

Original Article

영산강 하류의 단기 수질변화에 대한 연구

김중우¹ · 조영길^{2,†}

¹목포대학교 해양자원학과 대학원생

²목포대학교 해양자원학과 교수

A Study on the Short-term Water Quality Change in the Lower Yeongsan River

Jongwoo Kim¹ and Yeonggil Cho^{2,†}

¹Graduate Student, Department of Marine Resources, Mokpo National University, Jeonnam 58554, Korea

²Professor, Department of Marine Resources, Mokpo National University, Jeonnam 58554, Korea

요 약

영산강 죽산보에서 영산호에 이르는 하류의 수질을 파악하기 위하여 한 해 동안 총질소(TN), 총인(TP), 용존산소(DO), 클로로필-a (Chl-a), 총유기탄소(TOC) 등 5개 항목에 대해서 3차원 수치모의 프로그램 EFDC를 이용해 수질의 변화를 모의하였다. 모의결과는 NSE (nash-sutcliffe efficiency coefficient), RMSE (root mean square error), MAE (mean absolute error) 및 상관계수를 구하여 재현성, 방향성 및 예측의 정확도를 평가하였다. 모의된 수질항목의 예측치는 현장의 관측치에 대해 TN 10.7%, TP 11.9%, TOC 12.2%, Chl-a 9.3%, DO 4.8% 편차로 전반적으로 양호한 수준의 예측을 보였다. 모의항목의 농도는 Chl-a가 연중 72.0%(σ_x/\bar{x})로 가장 변화가 컸고, TP 37.9%, TN 30.4%, TOC 20.6% 순으로 변동하였다. TN은 춘계에 가장 농도가 높았으며 TOC, TP, Chl-a는 각각 하계, 추계, 동계에 가장 높아지는 인과관계가 추정되었다. 강수에 의한 수질의 변화는 풍수기에 TP, TOC 농도가 높게 유지된 반면 갈수기에는 TN, Chl-a의 농도가 높게 유지되어 수질항목에 따라 강수의 영향이 달리 반영되었다.

Abstract – In order to predict the water quality in the lower Yeongsan river, the water quality changes were simulated for total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), dissolved oxygen (DO), chlorophyll-a (Chl-a) and total organic carbon (TOC) using the environmental fluid dynamics code 3D numerical program. The reliability of the simulation is verified with statistical metrics NSE (nash-sutcliffe efficiency coefficient), RMSE (root mean square error), MAE (mean absolute error), and correlation coefficients that can estimate the proficiency and accuracy of the prediction. The verification results show a good level within the effective range of statistical indicators. The simulated water quality was generally good, with an average deviation of 10.7% in TN, 11.9% in TP, 12.2% in TOC, 9.3% in Chl-a, and 4.8% in DO for observations. The variation in concentration during the period was relatively large, with the variation of the year being Chl-a 72.0%, TP 37.9%, TN 30.4% and TOC 20.6%. Sequential changes of TOC, TP, and Chl-a concentration increase linked from summer to fall and to winter were recognized. Considering the effects of precipitation, the water quality of the rainy season was confirmed by TP and TOC, and the water quality of the dry season was likely to be affected by TN and Chl-a.

Keywords: TN(총질소), TP(총인), DO(용존산소), Chl-a(클로로필-a), TOC(총유기탄소), 3D numerical program(3차원 수치모의 프로그램), Water quality(수질), Yeongsan river(영산강)

1. 서 론

하천 연장 2,253 km의 영산강은 광주천, 황룡강, 지석천, 고막원천, 함평천 등의 주요 지류를 통해 5,912 km²를 배수하는 호남의

대표적 하천으로 수로, 정화, 완충과 같은 자연적 기능과 함께 친수는 물론 관개, 생활, 산업 등 각종 용수를 제공하는 이수에 이르기까지 지방하천의 다양한 기능을 유지해 왔다. 그러나 1970년대 이후 산업화 과정에 편승한 1981년 영산강 하구연 건설, 치수기능에 치우친 2012년 승촌보 및 죽산보 건설에 따라 회복하기 힘든 하

[†]Corresponding author: ygcho@mokpo.ac.kr

천기능의 불균형이 초래되었다. 깊어진 수심과 흐름의 정체로 폭기가 사라지고 체류시간이 증가하면서 하천환경은 호수화 경향으로 변화였고, 그로인한 유기물 증가와 수질의 부영양화 및 녹조발생으로 하천의 수질은 악순환을 반복하고 있다(Shin *et al.*[2015]; Cho and Cho[2017]; Park *et al.*[2017a]; Park *et al.*[2017b]).

하천의 수질관리가 주요 쟁점으로 부상한 현실에 환경부는 수질 악화를 예측하고 대응책을 모색하기 위한 예방차원에서 수질예보를 시행하기에 이르렀고, 2012년부터 4대강 70개 측정소의 수질측정 자료에 기초한 예측시스템이 가동되고 있다. 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>[2017])의 영산강 수질예측 정보는 10개 수질측정망 자료로부터 EFDC (environmental fluid dynamic code)에 기반한 EFDC-NIER (National Institute of Environmental Research) 수질 모델에 의해 구현되어 수질악화에 대응하는 예방적 수질관리에 활용되고 있다(NIER[2014];[2017]). EFDC-NIER 모델은 하상에 설치된 인공구조물의 영향을 모의할 수 있는 모듈을 탑재해 부수적 모의기능을 향상시킨 것으로 Shin *et al.*[2017]은 영산강의 승촌보 및 죽산보에서 3개 수질인자(Chl-a, TN, TP)에 대해 EFDC-NIER 수질모델을 적용한 바 있다.

