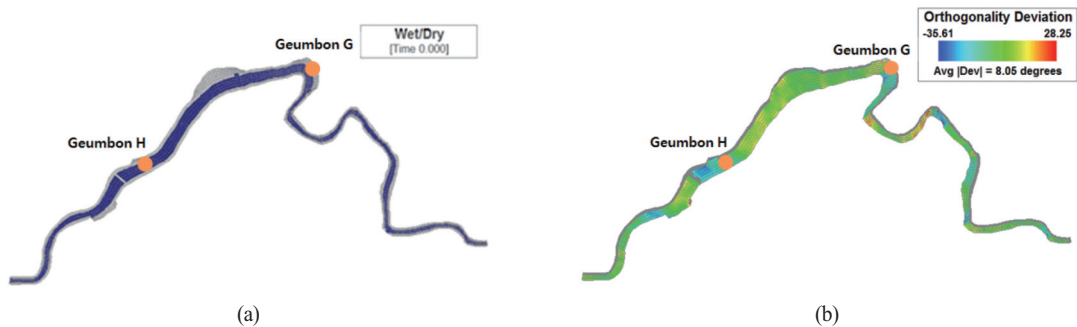


Figure 2. Numerical grid of (a) the main channel and the flood plain, (b) the orthogonality deviation

m, 부강 15.96 m, 금남 11.87 m, 마어구 10.15 m로 지정하였고, 초기 수온은 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)자료를 활용하여 모의시점에서 수질총량측정망 지점의 수온을 금본G 21.4℃, 금본H 23.3℃로 지정해주었다. 초기 수질 조건은 동일한 시기에 환경부-물환경정보시스템의 연기지점의 자료를 활용하여, DO 8.9 mg/L, TOC 3.5 mg/L, T-N 2.52 mg/L, NH₄⁺-N 0.091 mg/L, NO₃-N 1.942 mg/L, T-P 0.086mg/L, PO₄-P 0.076 mg/L, Chl-a 6.8 mg/m³로 설정하였다.

경계조건은 유량, 수온, 수질자료로 나누어지며 동일기간(2012년 9월-2013년 4월) 측정된 자료를 사용하였다. 유량자료는 일 주기 자료를 사용하였으며, 수온은 월 주기, 수질은 8일 주기 자료를 사용하였다. 모의 구간 내 유입 경계 조건은 대청 조정지댐, 갑천, 미호천을 지정해 주었으며, 금강홍수통제소 (<http://www.geumriver.go.kr/>)에서 제공하는 유량자료를 이용하였다. 모의 기간인 2012년 9월부터 2013년 4월까지의 대청조정지댐 방류량, 갑천 불무교 지점 유량, 미호천 합강 지점의 유량을 각각 입력하였다. 유출 경계 조건으로 지정된 세종보는 가동보 3기와 고정보로 구성되어 있으며 관리수위는 EL. 11.8m이다. 가동보 구간은 방류량을 입력하였으며, 고정보 구간은 보 관리수위 이상일 경우 흐름이 발생하는 것으로 입력하였다.

유입 수온은 환경부에서 측정한 금본G (2009년 01월~2013년 04월), 갑천A (2010년 05월~2013년 04월), 미호C (2009년 01월~2013년 04월) 지점

Table 1. The correlation equations between discharge and water temperature used for inflow water temperature estimation

Stations	Discharge-Temperature Equation
Geum River	$T_w = 7.655 + 0.184T_d + 0.477T_a - 0.0081Q$
Gap Stream	$T_w = 8.213 + 0.688T_d - 0.0049Q$
Miho Stream	$T_w = 4.933 + 0.805T_d - 0.0063Q$

T_w: 유입수 수온(℃), T_d: 이슬점 온도(℃), T_a: 대기 기온(℃), Q: 유입량m³/s

(Fig. 1)의 8일 간격 실측수온과 유량자료 그리고 대전기상대의 기온자료를 회귀 분석하여 산정하였다. 각 지점에서 실측수온과 기상 및 유량 자료를 이용하여 개발한 수온예측 회귀 방정식을 Table. 1에 나타내었다. 오차분석을 위해 AME(Absolute Mean Error), RMSE(Root Mean Squared Error) 값을 산정한 결과 금본G는 2.25℃, 2.74℃, 갑천A는 1.51℃, 1.95℃, 미호C는 1.70℃, 2.18℃이었다. 세 지점 모두 실측 수온을 적절히 반영하고 있는 것으로 판단되었고, 경계 자료로 이용하였다.

모델 경계조건의 수질 농도 자료는 환경부-물환경정보시스템에서 환경부 국가 수질측정망(현도, 갑천 5-1, 미호천6-1) 실측 월별 자료를 사용하였으며, 수질모델의 매개변수는 금강수계 수중생태계 수질모델 인자의 자료(National Institute of Environmental Research 2006)를 이용하여 구성하였다. 환경부 국가 수질측정망의 TOC, TN, TP 관측자료는 식물플랑크톤의 C, N, P도 포함되어 있다. 따라서 Chl-a와 식물플랑크톤 생체내의 C, N, P비를 사용하여 관측치를 보정하였다.

