

## EFDC 모형을 이용한 낙동강에서의 2차원 수리해석\*

### - 보 구간의 유속 및 도달시간 중심으로 -

김범진<sup>1</sup> · 김병현<sup>2\*</sup> · 한건연<sup>3</sup>

## 2-D Hydrodynamic Analysis using EFDC in the Nakdong River\*

### - Focused on Velocity and Arrival Time Between Weirs -

Beom-Jin KIM<sup>1</sup> · Byung-Hyun KIM<sup>2\*</sup> · Kun-Yeun HAN<sup>3</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 낙동강을 대상으로 EFDC 모형을 구축하고, 2차원 수리해석을 수행하였다. 홍수기와 평수기에 대한 모의를 위해 실측수위, 보 방류량, 지류유입량을 포함하는 실측자료를 이용하였으며, 계산 결과를 관측소에서의 실측수위와 비교함으로써 적용 모형의 정확성과 적합성을 검증하였다. 또한, 계산결과에 대한 PBIAS, RSR, RMSE를 산정하여 모형의 통계적 정량적인 평가도 수행하였다. 모형의 검증 후 보의 일정 방류 시나리오 유량조건을 적용하여 각 보 구간별 평균유속을 산정하였으며, 산정된 평균유속은 유량조사사업단에서 조사한 평균유속과의 비교 및 검증을 실시하였다. 그리고 현장에서 실무적으로 적용 가능한 간편 도달시간 산정방법을 제안하고 그 방법을 적용하여 도달시간을 산정하였으며, 제안 방법은 홍수 예경보 등 현장의 실무에서 실제 적용이 가능할 것으로 기대된다.

주요어 : 2차원, EFDC, 낙동강, 통계적 평가, 도달시간

#### ABSTRACT

2020년 04월 27일 접수 Received on April 27, 2020 / 2020년 05월 28일 수정 Revised on May 28, 2020 / 2020년 05월 29일 심사완료 Accepted on May 29, 2020

\* This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (NRF-2017M2A8A4015290).

1 한국원자력연구원 기기구조예측진단연구부 박사후연구원 Structural Safety and Prognosis Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Postdoctoral Researcher

2 경북대학교 건설환경에너지공학부 조교수 School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National Univ, Assistant Professor

3 경북대학교 건설환경에너지공학부 교수 School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National Univ, Professor

\* Corresponding Author E-mail : bhkimb@knu.ac.kr

This study performed 2-D(two-dimensional) hydrodynamic analysis using EFDC in the Nakdong River. For the simulation of the flood season and non-flood season, the measured data including water level, weir outflow and tributary inflow were used, and the accuracy and applicability of the model were verified by comparing the measured water level and computed one. In addition, statistical quantitative assessment of the model performance was performed by estimating PBIAS, RSR, and RMSE for the computed water level. Then, the average velocity for each section between weirs was calculated by applying constant discharge conditions, and it was compared and verified with the measured velocity by Hydrological Survey Center. In this study, a simple method for estimating the arrival time was proposed, and it is expected that it will be practically applicable in field practices such as flood forecasting and warning.

**KEYWORDS :** Two-Dimension(2-D), EFDC, Nakdong River, Statistical Assessment, Arrival Time

## 서 론

낙동강 유역에서의 체계적 하천관리를 위해서는 24시간/365일 동안 하천상황 분석과 함께 수리학적 분석 등을 통한 하천수위 및 하도 관리가 수행되어야 한다. 따라서 낙동강 유역의 보의 영향을 고려한 수리해석을 실시함으로써 하천의 수위변화에 대한 실시간 예측, 이수 및 치수 기능을 효율적으로 유지 할 수 있는 수리모형을 구축할 필요가 있다. 이를 위해, 본 연구에서는 2차원 모형인 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)를 적용하여 낙동강에 대한 수리모형을 구축하였다. 이 모형은 미국 버니지아 해양과학연구소(Virginia Institute of Marine Science, VIMS)에서 개발된 모형으로 2·3차원 해수유동과 물질이동을 재현할 수 있는 다변수 유한차분 모형이다(Hamrick, 1992). 연구목적에 따라 수리, 수질, 유사 등에 적용되고 있으며, 연구대상지는 하천, 저수지, 하구연 등으로 국내·외에서 다양한 분야에 활용되고 있다.

EFDC 모형을 적용한 국외 연구 사례로서, EPA(Environmental Protection Agency, 2006)에서는 TMDL(Total Maximum Daily Load)에 EFDC 모형을 적용하여 하천과 하구연의 수리 및 수질계산을 수행하였으며, Liu *et al.*(2008)은 St. Louis 하구연과 유역에서 EFDC 모형을

이용하여 수리해석 및 수온, 염분 예측을 수행하여 HSPF 모형과 접목시켰다. Luo and Li(2009)는 North Jiangsu 연안에서 조위 분석과 COD에 관한 연구를 수행하였고, Xia *et al.*(2011)은 Perdido 만에서 염분과 DO의 분석을 수행하였다. 또한 Jia *et al.*(2011)은 Nansha 강 유역의 WASP 모형과 연계한 수질 예측에서 수리해석 부분에 활용하였으며, Franceschini and Tsai(2010)는 Niagara 강의 수질 불확실도를 분석하기 위하여 EFDC 모형을 수리해석 부분에 적용하였다. Glaser *et al.*(2009)은 Seneca 강의 수질해석을 위하여 EFDC 모형으로 수리해석과 수온, 염분의 분석을 수행하였고, Wu and Xu(2011)는 Daoxiang 저수지에서 조류번식에 관한 예측에 활용하였다. James *et al.*(2006)은 EFDC 모형을 이용하여 유사이송을 연구하였으며, Ji *et al.*(2002)은 Blackstone 강에서 유사와 중금속의 거동분석에 적용한 바 있다.

국내의 적용 연구로서, Hur, Y.T. and Park, J.H.(2009)는 낙동강 하류부와 외해에서 수리해석에 적용하였으며, Kang, H.S *et al.*(2011)은 유역모형인 SWAT 모형과 결합하여 낙동강 본류의 수리해석에 적용하는 연구를 수행하였다. Suh, S.W. and Lee, H.Y.(2008)는 새만금호 완공에 따른 DO와 COD의 변화양상을 3차원으로 해석하였고, Ahn, K.H. *et al.*(2011)은 용담호를 대상유역으로 수리해석과 수온성층에

관한 연구를 수행하였다. WASP 모형과 연계하여 저수지 수질예측에서 수리계산을 수행한 연구도 활발하게 수행되었으며(Park, J.C. *et al.*, 2010; Ahn, H.K. *et al.*, 2010; Kim, Y.D. *et al.*, 2011), Choi, H.G. *et al.*(2012)은 1차원 부정류 모형과 EFDC 모형을 실측자료와 비교하여 EFDC 모형의 적용성을 검증하였고, K-water(2015)에서는 4대강 보의 펄스방류효과를 규명하기 위해서 EFDC 모형을 적용한바 있다.