영산강 수계는 상류의 승촌보로부터 하류 죽산보에 이르기까지 정체와 유하를 반복하므로 인공 수리구조물이 수질에 미치는 영향을 모의할 경우 수역의 세분화가 중요하다. 주요 보 지점에서 수질예보를 구현한 Shin *et al.*[2017]의 연구는 그러한 측면에서 의미하며, 특히 그들의 연구에서 Chl-a의 다소 낮은 예측 정확도는 수역에 따른 모의조건을 최적화함으로써 불확실성을 줄이는 접근이 필요하다는 사실을 뒷받침한다. 죽산보에서 하구언에 이르는 수역은 상류 일부를 제외하면 영산강에서 가장 진화된 호수화 환경이다. 주요 보 지점과 달리 영산호 수역에서 하천의 수질이 어떤 방향으로 변해 가는지 파악되고, 아울러 직접측정을 통한 모의결과의 검증 및 평가가 이루어져 모델예측의 신뢰도가 제시된다면 환경부 하천수질 예측시스템과 함께 영산호의 보다 실제적 수질관리 대안이 마련될 수 있을 것이다. 따라서 본 연구는 죽산보 하류의 호수화된 수역에서 2017년 한 해 동안 현장자료를 확보함과 동시에 해당 시기 수질자료에 의한 EFDC 수질모의를 병행하여 각 수질인자에 의한 수질변화를 두 자료와 비교, 평가하였으며, 이에 따른 단기간의 수질변화 양상을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

3차원 수치모델 EFDC는 90년대 초 VIMS (Virginia Institute of Marine Science)에서 개발된 이래 하천, 호수 및 연안환경의 수리, 수질 연구에 폭 넓게 사용되고 있으며(Wool *et al.*[2003]; Seo *et al.*[2009]; Wu and Xu[2011]; Yin and Seo[2013]; Na *et al.*[2014]), 특히 프로그램의 수질모들은 22개 수질인자의 동력학적 반응을 모의할 수 있다(Tetra Tech Inc.[2007]). 본 연구에서는 EFDC 수질모들을 구동하여 2017년 한 해 동안 total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), dissolved oxygen (DO), chlorophyll-a (Chl-a), total organic

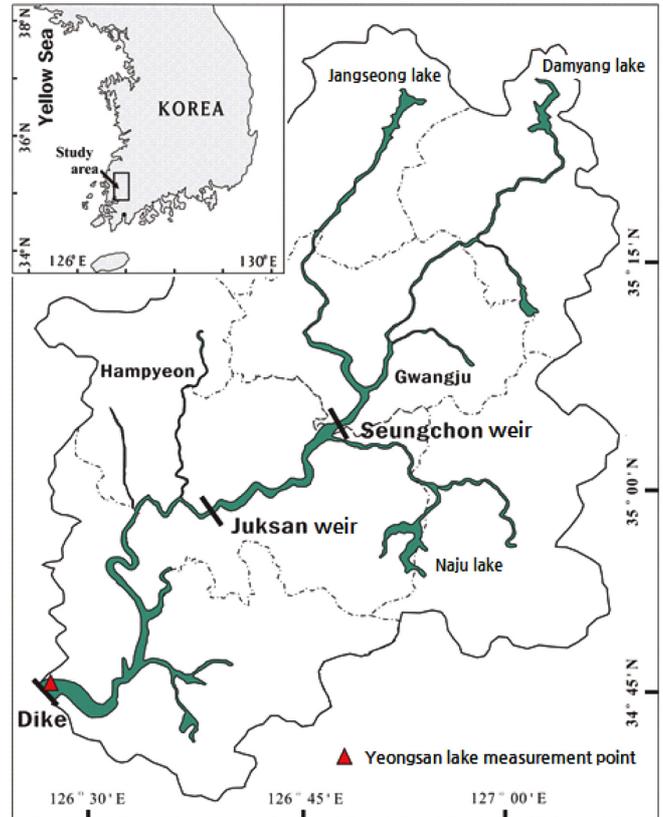


Fig. 1. Map showing the study area and water quality monitoring sites.

carbon (TOC) 등 5개 수질인자에 대한 수질모의를 시행하였으며, 아울러 모의결과의 정확도를 파악하기 위해 같은 기간 매일 영산호에서 YSI-556 수질측정기를 이용한 현장측정과 함께 시료채취 및 분석을 병행하였다. 모의 수질인자의 실험실 분석은 각 항목별로 필요한 조치를 추가한 후 해양환경공정시험기준을 따랐다.

