

## EFDC 모형의 낙동강 수질해석 적용성 평가 Assessment of EFDC Model for Water Quality Analysis in Nakdong River

최현구\* / 김동일\*\* / 나창환\*\*\* / 한건연\*\*\*\*

Choi, Hyun Gu / Kim, Dong Il / Na, Chang Hwan / Han, Kun Yeun

### Abstract

EFDC model, which is capable of handling both hydrodynamic and water quality analysis has come to use for many recent studies. In order to assess the applicability of the EFDC model, it was applied to Nakdong river. Hydrodynamic and water quality analysis were carried out for Nakbon GH and HI sections chosen as the area of study with gaged data from 2008 to 2009. The comparison was made between water quality simulation results and observed data over water temperature, COD, TOC, DO, TN and TP. On the contrary, a conversion formula was derived to calculate BOD which the EFDC model cannot directly calculates and it was compared to measured data. In this study, it was determined that the EFDC model well represents the behavior of both hydrodynamics and water quality. However, further research on COD, TOC and accurate conversion of BOD needs to be conducted for efficient application to domestic water quality analysis.

**Keywords** : EFDC, river water quality modeling, application analysis

### 요 지

최근 많은 연구에서 수리해석과 수질해석을 다루고 있는 EFDC 모형을 낙동강에 적용하여 수질해석의 적용성을 평가하고자 하였다. 낙동강 중하류에 해당하는 낙본 GH 구간과 HI 구간을 대상으로 2008년과 2009년의 수리해석과 수질해석을 수행하였다. 수질해석의 결과는 수온, COD, TOC, DO, TN, TP에 대해 실측자료와 비교하였으며, BOD의 경우 EFDC 모형에서 직접적으로 계산되지 않아 COD와 BOD의 환산식을 유도하여 환산된 BOD를 실측자료와 비교하였다. 금번 연구 결과를 실측자료와 비교하였을 때 EFDC 모형이 하천수리해석 뿐만 아니라 수질해석에서도 높은 재현성을 가지고 있는 것으로 판단되나 향후 국내 수질해석에 활용성을 높이기 위해서는 COD나 TOC와 관련된 BOD의 정확한 환산에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

**핵심용어** : EFDC, 하천 수질해석, 적용성 검토

\* 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 박사과정수료 (e-mail: honorguard99@msn.com)

Ph.D. Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

\*\* 교신저자, 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 박사과정수료 (e-mail: kdi5422@naver.com)

Corresponding Author, Ph.D. Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

\*\*\* 한국전력기술 설계정보기술그룹 (e-mail: nch0728@kepc0-enc.com)

Engineer, Engineering IT Department, KEPCO Engineering&Construction Company, Inc, Yongin 446-713, Korea

\*\*\*\* 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수 (e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

## 1. 서론

수학적 모델을 이용한 수질모의 기술은 지난 몇 십년간 컴퓨터의 발달과 함께 괄목할만한 성장을 하였고 그 목적에 따라 세분화 과정을 거쳤다. 이에 최근 수질모델링은 새로운 수치모델을 개발하는 것보다 잘 구성된 수질모델을 사용목적에 따라 정교하게 활용하는 것이 수질모델링의 관건이 되고 있다. 수질모델링을 크게 유역 수질모델링과 하천/저수지 수질모델링으로 구분할 수 있으며, 유역 수질모델링에는 SWAT 모형과 HSPF 모형의 활용이 주를 이루고, 하천 수질모델링은 QUAL 계열의 모형과 CE-QUAL-RIV1 모형, MIKE 계열의 모형들이 주로 사용되며, 저수지 수질모델링에서는 WASP 모형, EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 모형, CE-QUAL-W2 모형 등의 활용이 주를 이루고 있다.

EFDC 모형은 무료로 사용가능한 WEB 버전과 유료로 사용하는 Full 버전으로 나뉘지며, WEB 버전의 경우 3차원 수리해석은 가능하나 수질해석의 기능을 사용할 수 없다. 이런 이유로 국내 연구에서 EFDC 모형의 활용은 WASP 모형과 연계하여 저수지 수리해석에 주로 이용되었으며, 하천의 수리해석에서도 많이 활용되었다. 이에 본 연구에서는 EFDC 모형의 Full 버전을 이용하여 하천 수질모델링을 수행하고 그 적용성을 검토하고자 한다.