하지만, 2차원 모형을 이용하여 4대강 사업 이후 보 구간에서의 유속 및 도달시간을 산정한 연구는 이루어지지 않고 있다. 유량에 따른 수위, 유속 및 도달시간은 홍수 예·경보 활용되는 중요한 요소로 이에 관한 연구가 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 낙동강 유역에 대해서 2차원 EFDC 모형을 구축하고, 평수기와 홍수기에 대한 유량 조건을 적용하여 관측소 지점에서의 실측수위와 계산수위와의 비교를 통해 모형의 정확성과 적합성을 검증하였다. 또한, 검증된 모형을 바탕으로 주요 유량 규모 및 보의 방류량을 고려하여 현장에서 실무적으로 적용 가능한 간편 도달시간 산정방법을 제안하고 그 방법을 적용하여 도달시간을 산정하였다. 제안 방법에 대한 검증을 위해, 본 연구에서 계산된 유속을 유량조사사업단에서 실측한 자료인 MOLIT(2013, 2014)와 비교·검토하였다. 본 연구에서 제안한 간편 홍수와 도달시간 산정방법은 특정 유량에 해당하는 유속과 도달시간을 쉽게 찾을 수 있는 방법이 고려된다면 홍수 예경보 및 방재대책 등 현장의 실무에서 실제 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 적용 모형

### 1. EFDC 모형

EFDC 모형은 버지니아 해양과학연구소(VIMS)에서 처음 개발되었고, 미국 환경보호청(EPA)의 지원 하에 지속적으로 개발 및 보완되고 있다. EFDC 모형의 수리동역학과 다양한 계산 기법은 프린스턴 해양순환모형(Princeton

Ocean Model, POM)(Blumberg and Mellor, 1987; Hamrick and Wu, 1997)과 유사하다. EFDC 모형은 다양한 밀도의 유체 운동에 관한 3차원의 자유수면을 가지는 흐름을 적절한 난류 이송 방정식으로 그 해를 구하고, 또한 난류이송 에너지에 대한 운동 방정식과 역학적으로 연결되어 난류 길이, 척도, 염분과 온도를 해석한다. 두 개의 난류 매개변수 운동 방정식들은 Mellor-Yamade의 난류모형을 실행하게 된다(Mellor and Yamada, 1974; Galperin *et al.*, 1988). 본 연구에서는 EFDC Exporer 5 버전을 사용하여 낙동강 유역 보의 수문에 따른 방류 유량에 대한 도달시간 및 수위 예측을 하기 위해서 EFDC의 두 격자간의 일정 유량을 주고 받는 기능을 적용하여, 실제 보 운영조건에 대한 모델링을 구성하였다.

EFDC 수리동역학 모델은 연속방정식, Reynolds 평균개념에 의한 Navier-Stokes 방정식과 운송 방정식에 기초하여 구성된다.

$$z = \frac{z^* + h}{h + \eta} \quad (1)$$

$z$ 는 무차원 수직 좌표계, 이른바 시그마 좌표계이며,  $z^*$ 는 물리적으로 수직인 Cartesian 좌표계이다. 시그마 좌표계는 다음과 같은 결과를 도출한다.

$$z = 0, z^* = h \quad (\text{해저지형}) \quad (2a)$$

$$z = 1, z^* = \eta \quad (\text{자유수면}) \quad (2b)$$

시그마 좌표계를 이용하면 수심 측량에 있어 완전한 결과를 보여주게 되고 얕은 수심과 깊은 수심에서 모두 동일한 정확함을 얻을 수 있게 된다. 이에 대한 자세한 내용은 Vinokur(1974)나 Blumberg와 Mellor(1987)의 연구에서 찾아볼 수 있다. 다양한 밀도의 유체에서도 Boussinesq 근사를 사용하여 밀도차가 충분히 작은 경우 무시할 수 있지만, 중력가속도( $g$ )가 곱해진 항들은 예외로 한다. 모형의 지배 방정

식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

연속 방정식

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = Q_H \quad (3)$$

x방향에 대한 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Hu}{\partial t} + \frac{\partial(Huu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hvu)}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} - fHv \\ &= -H \frac{\partial(p+g\eta)}{\partial x} + Hgb \frac{\partial h}{\partial x} - Hgbz \frac{\partial H}{\partial x} \\ & \quad + \frac{\partial(\frac{v_v}{H} \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} + Qu \end{aligned} \quad (4)$$

y방향에 대한 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Hv}{\partial t} + \frac{\partial(Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(Hvv)}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} + fHu \\ &= -H \frac{\partial(p+g\eta)}{\partial y} + Hgb \frac{\partial h}{\partial y} - Hgbz \frac{\partial H}{\partial y} \\ & \quad + \frac{\partial(\frac{v_v}{H} \frac{\partial v}{\partial z})}{\partial z} + Qv \end{aligned} \quad (5)$$

### 모형의 적용

#### 1. 대상유역

낙동강의 유역면적은 23,384km<sup>2</sup>, 유역평균 폭은 46.3km, 유역 형상계수는 0.090이고, 낙동강 지류의 유역 형상계수는 0.068~0.416(평균 0.211) 정도이다(MOCT, 2016). 본 연구의 대상유역은 낙동강의 지보 수위표에서부터 창녕·