수질모의 지역은 죽산보에서 영산호 하구언에 이르는 약 50 km 구간으로 영산강 수계에서 흐름의 정체가 가장 큰 수역이다(Fig. 1). 모델링을 위한 연구수역의 격자망 구성은 형태 및 부피가 최대한 원형에 가깝게 설계되도록 국립환경과학원 영산강부도를 참고하여 3차원 모의격자 구성프로그램인 Grid Generator를 이용하였다. 격자의 크기는 모델의 안정성을 위해 면적의 균일성과 직교성이 유지되도록 임계각을 설정하여 조정하였으며, 이로써 x 방향 16.5~570 m, y 방향 50.5~126 m 범위의 총 1,600개 격자가 생성되었다. 바닥의 고도는 0 ~ -20.7 m(평균 -6.4 m)로 기준면 보다 높은 고도는 모두 수면고도(0 m)로 정하였다(Fig. 2).

모델의 경계조건은 기상 및 유출입에 대한 인자를 검토하여 설정하였다(Table 1). 기상조건은 광주기상관측소(<http://www.kma.go.kr/aboutkma/intro/gwangju>[2017])의 기온, 풍향, 풍속, 습도, 기압, 운량, 강수, 일조량 등 시간별 관측자료를 이용하였다. 유입조건은 물환경정보시스템의 죽산보 수질인자(DO, TN, TP, TOC, Chl-a) 및 수온 자료를 활용하였고, 상부 및 하부 경계의 유출입 유량정보는 영산강유역환경청(<http://www.me.go.kr/yysg>[2017]) 자료를 사용하



Fig. 2. Physical domain grid of study area.

었다. 단, 지류의 경계조건은 격자망 내 주목할 만한 지류의 영향이 없기 때문에 고려하지 않았다.

Table 1. Input boundary condition of model

Total number of horizontal grids : 1600
Minimum grid size : $\Delta x=16.50$ m, $\Delta y=50.50$ m
Maximum grid size : $\Delta x=570.00$ m, $\Delta y=126.00$ m
Time step : 1 sec
Number of Water quality state variable : 5 (DO, TN, TP, Chl-a, TOC)
Weather input conditions ; 7 [TDRY($^{\circ}$ C), WIDD, WINDS(m/s), RELH(%), PATM(hPa), Cloud, Rain(mm), SOLSWR(MJ/m 2)]
TDRY, dry-bulb temperature; WIDD, wind direction; WINDS, wind speed; RELH, relative humidity; PATM, atmospheric pressure; SOLSWR, solar short wave radiation

3. 결과 및 고찰

3.1 EFDC 모델의 보정 및 검증

수치모델은 자연현상을 수학적으로 해석하는 과정에서 모의오차를 포함하기 때문에 모형의 보정이 필요하다. 여기서 보정은 모의 결과에 영향을 미치는 여러 매개변수들을 조절함으로써 모의치의 오차를 최소화시키는 방향으로 진행하였으며, 지역 하천의 물리, 화학, 생물학적 특성을 감안하여 보정에 사용된 주요 매개변수 범위를 Table 2에 나타내었다.

수치모의 보정결과는 모형의 일반성을 확보하는 차원에서 예측의 숙련도 즉, 예측력을 나타내는 NSE (nash-sutcliffe efficiency coefficient), 모의값과 관측값의 차이를 알려주는 척도로 평균제곱근오차 RMSE (root mean square error), 모의값과 관측값의 평균오차로서 예측의

Table 2. EFDC calibration parameters and calibrated values in this study

Parameter	Unit	Signification	Value
PM _c	day ⁻¹	Maximum growth rate for cyanobacteria	0.5~2.5
PM _d	day ⁻¹	Maximum growth rate for diatoms	0.5~2.5
PM _g	day ⁻¹	Maximum growth rate for green algae	0.5~2.5
KHN _x	mg/L	Nitrogen half saturation for algae	0.03
KHP _x	mg/L	Phosphorus half saturation for algae	0.01
CChl _x	mgC/ μ gChl-a	Carbon to chlorophyll ratio for algae	0.06~0.08
CI _a , CI _b , CI _c	-	Weighting factor for solar radiation at 0, -1 and 2 day	0.7, 0.2, 0.4
TM upp _c	$^{\circ}$ C	Upper optimal temp. for cyanobacteria growth	28
TM low _c	$^{\circ}$ C	Lower optimal temp. for cyanobacteria growth	25
TM upp _d	$^{\circ}$ C	Upper optimal temp. for diatom growth	10
TM low _d	$^{\circ}$ C	Lower optimal temp. for diatom growth	5
TM upp _g	$^{\circ}$ C	Upper optimal temp. for green algae growth	25
TM low _g	$^{\circ}$ C	Lower optimal temp. for green algae growth	20
CP _{pm1}	gC/gP	Constant for algae phosphate to carbon ratio	50
CP _{pm2}	gC/gP	Constant for algae phosphate to carbon ratio	50
CP _{pm3}	mg/L	Constant for algae phosphate to carbon ratio	50
ANC _x	gN/gC	Nitrogen to carbon ratio for algae	0.16
BMR _c	day ⁻¹	Basal metabolism rate for cyanobacteria	0.04
BMR _d	day ⁻¹	Basal metabolism rate for diatom	0.01
BMR _g	day ⁻¹	Basal metabolism rate for green algae	0.01
PRR _c	day ⁻¹	Predation rate on cyanobacteria	0.02
PRR _d	day ⁻¹	Predation rate on diatom	0.01
PRR _g	day ⁻¹	Predation rate on green algae	0.02

정확도를 나타내는 평균절대오차 MAE (mean absolute error), 그리고 모의값과 관측값의 상관계수(r)와 같은 통계지표로 검증하였다. 각 지표의 계산식은 다음과 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}$$

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

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

식에서 P_i 및 O_i 는 모의값과 관측값, O_m 은 관측평균, $Cov(X, Y)$ 는 공분산, σ_X 및 σ_Y 는 X, Y 의 표준편차를 나타낸다. 따라서, 계산된 NSE는 관측값 변동폭에 대한 모의값의 평균오차로 1에 접근할수록 예측의 숙련도가 높고, RMSE 및 MAE는 0에 가까워질수록 모의결과의 신뢰도가 높은 통계학적 함의를 갖는다.