Table 2. Simulation scenarios of water quality control in the study site

	Scenario	Description
Load reduction from tributaries	Run1	20% reduction of pollutant load
	Run2	40% reduction of pollutant load
	Run3	60% reduction of pollutant load
Flow control from Daechong Dam and Sejong weir	Run4	10% increase of flow rate
	Run5	20% increase of flow rate
	Run6	40% increase of flow rate

3) 모의 시나리오 구성 및 모형 적용방법

갑천과 미호천 오염지류하천의 부하량이 금강 본류 수질에 미치는 영향과 각 하천의 부하량 삭감 및 상류 대청댐 방류량 조절을 통한 수질개선 효과를 평가하기 위한 시나리오를 Table. 2과 같이 구성하였다. 수질개선 대안 선정은 하천 수질 개선을 위해 일반적으로 시행되고 있는 정책인 오염부하량 삭감과 하천 유지유량 (또는 환경유량) 공급으로 설정하였다. Run1~Run3은 갑천과 미호천의 오염 부하량을 각각 20, 40, 60% 삭감하는 대안이며, Run4~Run6은 대청조정지댐과 세종보의 방류량을 각각 10, 20, 40% 증가시키는 유량조절 시나리오이다. 시나리오 모의기간은 모델의 보정기간인 2012년 9월-2013년 4월과 동일하며, 오염부하량의 삭감은 갑천과 미호천에서 금강본류로 유입하는 경계조건 농도를 각각 20, 40, 60% 저감하여 입력자료를 구성하였다.

4) 부영양화 판별 기준

하천의 영양 상태를 평가하기 위하여 TSI 부영양화지수를 이용하였다. Carlson(1977)은 투명도와 Chl-a농도와 관계, Chl-a농도와 TP의 관계로 부영양화지수(trophic state index)를 제시하였다. Aizaki et al.(1981)는 Carlson(1977)의 TSI지수를 수정한 수정 부영양화 지수(trophic state index modified)를 제안하였는데, 기존의 연구결과에서 평균 Chl-a농도의 최대치가 1,000 mg/m³을 넘는 경우가 없다고 판단하여 Chl-a농도가 1,000 mg/m³일 때 부영양화지수를 100으로, 0.1 mg/m³일 때 0으로 가정하였다. 본 연구에서는 Aizaki et al.(1981)의 TSI(trophic state index modified, 이하 TSI라

고 표기) 지수를 T-P(식1)와 Chl-a(식2)항목을 기준으로 검토하였다.

$$TSI_{TP} = 10 \times \left(2.46 + \frac{6.71 + 1.15 \times \ln(TP)}{\ln(2.5)} \right) \quad (1)$$

$$TSI_{chl-a} = 10 \times \left(2.46 + \frac{\ln(chl-a)}{\ln(2.5)} \right) \quad (1)$$

Aizaki et al.(1981)의 부영양화 지수의 크기에 따른 영양상태 판별 기준은 TSI ≤ 40 빈영양상태, 40 < TSI < 60 중영양상태, TSI ≥ 60 일 때 부영양상태로 판단한다(Kim et al, 2012).

5) 모형의 적합성 평가

본 연구에서는 수리·수질 모의결과의 적합성 평가를 위한 통계지표로 AME, RMSE, R² (Coefficient of Determination)를 사용하였다. AME는 절대 평균 오차로써 모의값과 실측값 편차의 절대값을 산술평균한 값으로 0에 가까울수록 모델 결과의 신뢰도가 높다고 판단된다. RMSE는 평균 오차로써 모의값과 실측값의 편차값을 제곱하여 산술 평균한 값의 제곱근으로 0에 가까울수록 신뢰도가 높다. R²는 실측값과 모의값의 상관관계를 나타낼 수 있는 자료로써 0과 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 모의값은 실측값과 높은 상관성을 가진다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형의 보정 및 검증

1) 지형자료

본 연구에서 구축된 지형자료에 대한 신뢰성을 확

Table 3. Error statistics in the simulations of water surface elevation for one-layered and three-layered EFDC models

Station	AME(m)		RMSE(m)		R ²	
	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3
Hyundo	0.066	0.053	0.076	0.093	0.987	0.982
Bugang	0.129	0.085	0.159	0.159	0.917	0.930
Geumnam	0.317	0.359	0.435	0.479	0.623	0.689

Table 4. Error statistics in the simulations of water temperature for one-layered and three-layered EFDC models

Station	AME(°C)		RMSE(°C)		R ²	
	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3
Geumbon-G	1.852	1.944	2.033	2.314	0.870	0.827
Geumbon-H	2.069	1.794	2.633	2.224	0.844	0.881

인하기 위하여 실측 자료에 결측과 오류가 많은 매포 수위표를 제외한 현도, 부강, 금남 수위표에서의 모의 수위와 실측 수위를 비교하였다. 또한 수층을 1개(Layer1), 3개(Layer3)로 나누어 모의한 결과를 비교함으로써 차이를 확인하였다(Fig. 3). 모의값과 실측값의 오차는 AME와 RMSE로 평가하였으며, 수층이 1개일 때 현도에서 각각 0.066 m, 0.076 m, 부강에서 0.085 m, 0.093 m, 금남에서 0.359 m, 0.479 m로 나타나 모델은 실측 수위를 잘 재현하였으며, 수층 개수에 따른 차이는 근소했다(Table. 3). 또한 R²값이 평균적으로 layer1일 때 0.842, layer3일 때 0.867로 나타나 하천의 수위 변동을 잘 모의하는 것으로 평가되었으며, 수층 개수에 따른 차이는 크지 않았다.