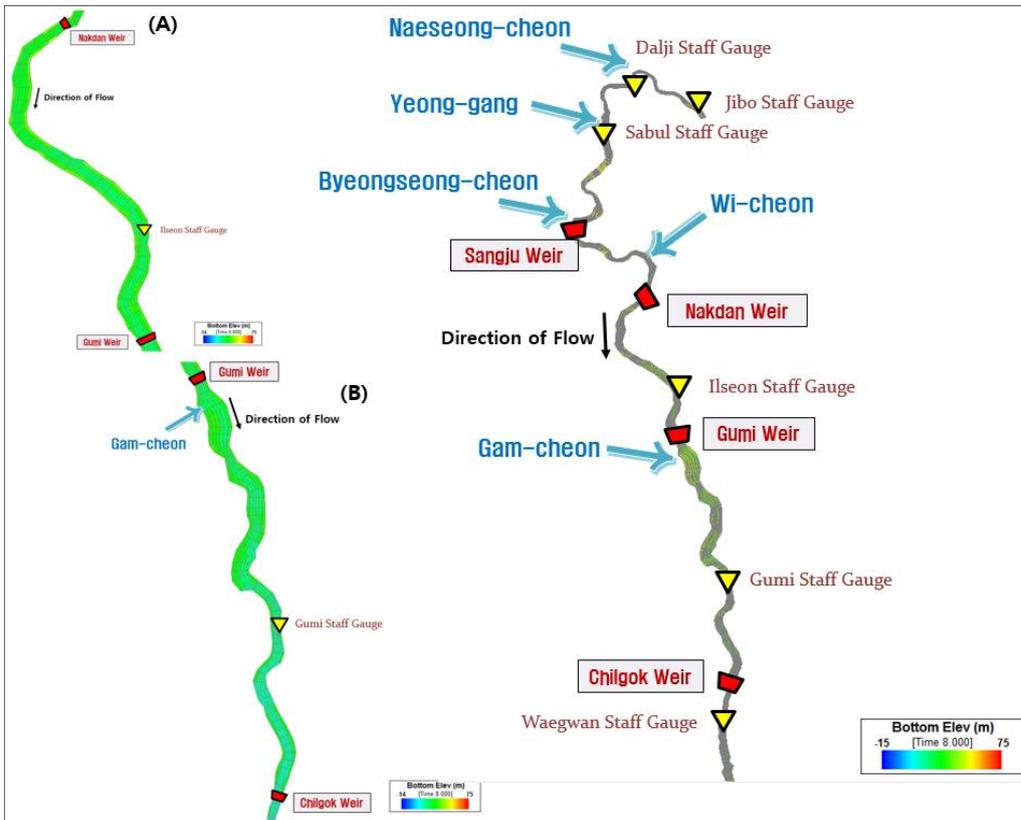


FIGURE 1. Upstream of Nakdong river in the study area

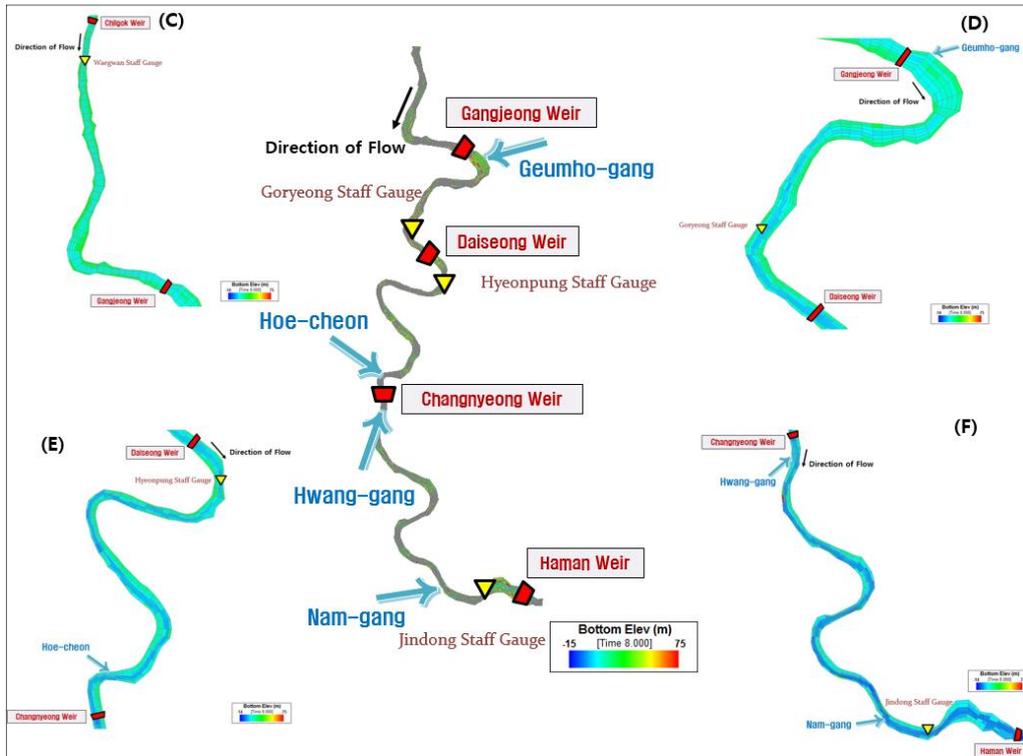


FIGURE 2. Downstream of Nakdong river in the study area

함안보 구간으로 선정하였지만, 지보 수위표는 실측 자료가 존재하지 않아 사별 수위표~창녕·함안보까지 약 178.3km 구간으로 설정하였다(그림 1). 대상유역에 존재하는 보, 지류 그리고 수위관측소의 위치 및 하상고를 낙동강 상류부와 하류부로 나누어 그림 1과 2에 각각 나타내었다.

## 2. EFDC 모형 구축

대상유역에 대한 지형자료 구축을 위해, 하천 측량자료인 HEC-RAS 자료(낙동강 하천기본계획, 2013)와 보 상·하류부 인근의 상세지형을 측량한 자료(K-water, 2013)를 이용하였다. 구축된 지형자료를 이용한 EFDC 모형의 적용을 위해, 보의 수문 넓이를 포함하여 하도를 따라 횡방향 6개(평균 117m), 종방향 384개

TABLE 1. Manning' s coefficient (MLTM, 2009)

River	HEC-RAS No.	Manning' s $n$
Nakdong	No. 705 ~ No. 697	0.033
	No. 696 ~ No. 673	0.025
	No. 672 ~ No. 468	0.025~0.0275
	No. 467 ~ No. 363	0.0242
	No. 363 ~ No. 388	0.023
	No. 337 ~ No. 203	0.020
	No. 202 ~ No. 0	0.023

(평균 491m)의 총 2,304개 격자를 생성하였다. 자료추출을 위해서 대상지역에 대한 수치지도자료, 위성자료 등을 활용하였다. 대상유역에서의 상류단 경계조건은 사벌 수위관측소의 유량을, 내부 경계조건으로는 각 보의 방류량을, 그리고 하류단 경계조건으로는 함안보의 방류량을 적용하였다. 또한, EFDC 모형의 조도계수의 경우 표 1과 같이 MLTM(2009)에서 제안한 값을 적용하였다.

1) 모형의 검증

대상유역에 대한 EFDC 모형의 검증을 위해 평수기와 홍수기 조건에 대해서 수리 분석을 실시하였다. 평수기 조건에 대해서는 2015년 3월 5일부터 1시간 강우의 15일치 자료를 이용

하였고, 홍수기조건에 대해서는 2014년 9월 25일부터 1시간 강우의 15일치 자료를 이용하였다. 각 모의에 사용된 상류단 경계조건, 지류 유입량은 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)에서 제공하는 자료를 사용하였고, 내부 경계조건인 보별 방류량 자료는 K-water에서 제공하는 1시간 단위의 자료(<https://www.water.or.kr>)를 사용하였다. 하류단 경계로는 함안보 하류 1km지점에서 열린 조건을 적용하였으며, 모형으로부터 계산된 결과와의 비교를 위해 검증에 사용된 수위자료는 낙동강홍수통제소(<http://www.nakdongriver.go.kr>)에서 제공하는 1시간 단위의 자료를 사용하였다.

평수기 조건에 대한 상류단 경계조건과 내부 경계조건인 보 방류량은 그림 3에서 보여주고

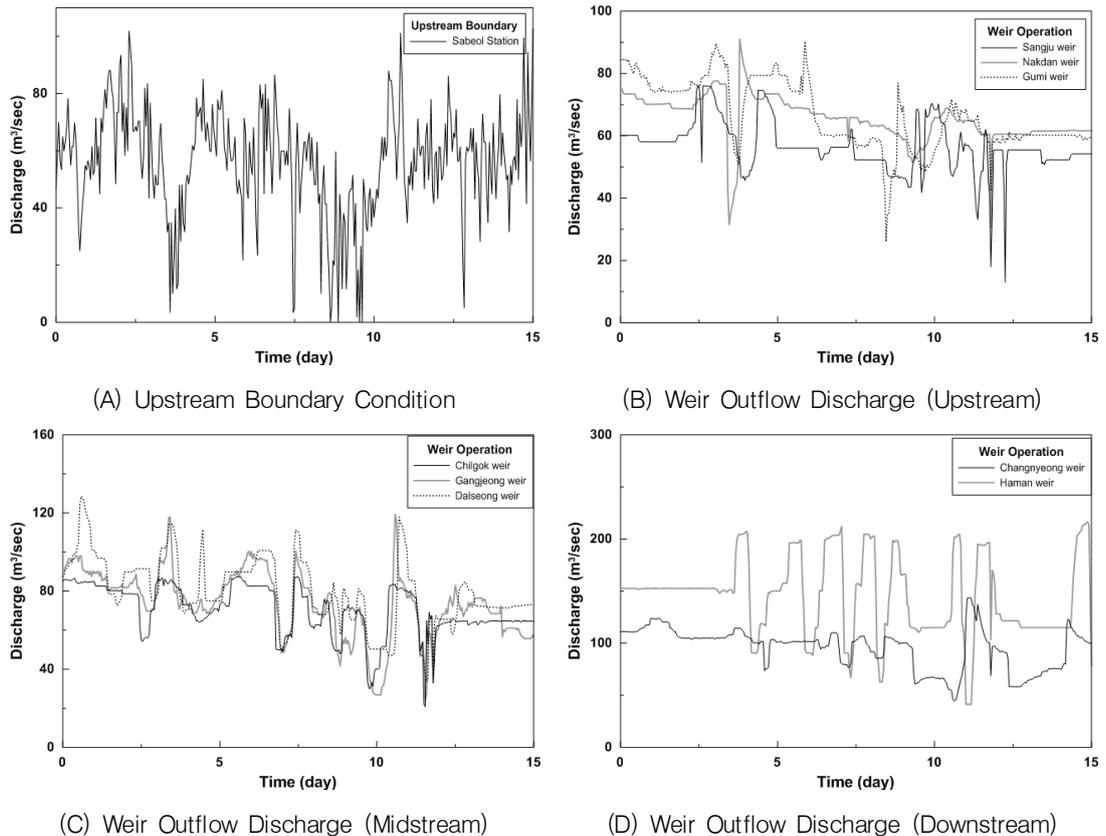


FIGURE 3. Upstream boundary condition and weir outflow discharge (Mar., 2015)