3.2 모의수질의 결과 및 평가

수치모의 결과의 신뢰성을 판단하기 위해 수온을 포함한 수질모의 항목의 통계지표를 Table 3에 제시하였다. 특히 수온은 수생태 및 수질에 영향을 미치는 가장 중요한 매개변수로 수질인자의 상징적 요소이며, 따라서 먼저 수온의 모의 예측치를 검토함으로써 5개 수질항목(DO, TN, TP, TOC, Chl-a) 수치모의에 대한 객관적 신뢰도를 추정할 수 있다. 통계지표 NSE에 근거한 수온의 모의 예측력은 $NSE=0.99$ 로 1에 근접하는 매우 일관성 있는 결과를 나타냈다. 예측의 정확도 또한 $MAE=0.81$ 로 평균오차 7.2%에 준하는 양호한 수준에서 유사한 패턴을 재현하였다. 관측수온에 대한 모의수온의 상관계수도 $r=0.99$ 로 매우 양호하였으며, 두 값 사이에서 연중 비슷한 월 단위 변화를 나타냈다(Fig. 3).

수질항목 DO, TN, TP, TOC, Chl-a의 예측결과 또한 각 통계지표의 유효범위 내에서 양호한 수준에 도달하였다(Table 3). 항목별 NSE 지표는 TOC를 제외한 모든 항목에서 0.83~0.97 범위로 뛰어난 예측력을 보였다. $NSE=0.61$ 인 TOC의 예측력은 풍수기에 접어들면서 예측의 편차가 20% 내외로 커지는 결과에 의한 것

로 타 항목과 비교된다(Fig. 3). 주로 농경지를 배수하는 영산강은 하천의 유기물 농도가 강수량과 함께 증가하는 동조화 현상을 나타낸다(Cho and Cho[2017]). 따라서 상대적으로 예측의 숙련도가 낮은 TOC는 강수가 집중되는 풍수기의 유기물 유입량 변화를 모형이 반영하지 못한 것으로 생각된다. 모의항목의 MAE 지표는 예측치의 패턴이 관측평균치에 대해 5.2%(DO)에서 최대 11.7%(TN) 오차범위 내에서 재현되는 것을 보여준다. TN, TP, Chl-a의 MAE는 10% 내외의 평균절대오차에 해당되는 값으로서 양호한 수준의 예측 정확도를 갖는다. 모의결과의 상관계수(r)는 앞의 두 지표에서 예상되는 것처럼 TOC $r=0.82$, 그 밖의 항목은 $r=0.93$ 이상의 매우 양호한 상관관계를 나타낸다.

제시된 수질항목별 통계지표의 차이는 예측치와 관측치의 월별 편차와 함께 존재할 수밖에 없는 하천의 특성에 따른 것으로 이해된다. 예컨대 강수량 증가나 호우, 방류 등에 의한 이벤트성 유입에 대응하는 하천은 수질항목에 따라 일시적으로 완충의 한계상황에 놓이며, 그에 따른 단발성 영향을 모의하지 못할 경우 불가피하게 현장관측에 대한 편차가 발생할 것이다. 강수 외에도 영산강 하류는 승촌보와 죽산보의 다기능보 운영에 따른 수위 변동과 함께 상류 오염원에 대한 불확실성이 상존한다(Shin et al.[2017]). 주어진 환경에서 상황에 따른 수질인자의 상이한 거동을 예상할 수 있다. 그럼에도 불구하고 Fig. 3에 나타난 연간 예측치의 월 패턴은 비록 항목에 따라 일부 차이가 있으나 전체적으로 현장 관측치를 잘 재현하고 있다. 두 값의 오차율은 DO가 평균 4.8%(0.4%~13.3%)로 가장 작고, TOC가 평균 12.2%(0.9%~22.6%)로 가장 크다(Table 4). TN, TP, Chl-a는 평균적으로 각각 10.7%, 11.9%, 9.3%의 오차를 보이는 가운데 TN, Chl-a는 주로 여름철에, TP 및 TOC는 겨울철에 관측치와 더 큰 차이를 나타냈다.