2) 수온

수온은 조류 성장과 밀접한 관련이 있으므로 수질 모델 구축을 위해서는 수온 보정이 먼저 적절히 이루어져야 한다. 수온 모의 결과의 적합성을 판단하기 위

하여 금본G, 금본H 지점의 월별 실측 수온과 모의 수온을 시계열로 비교하여 Figure. 3에 나타내었다. 각 지점에서 실측값과 모의값의 시계열 추세는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 실측값과 모의값의 오차 AME와 RMSE는 수층이 1개일 때, 금본G는 각각 1.852°C, 2.033°C, 금본H는 각각 2.069°C, 2.633°C로 나타났으며, 수층이 3개일 때 금본G는 각각 1.944°C, 2.314°C, 금본H는 각각 1.794°C, 2.224°C로 나타나 약간의 편차를 보였다(Table. 4).

3) 수질

수질보정은 DO, TOC, T-N, NH₄⁺-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, Chl-a 8개 항목에 대하여 실시하였다. 모형 내에 매개변수를 수정하여 모의값과 실측값의 차이를 최소화시키는 방법으로 보정을 수행하였고, AME, RMSE 분석을 통해 평가하였다(Table. 5).

모의 결과 청원-1지점에서 TP항목의 layer 개수별 AME, RMSE는 0.02 mg/L, 0.02 mg/L로 동일

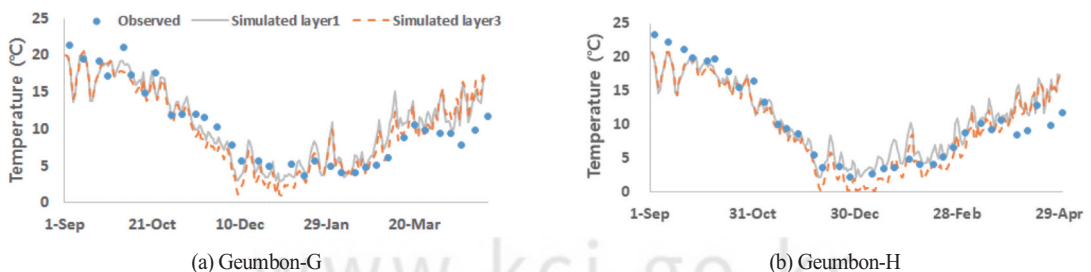


Figure 3. Comparison of observed and simulated water temperature at (a) Geumbon-G and (b) Geumbon-H

Table 5. Comparisons of errors in the water quality simulations between one-layered and three-layered EFDC models at Hyundo, Cheongwon-1, Yeongi

Item	Hyundo				Cheongwon-1				Yeongi			
	AME(m)		RMSE(m)		AME(m)		RMSE(m)		AME(m)		RMSE(m)	
	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3	Layer1	Layer3
DO (mg/L)	0.117	0.276	0.137	0.317	1.005	0.804	1.18	1.072	0.468	0.632	0.542	0.827
TOC (mg/L)	0.149	0.079	0.165	0.097	0.709	1.003	0.827	1.213	0.983	1.043	1.324	1.299
T-N (mg/L)	0.033	0.025	0.037	0.029	0.836	0.899	0.907	0.968	0.931	0.716	1.019	0.829
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.000	0.001	0.000	0.001	0.243	0.258	0.312	0.335	0.338	0.259	0.416	0.337
NO ₃ -N (mg/L)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.499	0.502	0.625	0.591	0.498	0.45	0.609	0.562
T-P (mg/L)	0.000	0.001	0.000	0.001	0.019	0.024	0.027	0.029	0.02	0.017	0.024	0.022
PO ₄ P (mg/L)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.019	0.017	0.01	0.008	0.013	0.011
Chl-a (mg/m ³)	0.054	0.134	0.069	0.166	2.832	2.289	3.755	3.192	4.099	5.114	5.157	7.171

한 수치를 보였다. 반면 Chl-a 항목은 AME 4.10, 5.11 mg/m³, RMSE 5.16, 7.17 mg/m³로 layer 개수에 따라 다소 큰 차이를 나타냈다. 모의 결과는 각 수질항목의 시계열 변동 추세를 적절히 재현하였으며, 공간적 변동 특성도 적절히 반영한 것으로 나타났다. 또한, 지류하천의 유입 후, 오염부하 농도와 체류시간의 증가로 조류의 농도가 증가하였고, 시계열의 변동 폭 또한 증가하였으며 모의결과는 이를 적절히 재현하였다.

모델의 오차 발생에는 경계조건과 매개변수의 불확실성 등 다양한 원인이 있을 수 있다. 특히 시·공간적으로 수질항목별 수질반응 상수가 상이 할 수 있으나 자료부족으로 EFDC 모형에서는 모의 구간 전체에 동일한 매개변수를 지정해주고 있다. 또한 모의되지 않은 수질항목별 농도를 실측값이 아닌 분율로 나누어진 값을 사용한 것도 원인이 되며, 한 달 간격의 경계 조건 수질 입력 자료를 사용하여 강우 등에 의한 유입 농도 변화를 적절히 구현하지 못한 점이 오차의 원인으로 작용하였을 것으로 판단된다. 모델의 보다 정교한 보정을 위해서는 집중적 수량, 수질 조사와 함께 매개변수에 대한 실험이 요구된다. 비록 다양한 요인으

로 인해 모델 보정에 오차가 포함되었지만, 본 연구에서는 오염부하량과 유량 변동 조건에 따른 적용 수체의 상대적인 수질농도 변화를 해석하는 것이 목적이므로 보정된 모형이 활용 가능한 것으로 판단하였다.