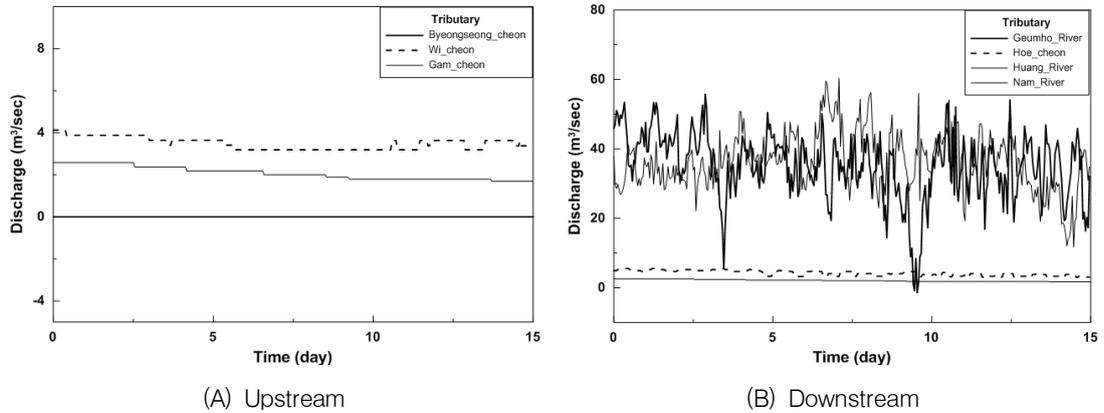


FIGURE 4. Tributary Inflow (Mar., 2015)

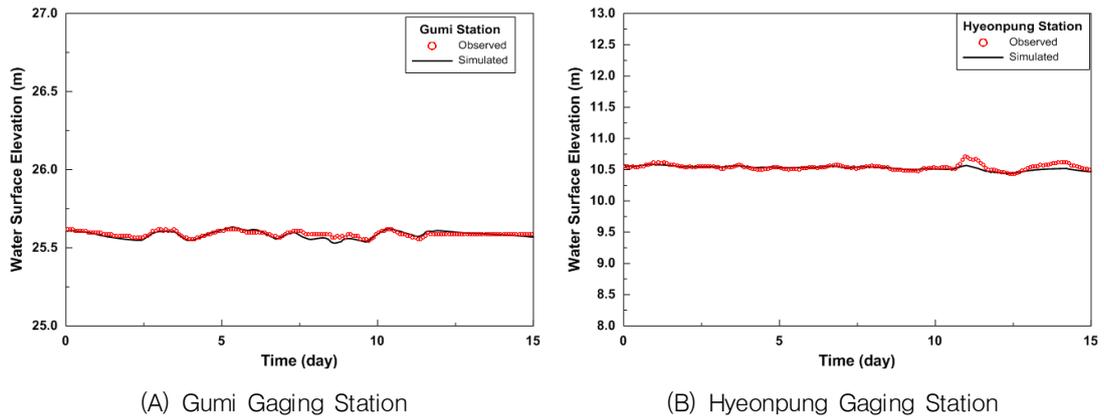


FIGURE 5. Comparison of observed and computed water surface elevation (Mar., 2015)

있으며, 같은 기간 주요 지류에서의 유입량은 그림 4에서 보여주고 있다. 그림 3에서 보여주듯이, 이 기간 동안 상주보에서는  $12.9 \sim 76.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 낙단보에서는  $20.6 \sim 91.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 구미보에서는  $26.1 \sim 90.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 철곡보에서는  $20.8 \sim 87.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 강정고령보에서는  $24.0 \sim 119.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 달성보에서는  $33.4 \sim 128.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 합천창녕보에서는  $44.6 \sim 143.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 창녕·함안보에서는  $41.3 \sim 216.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 범위에서 방류가 이루어졌다. 평수기 조건에 대한 모형의 검증을 위해 구미와 현풍 수위표 지점에서 모의치와 실측치를 비교하였으며, 비교한 결과는 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이,

모의결과는 각 수위표에서 측정된 실측값과 잘 일치하였다. 또한, 전체 연구유역에서 계산된 수위 및 유속 분포를 그림 6과 7에 각각 나타내었다.

모의결과에 대한 정량적인 정확도 평가를 위해, Moriasi *et al.* (2007)이 지시오차 통계기법으로 제시한(표 2) 평균편차 비율(Percent bias, PBIAS)과 평균제곱근오차 대 관측값 표준편차 비율(Ratio of the root mean square error to the standard deviation, RSR) 그리고 오차계산을 위해 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 RMSE(Root Mean Square Error)를 산정하여 표 3에 제시하였다. PBIAS, RSR, RMSE