관측치에 대해 더 높게 혹은 더 낮게 모의된 예측치의 차이를 관측치에 대한 비율로 나타낸 월간 변화는 전반적으로 연 후반으로 갈수록 커지는 경향을 보였다(Fig. 4). DO는 5월과 12월에 두 값의 차이가 각각 관측치의 11.1%, 13.3% 더 높은 것을 제외하면 관측치의 5% 이내로 모의되었으며, TN은 6월에 관측치의 18.0%로 가장 높게, 8월에 -18.8%로 가장 낮게 모의된 가운데 주로 여름철(5~9월)에 차이가 컸다. TP는 11월에 관측치의 21.7%로 차이가 가장 컸으나 연중 산발적으로 높거나 낮은 모의결과가 특징적이며, Chl-a는 1~2월과 7~8월에 각각 -13.0%~ -11.2%로 가장 낮고 10.8%~21.0%로 가장 높게 모의되었다. 한편, TOC의 모의 차는 관측치의 -19.8%~22.6% 범위로 전체 항목 중 가장 컸으며, 9월 이후

Table 3. Statistical summary of the simulated and observed water quality for model calibration

Factor	Avg. observed value	MAE	RMSE	NSE	r
Temp. (°C)	11.25	0.810	1.240	0.99	0.99
DO (mg/L)	10.18	0.533	0.605	0.95	0.97
TP (mg/L)	0.04	0.004	0.005	0.88	0.93
TN (mg/L)	2.98	0.350	0.390	0.83	0.94
Chl-a (µg/L)	10.72	1.108	1.335	0.97	0.99
TOC (mg/L)	4.13	0.475	0.589	0.61	0.82

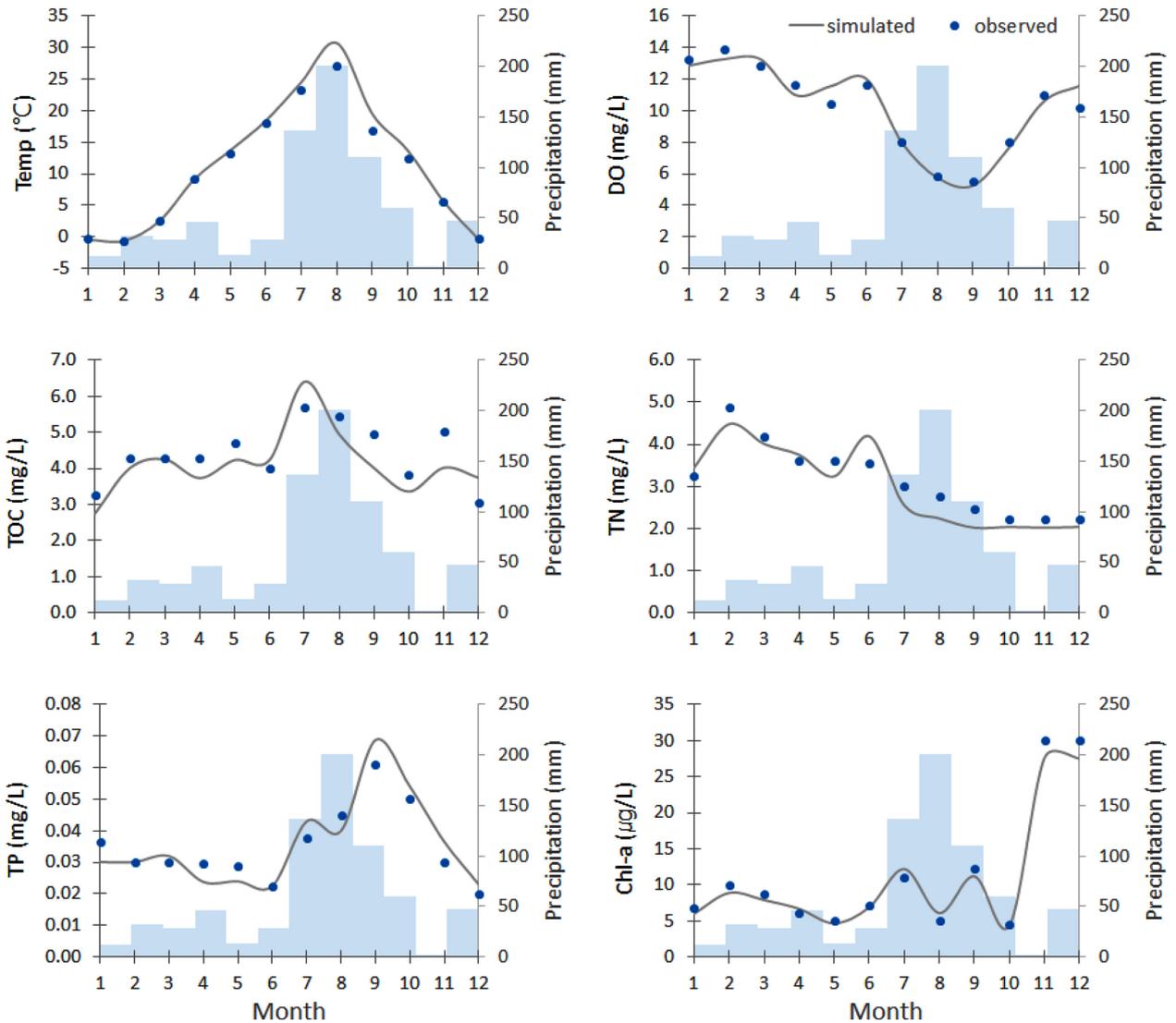


Fig. 3. Comparison of simulated and observed values of each water quality factors. The bars in figures show average monthly precipitation in Yeongsan river drainage basin in 2017.