2. 시나리오 모의 결과

1) 부영양화 기작 분석

대청조정지댐-세종보 구간은 갑천과 미호천의 유입으로 횡방향의 수질변동성이 크게 나타난다. 따라서 3차원 모형인 EFDC 모의결과를 이용하여 수질의 횡방향 변동성을 확인해보았다. 모의 결과 본류로 갑천과 미호천이 유입된 후 영양염류 농도가 급증하였고, 영양염류의 공간적 분포에 따른 Chl-a의 공간적 분포가 횡방향으로 큰 변동성을 가짐을 확인할 수 있었다(Fig. 5). 특히, 미호천이 유입하면서 하천 우안을 따라 인과 질소농도가 상대적으로 매우 높게 나타났으며, Chl-a 농도와 조류(녹조류) 농도도 높은 값을 보였다.

조류의 성장에는 인, 질소 등의 영양염류 농도, 광량 및 수온 등이 영향을 미치며 이러한 항목을 성장 제한인자라고 한다. 제한 인자는 0과 1사이의 수치로

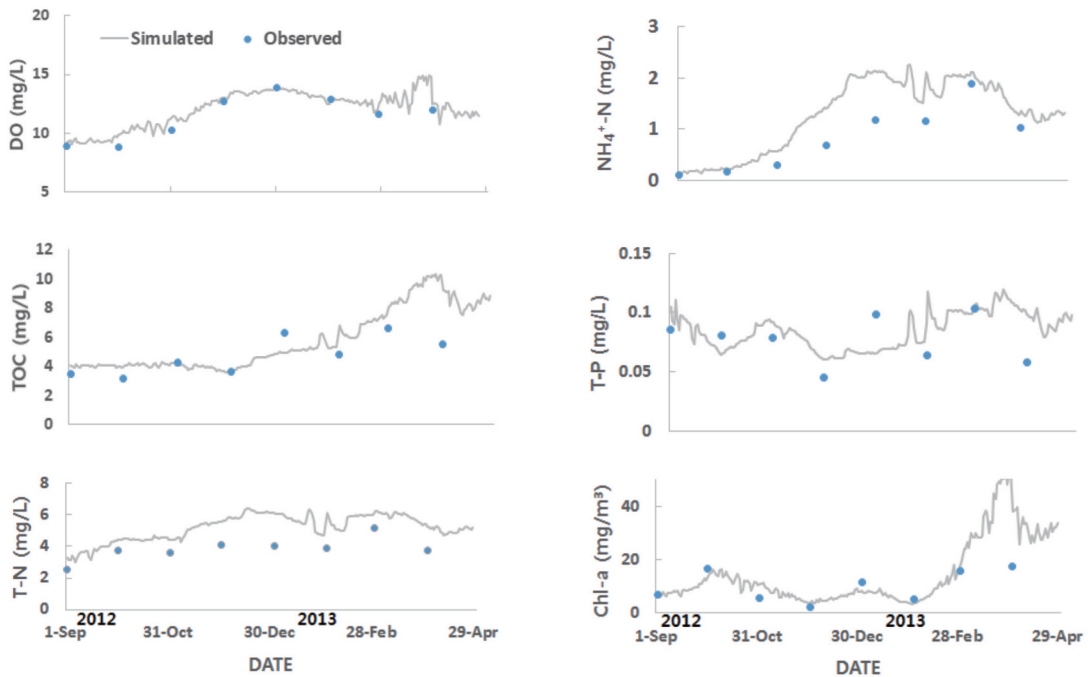


Figure 4. Comparisons of observed and simulated water quality variables at Yeongi

나타내며 0에 가까울수록 조류의 성장은 크게 제한 받게 된다. 모의 결과에서 갑천이 유입되기 이전 구역에서는 인의 limiting factor가 0에 가까워 제한인자로 크게 작용하지만, 갑천 이후 구간에서 인의 limiting factor는 1에 가까운 값을 가지며, 인의 농도가 높아 조류가 더 많이 성장하였다. 반면 질소는 모의 구간 전체에서 농도가 높아 조류성장의 제한인자로 작용하지 않았다. 따라서, 인의 농도가 높은 오염된 지류하천인 갑천과 미호천의 유입이 세종보 구역의 부영양화 및 녹조 발생에 영향을 미치는 요인 중 하나일 것이라고 판단된다.

2) 부영양화 대책 시나리오 평가

① 갑천·미호천 부하량 조절에 따른 수질 영향

모형 구축 과정에서 Layer1과 Layer3의 지형, 수온, 수질 항목의 모의 결과를 비교해본 결과에서 보는 것(Table. 3~5, Fig. 3~4)과 같이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 모의 구간의 평균수심이 현도 0.80 m, 부강 0.73 m, 금남 2.29 m, 세종보 상류 3.93 m로 깊지 않기 때문으로 판단된다. 따라서 시나리오 모의

결과는 수층을 하나로만 나누어 비교하였다.

금강의 수질개선을 위한 갑천과 미호천 부하량 삭감 시나리오(RUN1-RUN3)의 수질 모의 결과, 현도 지점은 갑천의 부하량 변화에 따른 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 하지만 하류지점의 수질은 무대책(RUN0) 대비 시나리오별(RUN1-RUN3)로 청원-1 지점에서 T-P 0.006, 0.012, 0.019 mg/L, Chl-a 0.566, 1.133, 1.712 mg/m³ 저감하였고, 연기 지점에서 T-P 0.015, 0.031, 0.046 mg/L, Chl-a 2.113, 4.225, 6.330 mg/m³ 저감 하는 것으로 나타났다(Table. 6, Fig. 6). 모의 구간 내에서 수질오염총량 관리를 위한 총인(T-P)의 목표수질은 0.018 mg/L이며, 이러한 목표수질을 만족하는 일수는 청원-1 지점에서 RUN1 6일, RUN2는 33일, RUN3은 48일로 부하량이 감소될수록 수질개선 효과가 크게 나타났다. 부영양화의 개선 정도를 비교하기 위해 TSI를 산정한 일단위 결과를 월평균으로 Fig. 7에 나타내었다. 각 시나리오별(RUN1-RUN3) TSI는 청원-1 지점의 경우 T-P 평균 5.4%, 12.2%, 21.9%, Chl-a 평균 4.7%, 10.1%, 18.2%, 연기지점의 경우 T-P