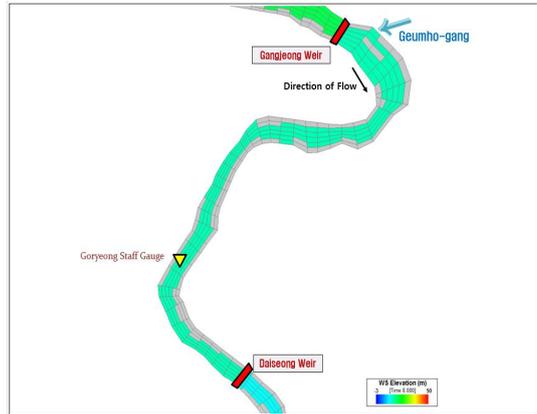
(A) Nakdan ~ Gumi



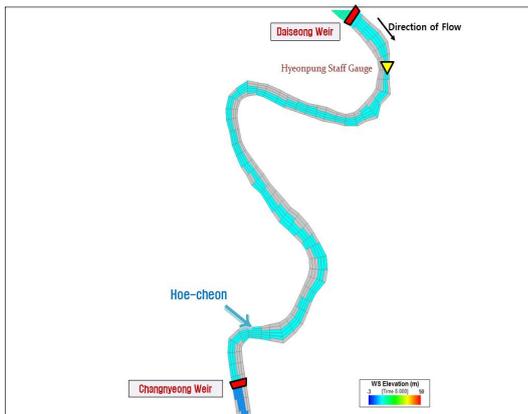
(B) Gumi ~ Chilgok



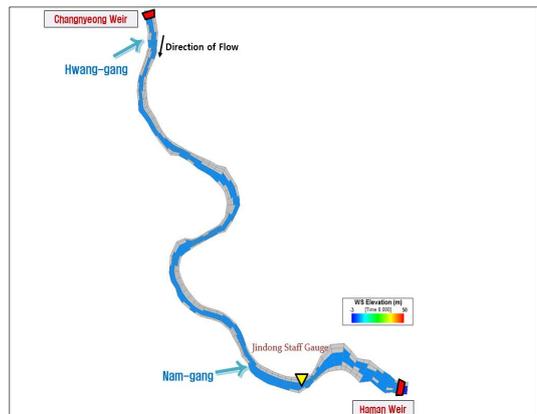
(C) Chilgok ~ Gangjeong



(D) Gangjeong ~ Daiseong

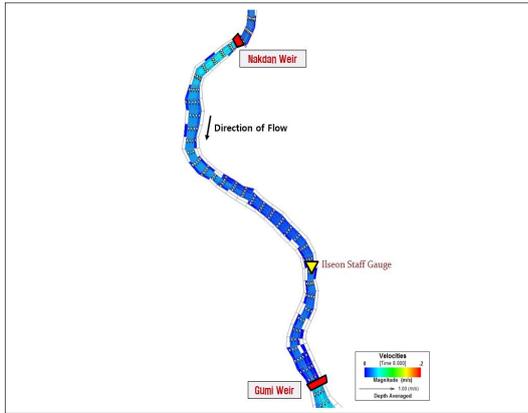


(E) Daiseong ~ Changnyeong

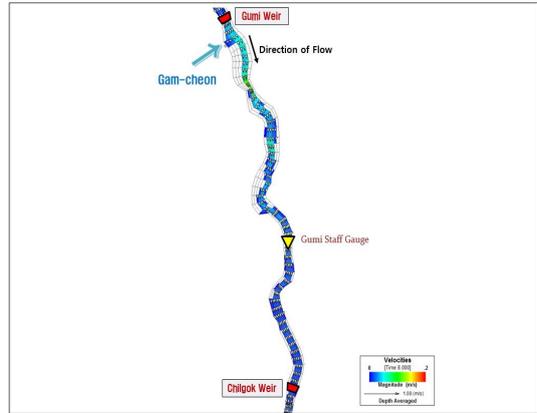


(F) Changnyeong ~ Haman

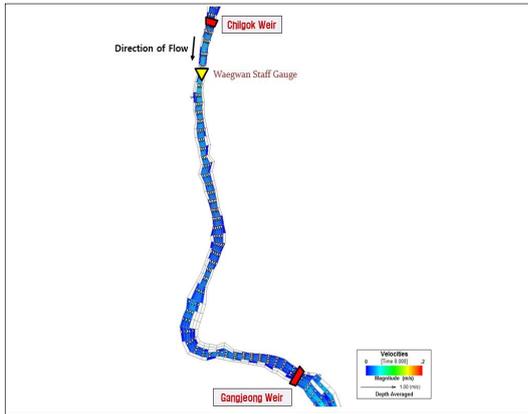
FIGURE 6. Computed water surface elevation (Mar., 2015)



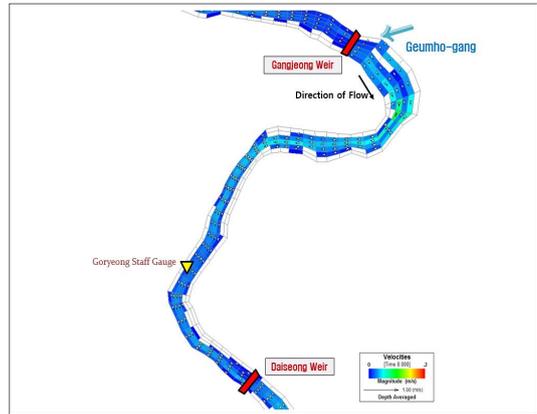
(A) Nakdan ~ Gumi



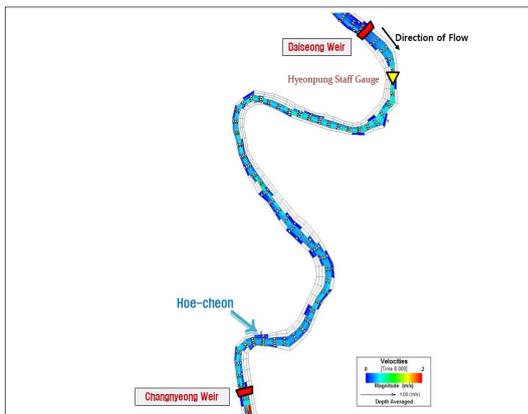
(B) Gumi ~ Chilgok



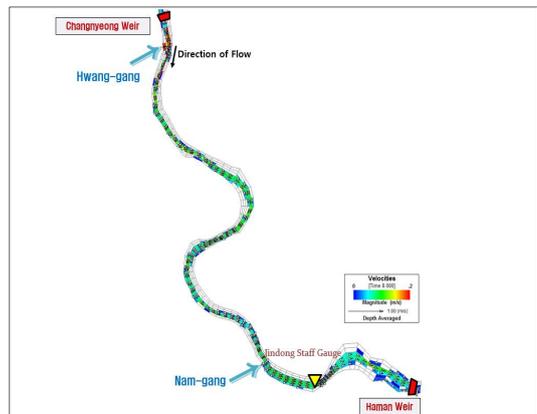
(C) Chilgok ~ Gangjeong



(D) Chilgok ~ Gangjeong



(E) Daiseong ~ Changnyeong



(F) Changnyeong ~ Haman

FIGURE 7. Computed velocity distribution (Mar., 2015)

TABLE 2. Statistical criteria of model performance (Moriassi *et al.*, 2007)

Performance Rating	PBIAS (%)		RSR
	Stream flow	Sdiment	
Very good	PBIAS<±10	PBIAS<±15	0.00<RSR≤0.50
Good	±10≤PBIAS<±15	±15≤PBIAS<±30	0.50<RSR≤0.60
Satisfactory	±15≤PBIAS<±25	±30≤PBIAS<±55	0.60<RSR≤0.70
Unsatisfactory	±25≤PBIAS	±55≤PBIAS	0.70<RSR

TABLE 3. Estimated model performance

Station	PBIAS (%)		RSR	RMSE (m)
Gumi (Mar., 2015)	0.146	Very good	0.051	0.015
Hyeonpung (Mar., 2015)	0.143	Very good	0.142	0.042
Gumi (Sep., 2014)	0.325	Very good	0.033	0.23
Hyeonpung (Sep., 2014)	0.308	Very good	0.001	0.44

산정식은 식 6~8에 각각 나타내었다. 표 3에서 보여주듯이, 구미 수위표에서의 계산치와 실측치의 PBIAS와 RSR은 각각 0.146%와 0.051로 산정되어 Moriassi *et al.*(2007)이 제시한 기준으로는 [Very good]을 보여주었으며, 현풍 수위표에서의 PBIAS와 RSR도 각각 0.143%와 0.142로 산정되어 [Very good]을 보여주었다. RMSE는 구미와 현풍수위표에서 각각 0.015m와 0.042m로 작은 차이를 나타내어 평수기에서 계산치가 실측치와 잘 일치함을 정량적으로도 보여주었다.

$$PBIAS(\%) = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal}) \times 100}{\sum Q_{obs}} \quad (6)$$

$$RSR = \frac{SE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (7)$$

$$SE(m) = \sqrt{\frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}{N}} \quad (8)$$

연구유역에서 홍수기 조건에 대해서도 EFDC 모형을 검증하였다. 평수기와 마찬가지로, 2014

년 9월 25일부터 1시간 단위의 15일간 유량자료를 상류단 경계조건 및 지류 유입량, 보별 방류량으로 적용하였다. 상류단 경계조건과 보별 방류량은 그림 8에 나타내었으며, 같은 기간 주요 지류에서의 낙동강 본류 유입량은 그림 9에 나타내었다. 이 기간 동안 상주보에서는 2.5~3,223.5m<sup>3</sup>/sec, 낙단보 33.3~5,072.6m<sup>3</sup>/sec, 구미보 44.8~5,098.9m<sup>3</sup>/sec, 칠곡보 27.1~8,970.7m<sup>3</sup>/sec, 강정·고령보 3.3~9,476.8m<sup>3</sup>/sec, 달성보 3.0~10,898.2m<sup>3</sup>/sec, 합천·창녕보 49.8~11,921.7m<sup>3</sup>/sec, 창녕·함안보 110.5~13,988.7m<sup>3</sup>/sec의 범위에서 방류가 이루어졌다. 평수기와 마찬가지로, 구미와 현풍 수위표 지점에서 홍수기 조건에 대한 계산수위와 실측수위를 비교하고, 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 보는 바와 같이, 각 수위 관측지점에서의 EFDC의 모의 결과는 그 변동 양상과 크기에 있어 실측치와 비교적 잘 일치하였다. 홍수기에 대해 전체 연구유역에 대해 계산된 수위 및 유속 분포를 그림 10과 11에 각각 나타내었다.