Table 4. The error rate(%) of simulated and observed values of each water quality factors

Month	DO	TN	TP	Chl-a	TOC
1	3.0	6.5	17.1	13.0	15.6
2	4.3	8.2	0.3	11.2	6.3
3	3.1	4.1	6.7	9.2	0.9
4	5.3	3.6	19.3	8.8	12.6
5	11.1	10.2	17.2	6.9	10.0
6	3.5	18.0	0.0	2.8	5.5
7	0.4	15.3	14.7	10.8	12.7
8	1.0	18.8	10.7	21.0	9.0
9	4.5	17.6	12.4	8.9	19.0
10	4.9	8.5	8.0	2.2	12.3
11	3.5	9.0	21.7	8.1	19.8
12	13.3	8.5	15.0	8.4	22.6
avg.	4.8	10.7	11.9	9.3	12.2

로 더 분명한 차이를 보였다. 이처럼 시기적으로 연 중후반에 예측치의 차이가 더 커지는 수질항목의 연중 변화는 인위적 오염유발행위의 빈도 및 강우관련 기상변화가 같은 시기에 집중되는 상황을 반영한 것으로 판단된다. 한편, 연구기간 2017년에 발효된 영산강권역 기상특보(태풍, 호우)는 총 90회로 그 중 76%에 해당되는 68회가 7~10월에 집중되었다(MOLIT[2017]).

3.3 모의수질과 강수량의 관계

강수의 영향이 불가피한 조건에서 하천의 수질은 연중 강수분포에 따른 차이가 뚜렷하며(Parks and Baker[1997]; Winston and Criss[2002]; Ahn and Shin[2005]), 본 모의수질의 정확도도 강수량의 차이가 커지는 연 중반 이후로 더 떨어지는 경향이 확인된다(Table 4, Fig. 4). 연구기간 중 영산강의 유량이 큰 시기를 임의의 풍수기로 구분한 후 해당기간의 모의수질이 항목에 따라 어떤 차

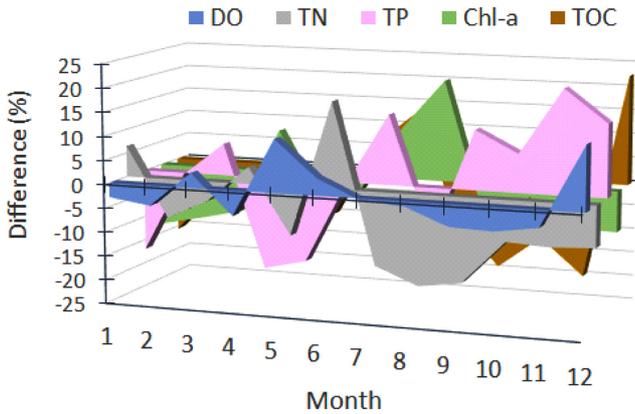


Fig. 4. Differences in simulated values for monthly observations.

이가 있는지 검토하였다. 이때 풍수기는 영산강 배수분지 주요 도시의 강수량자료를 기초로 7~10월로 설정하였으며, 나머지 기간은 갈수기로 간주하였다(Fig. 3).

갈수기의 수질은 TN과 Chl-a의 변화가 특징적이다(Fig. 5). 시기적으로 수온이 낮아 DO 농도가 높은 가운데 TP 농도는 비교적 낮게 유지된 반면 TN은 전 구간에서 높았다. Chl-a는 하류 방향으로 점증하여 영산호 수역에서 최대농도를 기록하였으며, TN 농도 분포와 밀접한 변화를 보인다. TOC는 상류 구간에서 농도가 낮은 반면 영산호 수역에서 증가된 형태를 보인다. 영산호에서 높은 농도의 Chl-a는 광합성에 의한 유기물 생산을 지시하며, 따라서 갈수기의

TOC는 상류하천의 흐름에 의한 공급이 아니라 영산호 수역의 유기물 생산에 의한 영향으로 판단된다.

풍수기에는 모의결과가 구간별 농도구배 없이 모두 하류까지 단조로운 형태를 유지하면서 유량이 많은 시기에 예상되는 상황으로 재현되었다(Fig. 5). 중간 농도의 TN과 달리 TP, TOC는 전 구간에서 높은 농도를 나타낸 반면 Chl-a 농도는 구간별 변화 없이 전체적으로 낮았다. 유량이 많은 시기임에도 높은 농도의 TP 및 TOC는 타 항목과 비교되며, 영산강에서 두 성분의 기원에 근거할 때(Lee *et al.* [2012]; Cho and Cho[2017]) 강수에 의한 희석보다 강우유출수의 주로 농경지 씻김에 따른 유입효과가 더 크게 작용한 결과로 생각된다.

상류의 낮은 농도와 달리 하류방향으로 점차 높아져 영산호에서 최고에 이르는 항목은 갈수기의 Chl-a와 TOC가 대표적이다(Fig. 5). 갈수기에 해당되는 저수온기에 영산호에서 *Stephanodiscus* 종을 비롯한 특정 조류의 증식과 그에 따른 유기물 증가에 대한 기존 연구는 (Jung *et al.*[2012]; Son *et al.*[2013]; Jeong *et al.*[2014]; Cho and Cho[2017]) 해당 수역에서 두 항목의 농도증가가 인과관계에 의한 것임을 뒷받침한다. 그러나 이러한 관계는 풍수기에는 관찰되지 않으며, 따라서 이 시기의 고농도 유기물은 저농도 Chl-a로 볼 때 하천 배수분지로부터 유입되는 외지성 기원에 의한 영향으로 해석된다. 본 연구의 수질모의는 단기간의 수질변화를 유추한 것으로 수질예측의 단초가 될 수 있다. 향후 지속적인 현장 모니터링과 모의 연구를 병행함으로써 영산강의 평균적 수질변화를 파악하기 위한 중장기적 접근이 필요해 보인다.