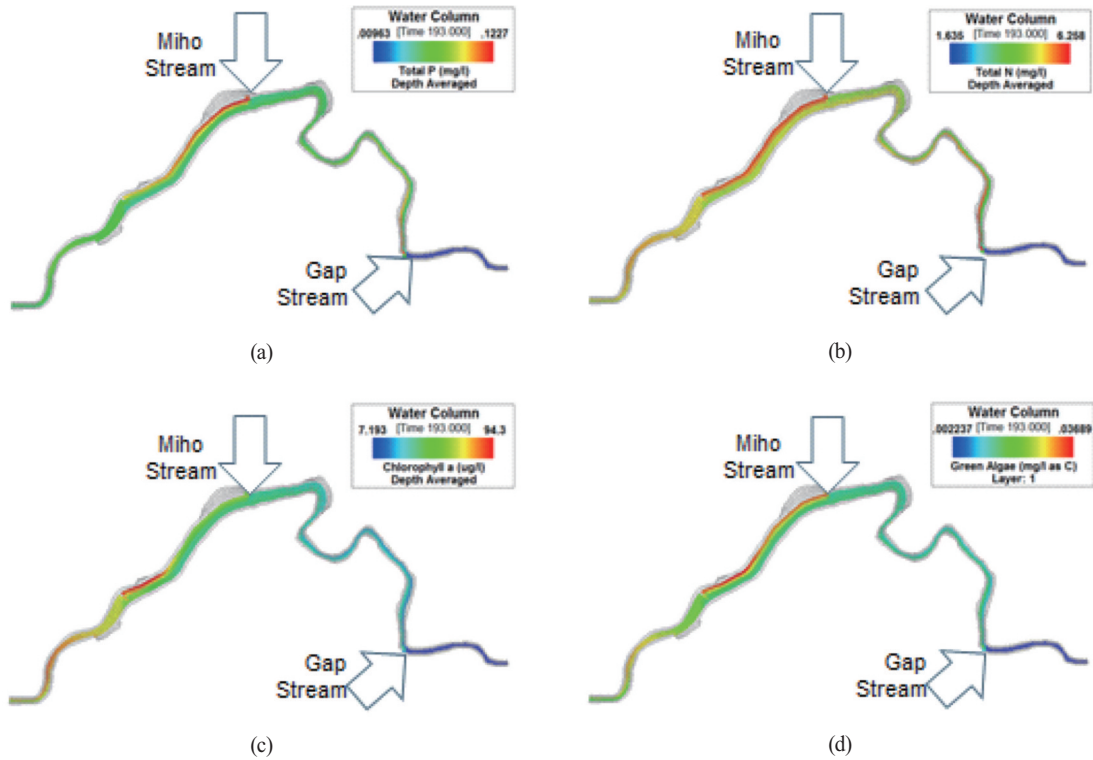


Figure 5. The spatial distribution of (a) Total P, (b) Total N, (c) Chlorophyll a, (d) Algae

Table 6. Reduced average water quality concentration compared to RUN0 for each scenario at Cheongwon-1 and Yeongi sites. unit: mg/L

Site	Item	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6
Cheongwon-1	DO	0.001	0.001	0.002	0.000	-0.001	-0.002
	TOC	0.375	0.747	1.117	0.073	0.137	0.242
	T-P	0.006	0.012	0.019	0.002	0.003	0.005
	Chl-a(mg/m ³)	0.566	1.133	1.712	0.192	0.358	0.622
Yeongi	DO	0.049	0.098	0.148	0.030	0.047	0.095
	TOC	0.962	1.924	2.888	0.074	0.140	0.271
	T-P	0.015	0.031	0.046	0.0915	0.0892	0.085
	Chl-a(mg/m ³)	2.113	4.225	6.330	0.002	0.003	0.006

평균 4.7%, 10.9%, 19.4%, Chl-a 평균 4.2%, 9.6%, 17.3% 저감되어 부하량 삭감에 따라 TSI가 개선되는 것으로 나타났다. 하지만 부영양화 정도가 개선되었음에도, 연기지점에서는 목표수질인 0.018 mg/L를 만족하지 못했다.

② 체류시간 조절에 따른 수질 영향

수질 개선 방안을 제시하기 위한 두 번째 시나리오로 대청조정지댐 방류 유량 조절에 따른 하류 수질의

민감도를 비교해보았다. RUN0은 대청조정지댐과 세종보의 방류량을 조절하지 않았을 때의 결과이고, RUN4, 5, 6은 각각 방류량을 10%, 20%, 40% 증가시켰을 때의 결과이다. 각각의 시나리오별 평균 체류시간은 Table. 7과 같으며, 방류량 증가에 따라서 체류시간이 감소한다.