평수기와 마찬가지로 홍수기에 대한 모의결과의 정량적인 정확도 평가를 위해, PBIAS, RSR

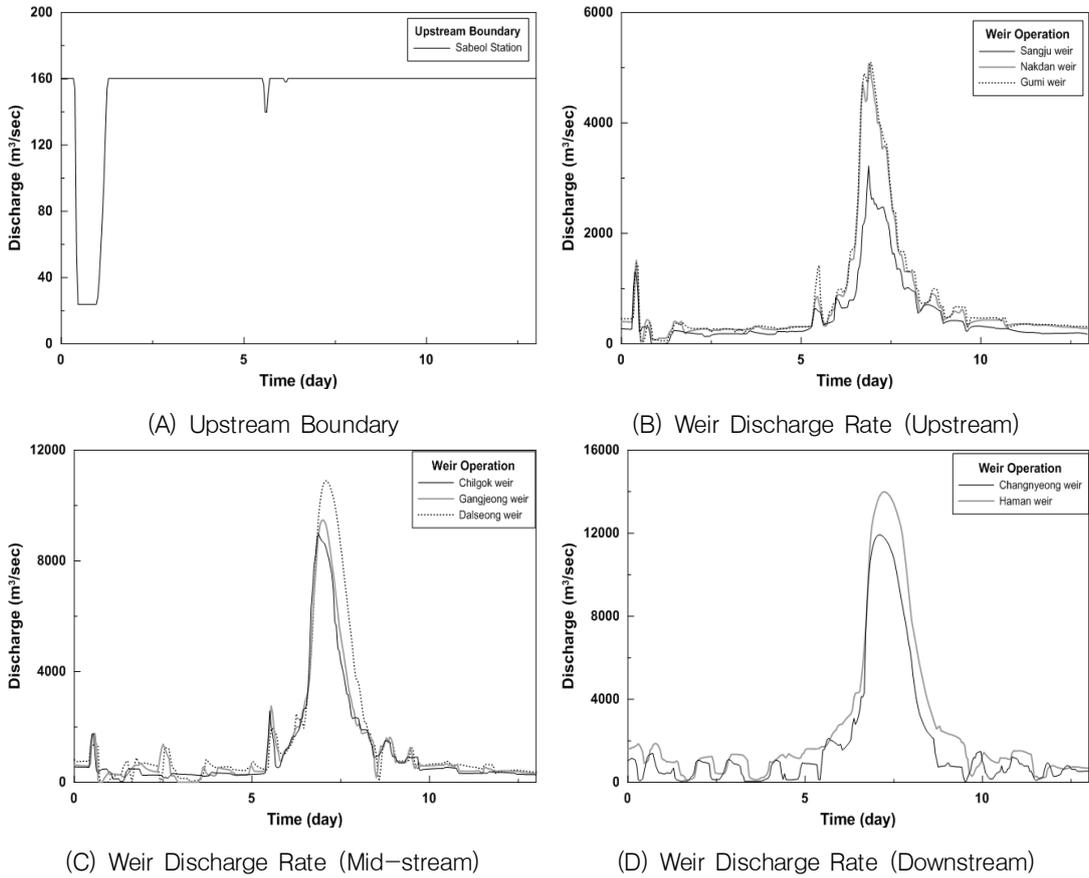


FIGURE 8. Upstream Boundary Condition and Weir Outflow Discharge (Sep., 2014)

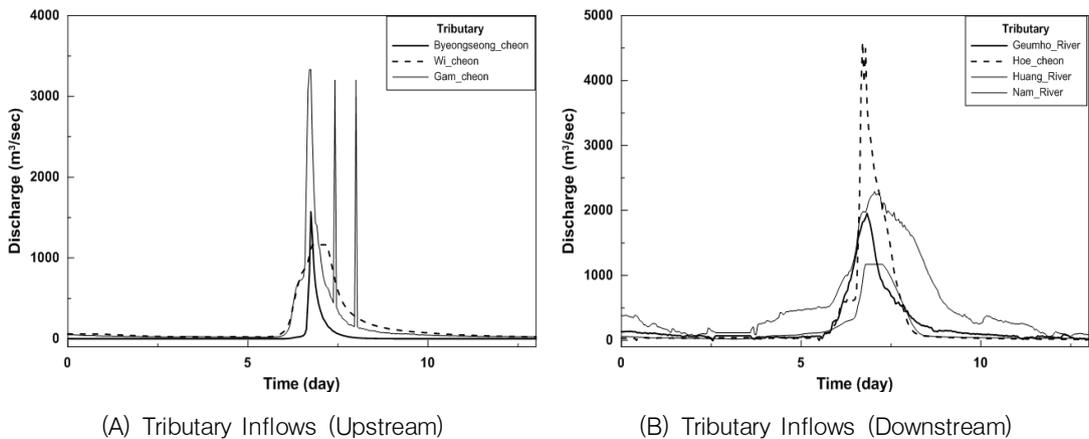
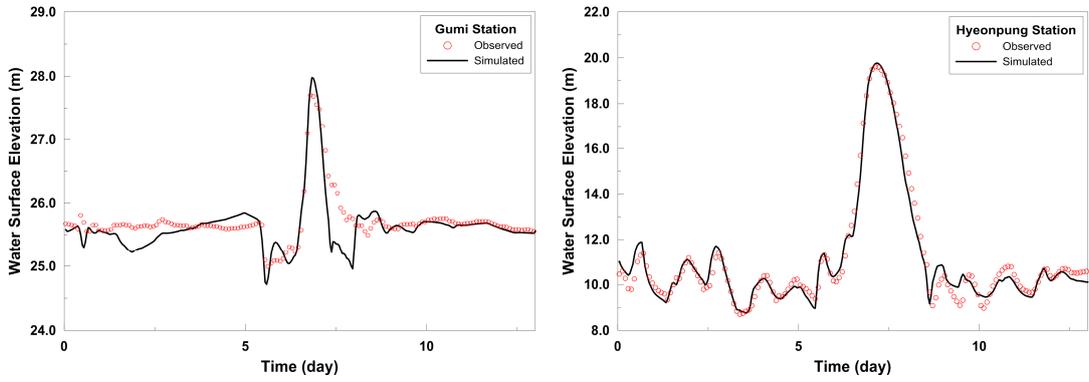


FIGURE 9. Tributary inflow (Sep., 2014)



(A) Gumi Gaging Station

(B) Hyeonpung Gaging Station

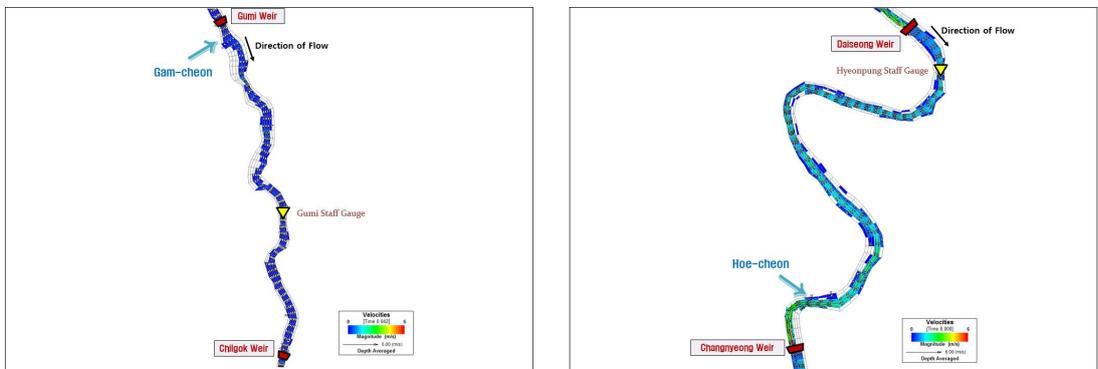
FIGURE 10. Comparison of observed and computed water surface elevation (Sep., 2014)



(A) Gumi ~ Chilgok

(B) Daiseong ~ Changnyeong

FIGURE 11. Computed water surface elevation (Sep., 2014)



(A) Gumi ~ Chilgok

(B) Daiseong ~ Changnyeong

FIGURE 12. Computed velocity distribution (Sep., 2014)

RMSE를 산정하여 표 3에 제시하였다. 표 3에서 보여주듯이, 구미 수위표에서의 계산치와 실측치의 PBIAS와 RSR은 각각 0.325%와 0.033으로 산정되어 Moriasi *et al.*(2007)이 제시한 기준으로는 [Very good]을 보여주었으며, 현풍수위표에서의 PBIAS와 RSR도 각각 0.308%와 0.001로 산정되어 [Very good]을 보여주었다. RMSE는 구미와 현풍수위표에서 각각 0.23m와 0.44m로 작은 오차를 나타내어 홍수기에서도 적용 모형의 정확성을 정량적으로 보여주었다.