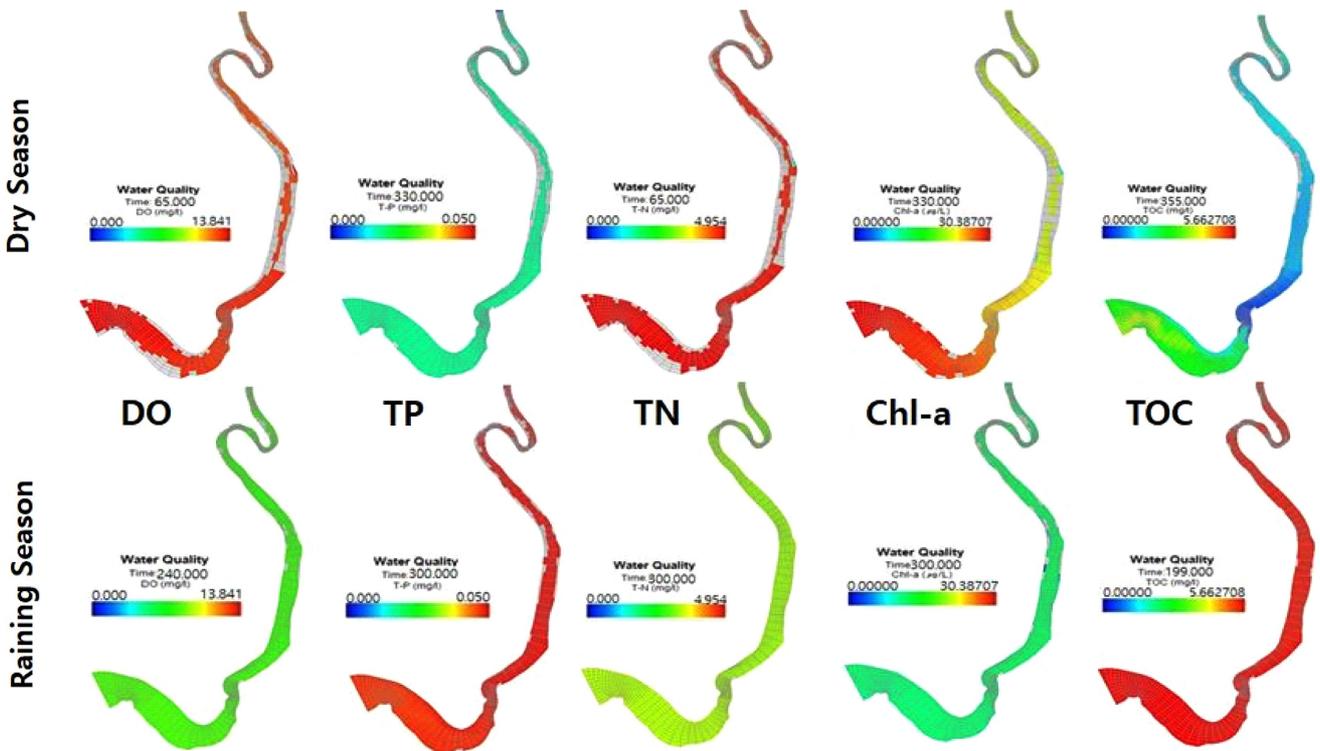


Fig. 5. Results of EFDC water quality model according to dry and rainy season in Yeongsan river.

4. 결 론

영산강 죽산보에서 영산호에 이르는 약 50 km 구간의 수질을 예측 및 검증하기 위해 EFDC 3차원 수치모의 프로그램을 이용하여 2017년 한 해 동안 TN, TP, DO, Chl-a, TOC 등 5개 항목에 대한 수질변화를 모의하였다.

1. 수치모의 결과는 NSE, RMSE, MAE, 상관계수 등의 통계지표로 검증한 바, 각 인자의 유효범위 내에서 양호한 수준에 도달하였다.

2. 모의항목의 농도는 Chl-a가 72.0%(σ_x/\bar{x})로 가장 편차가 컸고 TP 37.9%, TN 30.4%, TOC 20.6% 순으로 변동하였다.

3. 항목별 농도의 월 패턴은 춘계에 비교적 높은 TN과 별도로 하계의 TOC에 이어 추계에 TP, 동계에 Chl-a의 농도가 높아지는 순차적 인과관계가 추정되었다.

4. 예측치와 관측치의 편차는 주로 건기에 해당되는 불특정 월에 간극이 더 컸으나 DO 4.8%, Chl-a 9.3%, TN 10.7%, TP 11.9%, TOC 12.2% 순으로 전반적으로 현장을 잘 재현하였다.

5. 유량을 바탕으로 구분한 임의의 풍수기(7~10월)에는 TP 및 TOC가, 갈수기에는 TN 및 Chl-a가 영산강의 수질을 저해하는 주요 인자로 작용하였다.