시나리오 모의 결과 뚜렷한 수질 개선 효과는 나타나지 않았다. 또한 각 시나리오별(RUN4-RUN6)

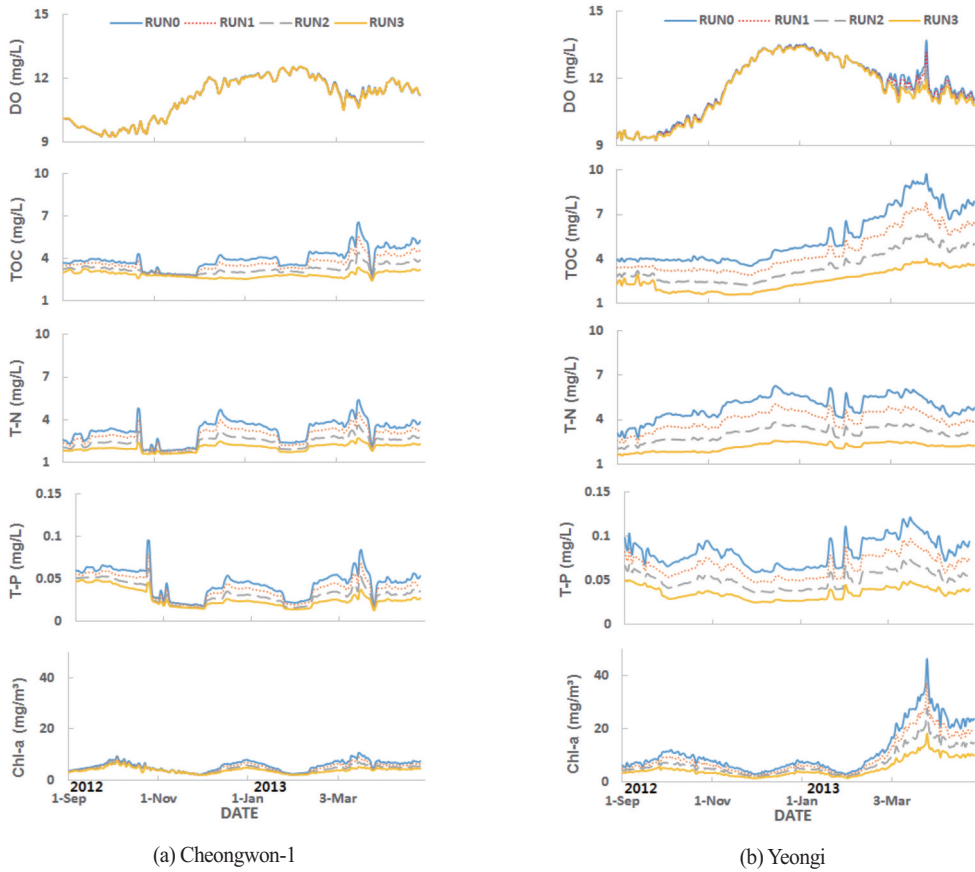


Figure 6. Simulated water quality variations with the scenarios for pollutant load control from Gap Stream and Miho Stream

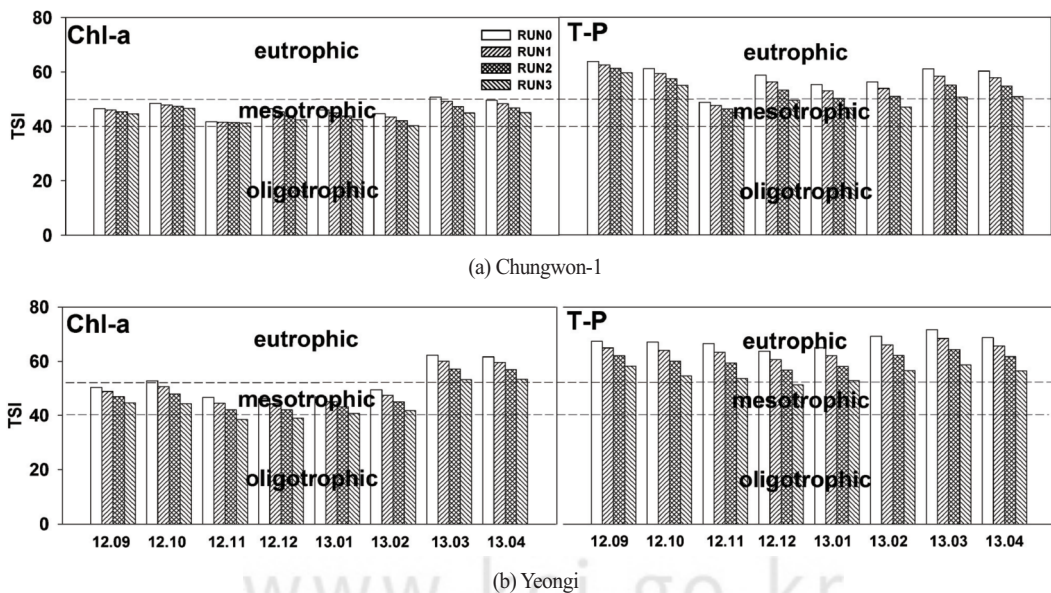


Figure 7. Comparisons of Carlson TSI for the pollutant load control scenarios at Cheongwon-1(a), Yeongi(b)

Table 7. Comparisons of water residence time for the different flow control scenarios unit: day

Site	RUN0	RUN4	RUN5	RUN6
Hyundo	0.107	0.102	0.097	0.090
Bugang	0.458	0.443	0.429	0.405
Geumnam	0.680	0.667	0.658	0.636