국외에서 최근 EFDC 모형을 활용한 연구는 활발하게 진행되고 있으며, 연구목적에 따라 수리, 수질, 유사 등에 적용하고, 연구대상지 또한 하천, 저수지, 하구연 등으로 다양한 분야에서 진행되고 있다. U.S. EPA (2006)에서는 TMDL에 EFDC 모형을 적용하여 하천과 하구연의 수리 및 수질계산을 수행하였으며, Liu et al. (2008)은 St. Louis 하구연과 유역에서 EFDC 모형을 이용하여 수리해석 및 수온, 염분을 예측하여 HSPF 모형과 접목시켰다. Luo and Li(2009)는 North Jiangsu 연안에서 조위 분석과 COD에 관한 연구를 수행하였고, Xia et al. (2011)은 Perdido 만에 염분과 DO의 분석을 수행하였다. Jia et al. (2011)은 Nansha 강 유역에서 WASP 모형과 연계한 수질예측에서 수리해석 부분에 활용하였으며, Franceschini and Tsai (2010)은 Niagara 강의 수질 불확실도를 분석하기 위하여 EFDC 모형을 수리해석 부분에 적용하였다. Glaser et al. (2009)는 Seneca 강의 수질해석을 위하여 EFDC 모형으로 수리해석과 수온, 염분의 분석을 수행하였고, Wu and Xu (2011)은 Daoxiang 저수지에서 조류번식에 관한 예측에 활용하였다. James et al. (2006)은 EFDC 모형을 이용하여 유사이송을 연구하였으며, Ji et al. (2002)는 Black-

stone 강에서 유사와 중금속의 거동에 대해 분석하였다.

국내에서는 허영택과 박진혁(2009)은 낙동강 하류부와 외해에서 수리해석에 적용하였으며, 강형식 등(2011)은 유역모형인 SWAT 모형과 결합하여 낙동강 본류의 수리해석에 적용하는 연구를 수행하였다. 정상만 등(2010)은 금강하류부에서 염수의 거동특성을 연구하였고, 박경 등(2005)은 광양만에서 조위와 TOC, TN, TP의 수질 분석을 실시하였다. 정효준 등(2009)은 EFDC 모형을 이용하여 팔당호에서의 수리계산과 방사선 물질의 거동을 예측하였으며, 서승원과 이화영(2008)은 새만금호 완공에 따른 DO와 COD의 변화양상을 3차원으로 해석하였고, 김선주 등(2011)은 용담호를 대상유역으로 수리해석과 수온성층에 관한 연구를 수행하였다. WASP 모형과 연계하여 저수지 수질예측에서 수리계산을 수행한 연구가 가장 활발히 수행되었으며 박재충 등(2010), 안기홍 등(2010), 김영도 등(2011)에 의해 수행되었다.

이에 본 연구에서는 EFDC 모형의 수질해석의 재현성을 평가하기 위하여 낙동강 중하류에 해당하는 낙본 GH 구간과 HI 구간을 대상유역으로 선정하였으며, 국립환경과학원의 8일 간격 실측자료를 이용하여 모형을 검·보정하였다. 각 대상구간을 2008년 실측자료를 이용하여 매개변수의 보정을 수행하였으며, 2009년의 실측자료를 이용하여 검증하였다. 수리해석의 결과를 확인하기 위하여 유량을 실측자료와 비교하였으며, 수질인자는 수온, COD, TOC, DO, TN, TP에 대해 모의하였으며, 모형에서 직접 계산되지 않는 BOD는 COD와 환산을 통해 간접적인 방법으로 산정하여 실측자료와 비교하였다. EFDC 모형의 하천에서의 수질해석 적용성을 평가하기 위하여 모의 결과와 실측자료를 이용하여 통계분석을 수행하여 수리·수질해석의 재현성을 평가하였다.

## 2. EFDC 모형

### 2.1 모형의 개요

EFDC 모형은 초기에 Virginia Institute of Marine Science에서 개발되었으며, 현재는 USEPA와 Tetra Tech, Inc.에 의해 개발 관리되고 있는 3차원 수리동역학모형이다. EFDC 모형의 물리학과 수치계산적측면은 Blumberg-Mellor 모형과 미공병단의 Chesapeake Bay 모형과 유사하다. EFDC 모형은 가변 밀도 흐름에 대해 수직적으로 정수압 가정을 하며, 자유표면, 그리고 난류 평균의 3차원 운동 방정식의 해를 구한다. 운동방정식에 동력학적으로 연결된 난류 운동에너지, 난류 길이스케일, 염도, 그리고