후 기

본 논문은 2018학년도 목포대학교 교내 연구과제 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Ahn, G.G. and Shin, I.C., 2005, Influence of the Asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream, *Korean J. Ecol. Environ.*, 38(1), 54-62.
- [2] Cho, H.C. and Cho, Y.G., 2017, Long-term variation and flux of organic carbon in the human-disturbed Yeongsan river, Korea, 「The Sea」 *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 22, 187-198.
- [3] Jeong, B.K., Kim, Y.J., Jung, S.W., Lee, H.Y. and Shin, Y.S., 2014, Temporal variation and identification of a centric diatom, *Stephanodiscus* spp. during winter-spring blooms in the Yeongsan river, *Korean J. Ecol. Environ.*, 47(4), 273-281.
- [4] Jung, S.J., Lee, D.J., Hwang, K.S., Lee, K.H., Choi, K.C., Im, S.S., Lee, Y.H., Lee, J.Y. and Lim, B.J., 2012, Evaluation of pollutant characteristics in Yeongsan river using multivariate analysis, *Korean J. Ecol. Environ.*, 45(4), 368-377.
- [5] Korea Meteorological Administration, Gwangju Regional Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/aboutkma/intro/gwangju/>, 2017 (accessed 2017.12.11).
- [6] Lee, K.S., Yoon, K.S., Lim, S.S., Choi, D.H. and Choi, W.J., 2012, Effect of organic fertilizer application rate on temporal variation of TOC in runoff and soil organic carbon, in proc. of the 2012 Spring Conference of the Korean Society of Water Quality, 738-739.
- [7] Ministry of Environment, Water Environment Information System, <http://water.nier.go.kr/>, 2017 (accessed 2017.12.15).
- [8] Ministry of Environment, Yeongsan River Basin Environmental Office, <http://www.me.go.kr/ysg/>, 2017 (accessed 2017.12.15).
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Yeongsan River Flood Control Office, 2017, *Yeongsan River Forecast Almanac*, MOLIT-11-1150045-000014-14.
- [10] Na, E.H., Shin, C.M., Park, L.J., Kim, D.G. and Kim, K.H., 2014, A study on the operational forecasting of the Nakdong river flow with a combined watershed and waterbody model, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 30(1), 16-24.
- [11] National Institute of Environment Research, 2014, Optimization study of water quality forecasting system, National Institute of Environment Research, NIER-RP2014-388.
- [12] National Institute of Environment Research, 2017, A three-dimensional, numerical modeling study of surface water flow and water quality variations (II), National Institute of Environment Research, NIER-RP2017-203.
- [13] Park, S.C., Choi, K.H., Kim, J.O., Kang, K.S. and Gwak, P.J., 2017a, Eutrophication characteristics of the four great lakes of Yeongsan river by the Korean eutrophication index, in proc. of the 2017 Conference of the Korean Society of Civil Engineers, 1116-1118.
- [14] Park, S.C., Kim, J.O., Lee, W.B., Park, S.H. and Lee, S.D., 2017b, Characteristics of eutrophication of Yeongsan river area using the trophic state index, *J. Korean Soc. Water Sci. Technol.*, 25(6), 3-15.
- [15] Parks, S.J. and Baker, L.A., 1997, Sources and transport of organic carbon in an Arizona river-reservoir system, *Water Res.*, 31(7), 1751-1759.
- [16] Seo, D.I., Seo, M.J. and Woo, J.K., 2009, Serial use of hydrodynamic and water quality model of the Geum river using EFDC-hydro and WASP7.2, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 23(1), 15-22.
- [17] Shin, C.M., Min, J.H., Park, S.Y., Choi, J.K., Park, J.H., Song, Y.S. and Kim, K.H., 2017, Operational water quality forecast for the Yeongsan river using EFDC model, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 33(2), 219-229.
- [18] Shin, S.E., Youn, S.T., Koh, Y.K. and Oh, K.H., 2015, The geochemical characteristics and environmental changes of surface sediments in Yeongsan river area, *J. Korean geomorph. assoc.*, 22(3), 31-42.
- [19] Son, M.S., Park, J.H., Lim, C.H., Kim, S.K. and Lim, B.J., 2013, Seasonal change of phytoplankton community and water quality in Yeongsan river watershed, *Korean J. Environ. Biol.*, 31(2), 105-112.
- [20] Tetra Tech Inc., 2007, The environmental fluid dynamics code theory and computation, Volume 1: Hydrodynamics and mass transport, Tetra Tech Inc., Fairfax, VA, USA.

- [21] Winston, W.E. and Criss, R.E., 2002, Geochemical variations during flash flooding, Meramec river basin, May 2000, *J. hydrol.*, 265, 149-163.
- [22] Wool, T.A., Davie, S.R. and Rodriguez, H.N., 2003, Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse river estuary, North Carolina, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 129(4), 295-306.
- [23] Wu, G. and Xu, Z., 2011, Prediction of algal blooming using EFDC model: Case study in the Daoxiang lake, *Ecol. Model.*, 222(6), 1245-1252.
- [24] Yin, Z.H. and Seo, D.I., 2013, Water quality modeling of the Ara Canal using EFDC-WASP model in series, *J. Korean Soc. Environ. Engin.*, 35(2), 101-108.

Received 25 March 2021

Revised 26 April 2021

Accepted 30 April 2021