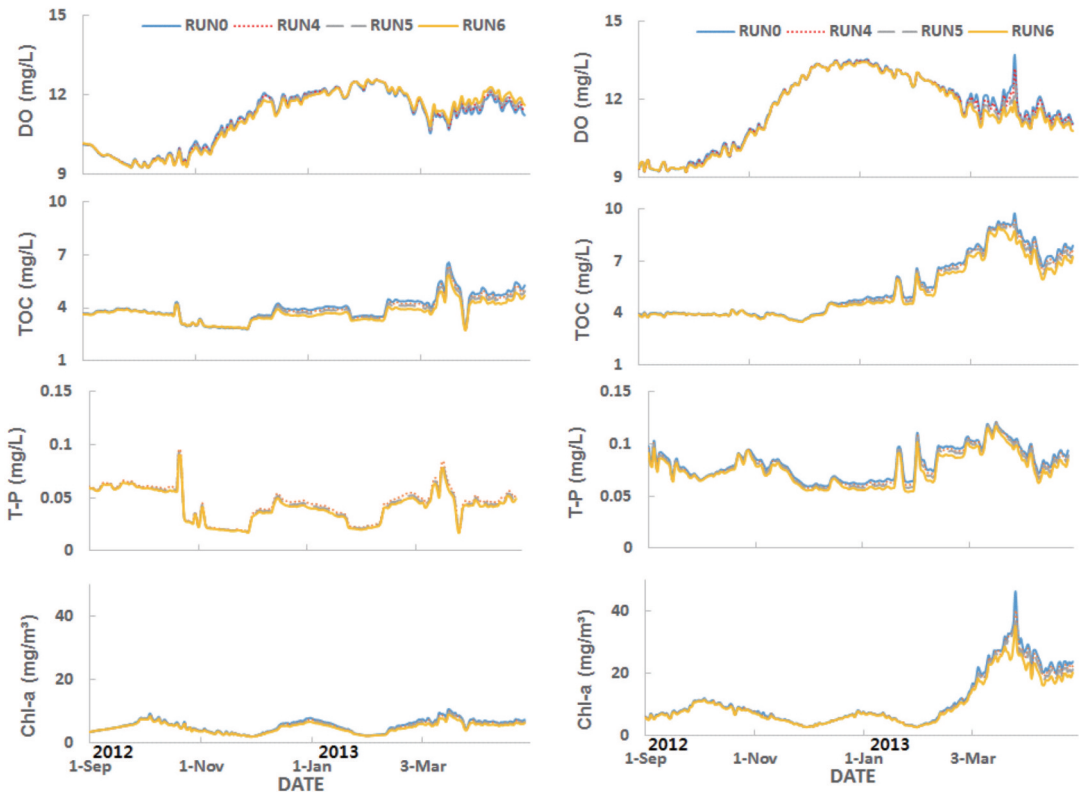
TSI는 청원-1지점의 경우 Chl-a 평균 1.5 ~ 2.4% T-P 평균 2.5 ~ 3.8%, 연기지점의 경우 Chl-a 평균 1.2 ~ 2.1%, T-P 평균 0.9 ~ 1.5% 저감되어 큰 변화가 없음을 확인 할 수 있었다(Fig. 9).

IV. 결론

본 연구에서는 4대강 사업으로 하천환경이 변화된 금강 대청조정지댐-세종보 구간을 대상으로 하천의 수리·수질 현상을 분석할 수 있는 3차원 모델인

EFDC를 구축하고, 오염지류하천이 본류 수질에 미치는 영향과 부하량·방류량 조절을 통한 수질 개선효과를 평가하였다. 또한 EFDC모형을 통해 모의된 수리, 수질 결과값을 실측값과 비교함으로써 모델의 신뢰도를 판단하였다. 본 논문을 통해 도출된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수질 모의결과, 갑천과 미호천 유입 이후 수질의 횡방향 변동성이 크게 나타났으며, 영양염류와 Chl-a의 공간적 분포가 큰 상관성을 보였다. 특히,



(a) Cheongwon-1

(b) Yeongi

Figure 8. Comparisons of the water quality variations under the scenarios of flow control from Daecheong Regulating Dam and Sejong Weir

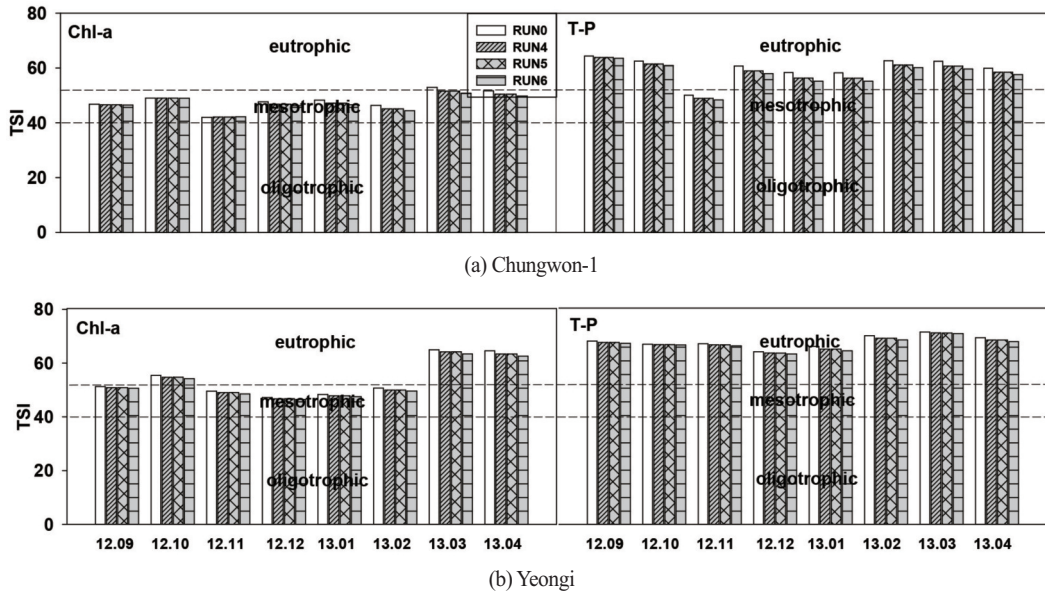


Figure 9. Comparisons of Carlson TSI for the flow control scenarios at Cheongwon-1(a), Yeongi(b)

미호천 유입 후 금강 본류 우안을 따라 인과 질소농도가 상대적으로 매우 높게 나타났으며, Chl-a 농도와 조류(녹조류)도 높은 농도를 보였다.