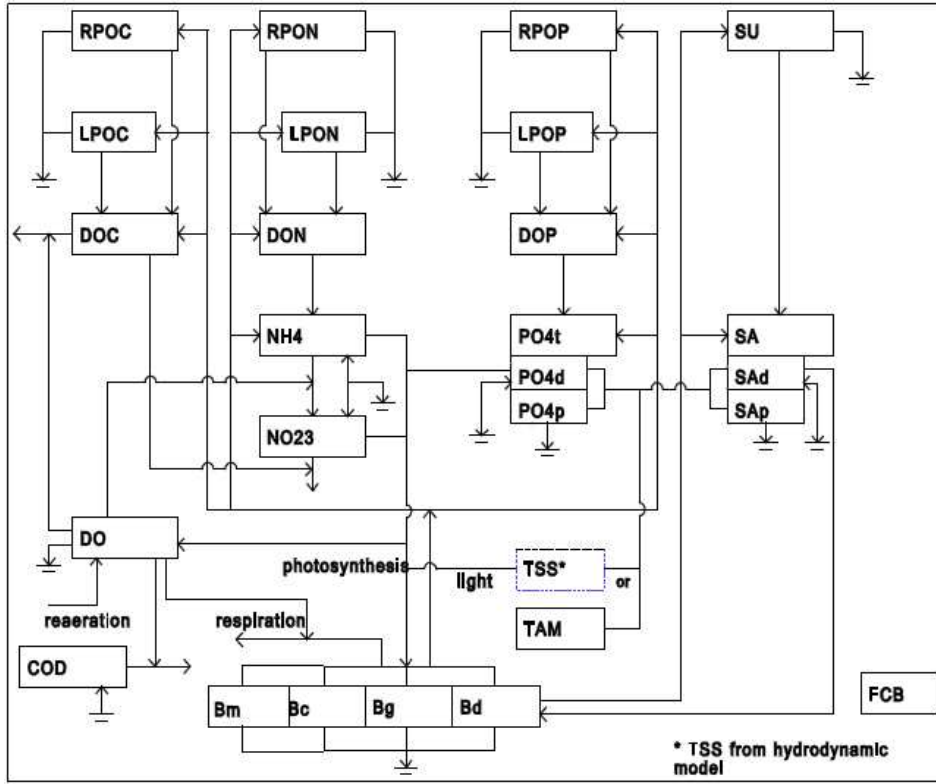


Fig. 1. Schematic Diagram of EFDC Water Quality Model Structure

온도 이송 방정식 또한 함께 풀어진다. 또한 부유물질 또는 용존물질에 대한 Eulerian 이송 전환방정식도 동시에 해를 구한다. 이송 방정식의 이송항에 대해서는 중앙차분법을 사용하거나 positive definite upwind difference 방법을 사용한다. EFDC 모형은 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유물질의 이동, 오염원유입에 의한 회석, 부영양화 기작, 독성 오염물질의 이동/반응 등에 대한 모의가 가능하다. 특히 EFDC 유동 해석은 댐 또는 암거 등의 치수 구조물 해석뿐만 아니라 수심이 얇은 수체에 대한 젖음/마름현상을 모의할 수 있어 인공습지 등에서의 수체거동을 가능케 한다. 또한 유동 및 확산 등의 물리적인 이동기작에 대한 정보는 비반응성 또는 반응성 수질변수들의 모의를 위해 사용될 수 있다(김선주 등, 2011). 수질모형은 3개의 조류 그룹과 탄소, 질소, 인 성분, 규소의 순환, 용존산소 역학, 분변성대장균군과 같이 21개의 수질변수를 모의할 수 있으며, Fig. 1에 각 인자간의 반응기작을 나타내었다.

## 2.2 모형의 기본방정식

EFDC 모형의 3차원 연속방정식과 운동방정식, 정역학 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

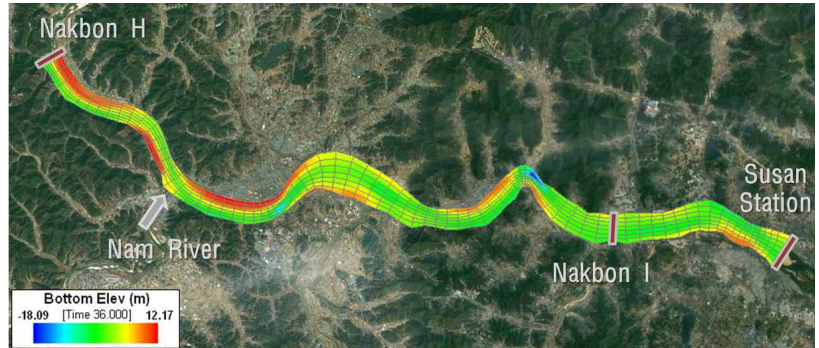
$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H \int_0^1 u dz)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H \int_0^1 v dz)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvu)}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} \\ & - \left( mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hv = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial x} - \\ & m_y \left( \frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( m \frac{1}{H} Av \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvu)}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} \\ & + \left( mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu = -m_x H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial y} - \\ & m_x \left( \frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( m \frac{1}{H} Av \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (4)$$