### 3. 보 구간에서의 유속 및 도달시간 산정

댐 및 보의 방류로 인한 유량 도달시간은 이들 시설물을 통한 방류량이 하도내로 전달될 때 단면형태 및 하천경사 등에 의한 유속에 따라 상이하게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 주요 유량 규모 및 방류량을 고려하여 현장에서 실무적으로 적용 가능한 간편 도달시간 산정방법을 제안하고 그 방법을 적용하여 도달시간을 산정하였다.

앞서 연구구역에서 평수기와 홍수기에 대해 검증을 수행한 EFDC 모형을 이용하여 상주보~낙단보, 낙단보~구미보, 구미보~칠곡보, 칠곡보~강정보, 강정보~달성보, 달성보~창녕보, 창녕보~함안보 구간의 방류량에 따른 하류부 유속 및 도달시간을 산정하였다. 모형의 상류단 경계조건은 보의 일정방류 조건과 내성천, 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강의 지류 유량을 고려하여 적용하였다. 또한, 각 하

도구간의 기저유량은 관리수위로 가정하였다.

보 구간에서 일정방류 시나리오 유량조건으로는 100m<sup>3</sup>/sec, 500m<sup>3</sup>/sec, 1,000m<sup>3</sup>/sec, 50년 빈도, 100년 빈도의 총 5가지의 조건을 적용하였다. 즉, MLTM(2009)을 참고하여 상류단에서 100m<sup>3</sup>/sec 일정 방류량 일 때 지류의 유량을 고려하여 하류부에는 151m<sup>3</sup>/sec 범위의 유량을 사용하였으며, 50년 빈도의 홍수량 값은 10,000~15,100m<sup>3</sup>/sec 범위를 100년 빈도의 홍수량 값은 11,100~16,600m<sup>3</sup>/sec 범위의 유량을 사용하였다. 연구 구역내 각 보별 구간거리는 상주보~낙단보의 경우 15.7km, 낙단보~구미보의 경우 17.8km, 구미보~칠곡보의 경우 27.7km, 칠곡보~강정보의 경우 25.5km, 강정보~달성보의 경우 19.6km, 달성보~창녕보의 경우 29.3km, 창녕보~함안보의 경우 42.7km를 적용하였다. 각 보별 구간거리와 EFDC 모형으로 계산된 유속을 이용하여 유량의 도달시간은 식 9로 산정하였다.

$$\text{도달시간}(hr) = \frac{\sum (\text{단면구간거리}(m) / \text{지점까지의평균유속}(m/s))}{3600} \quad (9)$$

다섯가지의 유량조건으로 유속 및 도달시간을 산정하기에 앞서, 첫 번째 조건인 100m<sup>3</sup>/sec 조건에 대해 산정된 결과를 유량조사사업단에서 실측한 자료(MOLIT, 2013; 2014) 및 1차원 하천수리해석모형인 HEC-RAS 모의 결과와 비교·검토하였다(표 4). 표 4에서 보여주듯이,

TABLE. 4 Comparison of flow velocity

Section	MOLIT (2013, 2014)	EFDC (This study)	HEC-RAS
	Flow Velocity (m/s)	Average Velocity (m/s)	Average Velocity (m/s)
Nakdan-Gumi	0.03~0.04	0.036	0.530
Gumi-Chilgok	0.03~0.06	0.043	0.478
Chilgok-Gangjeong	0.02~0.15	0.036	0.311
Gangjeong-Dalseong	0.03~0.07	0.042	0.396
Dalseong-Changnyeong	0.05~0.08	0.053	0.475
Changnyeong-Haman	0.04~0.10	0.075	0.136

TABLE. 5 Estimated flood velocity and arrival time

Section	Property	Discharge (m <sup>3</sup> /s)				
		100 (100~151)	500 (500~755)	1,000 (1,000~1,510)	50yr. Fr. (10,000~15,100)	100yr. Fr. (11,100~16,600)
Sangju-Nakdan	V (m/s)	0.045	0.224	0.446	2.575	2.671
	AT (hr)	97.7	19.4	9.8	1.7	1.6
Nakdan-Gumi	V (m/s)	0.036	0.182	0.364	2.068	2.15
	AT (hr)	137.2	27.2	13.6	2.4	2.3
Gumi-Chilgok	V (m/s)	0.043	0.206	0.289	1.881	1.97
	AT (hr)	179.9	37.4	26.6	4.1	3.9
Chilgok-Gangjeong	V (m/s)	0.036	0.176	0.334	1.945	2.045
	AT (hr)	197.7	40.2	21.2	3.6	3.5
Gangjeong-Daiseong	V (m/s)	0.042	0.208	0.419	1.967	2.058
	AT (hr)	130.2	26.2	13	2.7	2.6
Daiseong-Changnyeong	V (m/s)	0.053	0.266	0.52	1.851	1.954
	AT (hr)	153.3	30.7	15.7	4.4	4.2
Changnyeong-Haman	V (m/s)	0.075	0.345	0.659	1.789	1.948
	AT (hr)	159.1	34.4	18	6.6	6.1

V : Velocity (m/s), AT : Arrival time (hr)

HEC-RAS 모형의 유속 산정결과는 유량조사 사업단의 실측자료 및 본 연구의 EFDC 모형 결과보다 훨씬 큰 유속결과를 보여주었다. 반면, 낙단보~구미보 구간 내에 일정방류량 조건의 상류단 유입 조건이 100~151m<sup>3</sup>/sec일 때 EFDC를 적용하여 본 연구에서 계산된 평균유속은 0.036m/s이며, 유량조사사업단에서 일선교 수위관측소가 위치한 곳에서 조사된 유량 범위는 73.98~114.73m<sup>3</sup>/sec이며, 이때 평균유속은 0.03~0.04m/s였다. 동일한 방법으로 구미보~칠곡보 구간에서는 계산된 평균유속은 0.043m/s이며, 유량조사사업단에서 조사된 유량 범위는 78.21~169.73m<sup>3</sup>/sec이며, 이때 평균 유속은 0.03~0.06m/s였다. 유량조사사업단에서 조사된 유속 자료와 본 연구에서 계산된 평균유속 간의 비교·분석을 실시하였을 때, 적정 범위에 있고 신뢰할 수 있는 결과로 판단되었다.