2) 갑천·미호천의 오염 부하량 조절에 따른 수질개선 효과를 비교하기 위하여 부하량을 각각 20, 40, 60% 삭감한 결과, 지류하천 유입 이전인 현도지점은 수질농도의 변화가 거의 없었으나, 갑천 유입 이후 지점인 청원-1은 수질오염총량관리를 위한 총인의 목표수질 0.018 mg/L를 만족하는 일수가 부하량 감소에 따라 RUN1일 때 6일, RUN2 33일, RUN3 48일 증가하였다. 미호천 유입 이후 지점인 연기는 총인 목표수질을 만족하지 못했다. 그러나 각 시나리오별(RUN1-RUN3) TSI는 청원-1지점의 경우 Chl-a 평균 4.7, 10.1, 18.2%, T-P 평균 5.4, 12.2, 21.9%, 연기 지점의 경우 Chl-a 평균 4.2, 9.6, 17.3%, T-P 평균 4.7, 10.9, 19.4% 저감되어 부하량 삭감에 따른 부영양화 지표가 개선되었다.

3) 유량 조절에 따른 수질개선효과를 확인하기 위하여 대청조정지댐과 세종보의 방류량을 각각 10%, 20%, 40% 증가시켜 모의한 결과, 방류량을 증가시킬수록 체류시간은 각각 현도 0.107day에서 0.102day, 0.097day, 0.090day로, 부강 0.458day에서

0.443day, 0.429day, 0.405day로, 금남 0.689day에서 0.667day, 0.658day, 0.636day로 감소하였으나, 수질 농도와 부영양화 정도의 개선은 미미하였다.

연구결과를 종합하면, 세종보 구역의 수질은 금강으로 유입되는 갑천과 미호천 수질에 의해 크게 영향을 받으며, 모의 구간의 목표수질을 만족하기 위해서는 갑천과 미호천의 수질 기준이 더욱 강화되어야 한다. 또한 대청조정지댐과 세종보의 방류량 조절에 따른 수질개선 효과는 크지 않았고, 댐과 보의 방류량 조절은 수질 악화 시 일시적 플리싱 방류를 통한 세척효과를 유도하는 것이 바람직해 보인다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

- Aizaki M, Otsuki A, Fukushima T, Hosomi M, Muraoka K. 1981. Application of modified carlson's trophic state index to japanese

- lake and its relationships to other parameters related to trophic state. Research Report from the National Institute for Environmental Studies. 23:13-31.
- Blumberg A. and Mellor G. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-dimensional coastal ocean models. American Geophysical Union. 1-16.
- Carlson R. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 2: 361-369.
- Chung SW. 2004. Application of an unsteady river water quality model for the analysis of reservoir flushing effect on downstream water quality. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* 37(10): 857-868. [Korean Literature]
- Committee of Research and Evaluation for 4-Rivers Project. 2014. The report of evaluation for the 4-river project. 36-82. [Korean Literature]
- DaeJong Regional Construction and Management Administration(DRCMA). 2009. Geum-River basin river basics plan [Korean Literature]
- Hamrick J. 1992. A three dimensional environmental fluid dynamics computer code; Theoretical and computational aspects. Special Report. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, V A
- Han JH, Jeong NJ, Cho YD. 2013. Analysis on the effects of water quality improvement by basin management. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*. 2992-2995. [Korean Literature]
- Johnson, Kim B, Heath R, Hsieh B, Butler H. 1993. Validation of Three-Dimensional Hydrodynamic Model of Chesapeake Bay. *Journal of Hydrologic Engineering*. 119: 2-20
- Jung YR, Oh DG, Chung SW. 2008. Comparison with koriv1 and ce-qual-w2 model for the simulation of water quality on downstream geum river. *Journal of Korea Water Resources Association*. 453-454. [Korean Literature]
- Kim CS. 2013. An Evaluation on the sustainability of the 4 major rivers restoration project. *The Korean Journal of Local Government Studies*, 17(1): 319-342. [Korean Literature]
- Kim DW, Chung EG, Kim KH. 2012a. Application of hydrodynamic and water quality model EFDC in geum river(2000~). 782-783. [Korean Literature]
- Kim ES, Sim KB, Yang SY, Yoon JH, Ka BS, Son IO, Choi HI. 2012b. Seasonal water quality analysis in daecheong lake by eutrophication assessment methods. *Journal of Korean Society on Water Environmant*, 34(4): 882-889 [Korean Literature]
- Ministry of Land Transport and Maritime Affairs(MLTMA). 2009. Master plan for 4-river revival. 6-12. [Korean Literature]
- Seo SH. 2012. Analysis of hydraulic characteristics on geum river using 3 dimensional numerical model -focused on the gongju weir-. Kongju National University. [Korean Literature]
- Song YJ. 2013. Effect of pollutant loads from a new industrial complex on the water quality of gumsang stream and geum river. Chungbuk national university. [Korean Literature]
- Yin Z, 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]