따라서, 100m<sup>3</sup>/sec의 일정방류 조건에 대해 검증된 EFDC 모형을 나머지 4개의 일정방류 조건(500m<sup>3</sup>/sec, 1,000m<sup>3</sup>/sec, 50년 빈도, 100년 빈도)에도 적용하고 각 구간에서의 유속과 홍수파 도달시간을 산정하여 표 5에 나타내었다. 표 5에서 보여주듯이, 방류량이 증가할수

록 홍수파의 유속과 도달시간이 증가하고 있으며, 특히 50년 빈도 이상의 방류량에서는 유속과 도달시간이 정량적으로 증가하는 것으로 산정되었다. 본 연구에서 제안한 간편 홍수파 도달시간 산정방법의 모델은 유속산정결과 유량조사사업단에서 실측한 유량의 적정 범위 나타났으며, PBIAS, RSR, RMSE의 통계분석결과 신뢰할 수 있는 결과로 판단되었다. 또한 본 모형을 모의시간은 1분 이내로 실제 홍수 예정보 등 현장의 실무에서 실제 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 낙동강 178.3km 구간에 대해 EFDC 모형을 구축하고, 2,304개 격자를 생성하여 2차원 수리해석을 수행하였다. 모형의 검증을 위해, 홍수기 및 평수기에 대한 조건을 각각 적용하였으며, 실측수위와의 비교를 통해 모형의 정확성과 적합성을 검증하였다. 그리고 검증된 2차원 EFDC 모형을 이용하여, 주요 유량 규모 및 보의 방류량별 현장에서 실무적으로 적용 가능한 간편 도달시간 산정방법을 제안하고 그 방법을 적용하여 도달시간을 산정하였다. 따

라서 본 연구결과를 바탕으로 평수기 또는 홍수기의 보 방류량에 따른 하류부의 유량의 도달시간 및 수위를 예측가능하며, 본 모형을 바탕으로 보 운영 시 엔지니어의 판단에 지표가 될 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 대상유역에 대한 지형자료 구축을 위해, 하천 측량자료인 HEC-RAS 자료와 보 상·하류부 인근의 상세지형을 측량한 자료를 이용하였고, 2차원 하천수리분석을 위해 횡방향 평균 117m, 종방향 평균 491m의 해상도로 2,304개 격자를 생성하였다.

둘째, 모형의 검증에 위해 홍수기(2014년 9월)와 평수기(2015년 3월)에 대한 조건을 적용하고 계산수위와 실측수위를 비교하였다. 비교결과, 수위의 변동양상과 값이 비교적 잘 일치하였다.

셋째, 모형의 정량적인 정확도 평가를 위해 PBIAS, RSR, RMSE를 산정하였으며, 평수기의 경우 평균적으로 0.145%, 0.097, 0.029m, 홍수기의 경우 평균적으로 0.317%, 0.017, 0.34 m로 산정되어, 세 지수 모두 높은 정확도를 보여주었다.

넷째, 검증된 2차원 모형을 이용하여 현장에서 실무적으로 적용 가능한 간편 도달시간 산정방법을 제안하였다. 제안 방법에 대한 검증을 위해, 보 구간에서 100m<sup>3</sup>/sec 일정방류 시나리오 유량조건에 대해 본 연구의 산정결과와 유량조사사업단의 실측자료와 비교한 결과 유사한 결과를 보여주었다.

다섯째, 본 연구에서 제안한 간편 홍수파 도달시간 산정방법은 특정 유량에 해당하는 도달시간을 쉽게 찾을 수 있는 방법이 고안된다면 현장 실무에서 실제 적용이 가능할 것으로 판단된다. **KAGIS**

## REFERENCES

- Ahn, K.H., Kim, S.J. and Seo, D.I. 2011. Development of the inflow temperature regression model for the thermal stratification analysis in yongdam reservoir. *Journal of Environment Impact Association* 20(4):435-442 (안기홍, 김선주, 서동일. 2011. 용담호 수온성층해석을 위한 유입수온 회기분석 모형 개발. *환경영향평가* 20(4):435-442).
- Choi, H.G., Kim, D.I., Na, C.H. and Han, K.Y. 2012. Assessment of EFDC model for water quality analysis in nakdong river. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(7):685-695 (최현구, 김동일, 나창환, 한건연. 2012. EFDC 모형의 낙동강 수질해석 적용성 평가. *한국수자원학회 논문집* 45(7):685-695).
- Franceschini, S. and Tsai, C.W. 2010. Assessment of uncertainty sources in water quality modeling in the Niagara River. *Advances in Water Resources* 33: 493-503.
- Glaser, D., Rhea, J.R., Opdyke, D.R., Russell, K.T., Ziegler, C.K., Ku, W., Zheng, L. and Mastriano, J. 2009. Model of zebra mussel growth and water quality impacts in the Seneca River, New York. *Lake and Reservoir Management* 25:49-72.
- Hur, Y.T. and Park, J.H. 2009. Assessment of EFDC model for hydrodynamic analysis in the nakdong river. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(4):309-317 (허영택, 박진혁. 2009. EFDC 모형의 낙동강 하류부 수리해석 적용성 평가. *한국수자원학회 논문집* 42(4):309-317).
- James, S.C., Shrestha, P.L. and Roberts, J.D. 2006. Modeling noncohesive sediment transport using multiple sediment size classes. *Journal of Coastal Research* 22: 1125-1132.

- Ji, J.G., Hamrick, J.H. and Pagenkopf, J. 2002. Sediment and metals modeling in shallow river. *Journal of Environmental Engineering* 128(2)105-119.
- Jia, H., Wang, S., Wei, M. and Zhang, Y. 2011. Seceario analysis of water pollution control in the typical pori-urban river using a coupled hydrodynamic-water qualith model. *Frontiers of Environmental Science&Engineering in China* 5:255-265.
- Kang, H.S., Jang, J.H., Ahn, J.H. and Kim, I.J. 2011. Numerical estimations of nakdong river flows through linking of watershed and river flow models. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(7):557-590 (강형식, 장재호, 안중호, 김익재. 2011. 유역 모형과 하천 모형의 연계를 통한 낙동강 분류 흐름 예측. 한국수자원학회 논문집 44(7):557-590).
- Liu, Z., Hashim, N.B., Kingery, W.L., Huddleston D.H. and Xia, M. 2008. Hydrodynamic modeling of St.Louis bay estuary and watershed using EFDC and HSPF. *Journal of Coastal Research* 52: 107-116.
- Luo, F. and Li, R. 2009. 3D water environment simulation for north jiangsu offshore sea based on EFDC. *Water Resource and Protection* 1:1-57.
- Mahabir, C., Hicks, F.E. and Fayek, A.R. 2003. Application of fuzzy logic to forecast seasonal runoff, *Hydrologic Processes* 17:3749-3762.
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) 2009. Basic plan for the Nakdong river development and management (Revision) 1026pp. (국토해양부. 2009. 낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서(국가하천기점~금호강합류점). 1026쪽).
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) 2009. Basic plan for the Nakdong river development and management (Revision) 983pp. (국토해양부. 2009. 낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서(금호강합류점~ 하구). 983쪽).
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport) 2013. *Korea Annual Hydrological Report*. <http://www.hrfco.go.kr/web/sumun/floodgate.do?year=2010>. (Accessed Aug 8, 2016).
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport) 2014. *Korea Annual Hydrological Report*. <http://www.hrfco.go.kr/web/sumun/floodgate.do?year=2010>. (Accessed Aug 8, 2016).
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport) 2014. Basic plan for the Nakdong river development and management (Revision) pp.3.3-3.156 (국토교통부. 2013. 낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서. 3.3-3.156쪽).
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50:885-900.
- Park, J.C., Choi, J.H., Song, Y.I., Song, S.J. and Seo, D.I. 2010. Water quality modeling of youngju dam reservoir by HSPF, EFDC and WASP. *Journal of Environment Impact Association* 19(5): 465-473 (박재충, 송영일, 서동일. 2010. HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질예측. 환경영향평가 19(5)132-473).
- Suh, S.W. and Lee, H.Y. 2011. Analysis of

- hydrodynamic change around the saemangeum area using a particle tracking method. *Journal of Korea Society of Coastal and Ocean Engineers* 23(6):422-450.
- Wu, G. and Xu, Z., 2010. Prediction of algal blooming using EFDC model:Case study in the Daoxiang Lake. *Ecological Modeling* 222:1245-1252.
- Xia, M., Craig, P.M., Wallen, C.M., Stoddard, A., Jan M.P., Peng, M., Schaeffer, B. and Liu, Z. 2011. Numerical simulation of salinity and dissolved oxygen at perdido bay and adjacent coastal ocean. *Journal of Coastal Research* 27:73-86. 