(a) Nakbon GH



(b) Nakbon HI

Fig. 2. Study Area and Grid

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -gHb \quad (5)$$

여기서,  $u$ ,  $v$ 는  $x$ ,  $y$ 방향에서 수평속도성분(m/sec)이고,  $w$ 는 변환된 무차원 연직좌표계  $z$ 에서의 연직유속성분(m/sec)이다.  $h$ 는 기준면하 수심(m)이고,  $\zeta$ 는 기준면에서의 수면변위(m)이며,  $H$ 는 전체수심으로  $h + \zeta$ 의 값이다.  $m_x$ ,  $m_y$ 는 곡선좌표계 임의거리  $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 Metric Tensor의 대각성분의 제곱근이다.  $Q_u$ ,  $Q_v$ 는 Momentum Source-Sink 항(kg·m/sec)이고,  $p$ 는 압력(Pa)을 나타내며,  $f$ 는 Coriolis parameter,  $A_v$ 는 수직난류점성계수이다.  $\rho$ 는 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $b$ 는 부력(m/sec<sup>2</sup>),  $g$ 는 중력가속도(m/sec<sup>2</sup>)이다.

수질해석에 사용되는 기본방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y H C) + \frac{\partial}{\partial x} (m_y H u C) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H v C) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w C) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m_y H A_x}{m_x} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m_x H A_y}{m_y} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( m_x m_y \frac{A_z}{H} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + m_x m_y H S_c \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $C$ 는 각 수질인자의 농도를 나타내며,  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ 는  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 방향에서의 난류확산계수이며,  $S_c$ 는 단위체적당 Source-Sink 항이다.

### 3. 지형자료 구축 및 입력자료 구성

#### 3.1 대상유역

본 연구의 대상구역은 국립환경과학원의 8일 간격 유량·수질 실측자료를 사용할 수 있는 낙동강 본류의 낙본 GH 구간과 낙본 HI 구간을 선정하였다. 낙본 GH 구간에서 낙동강의 유로연장은 약 27 km이며, 유역면적은 512.44 km<sup>2</sup>이며 주요지류로는 낙본 G에서 1.3 km 하류에 회천이 합류하며 회천 합류 후 황강이 유입된다. 낙본 HI 구간에서는 하류단 경계조건을 수산 수위관측소의 수위자료를 사용하기 위하여 낙본 I에서 연장을 하였다. 대상구간에서 유로연장은 약 37 km이며 주요지류로는 남강이 유입된다.

#### 3.2 지형자료 구축

실제상황을 잘 반영하여 모의를 수행하기 위해서는 실제지형을 잘 반영하는 격자를 구축하여 모의를 수행하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 그러나 대부분의 수치해석 모형에서 격자가 정방형에 가까울수록 안정적인 모의를 수행한다. 따라서 불규칙 간격으로 2차원 상에 도시된 단면자료를 직접 이용하기보다는 적절한 형태의 직교곡선격자를 구성할 수 있도록 수정이 필요하다. 또한 본 연구에서는 하천과 체내지를 포함하여 EFDC 모형의 wet/dry 기능을 이용하여 모의를 수행하고자 하므로 불규칙 간격으로 2차원 상에 도출된 단면자료를 통하여 모의대상 하천구간에 대해서 직교곡선격자를 구성하였다. 연구기간동안 제방을 범람하는 큰 홍수가 없었으므로 하

천과 제내지를 포함하는 제방까지 격자를 구성하였으며, 낙본 GH 구간은 횡단방향으로 6개로 분할하여 총 438개의 격자로 구성하였고, 낙본 HI 구간은 하폭이 넓어지는 것을 고려하여 횡단방향으로 7개로 분할하여 595개의 격자로 Fig. 2와 같이 구성하였다. 대상 격자의 Orthogonality Deviation은 -6.67~7.851의 범위이며, 대부분의 격자는 0에 가까운 정방형의 격자로 구성하였다.

### 3.3 연구대상 기간 및 입력자료의 구성

연구대상기간은 2008년과 2009년을 각각 보정과 검증의 대상기간으로 설정하였다. 입력자료로 국립환경과학원의 8일 간격 유량·수질 실측자료를 사용하였기 때문에 결빙으로 인한 실측자료의 부재로 모의 시작과 끝이 1월 중순과 12월 중순으로 설정하였다. EFDC 모형에 8일 간격 실측자료를 실측날짜와 함께 입력을 하면 모형내에서 자동적으로 선형보간이 되므로 각각의 실측날짜와 농도 자료만 입력하였다.

기상자료는 aser.inp에 해당기간의 기상청 자료를 입력하였으며, 유량 경계조건인 qser.inp에 각각 대상구간에 낙본 G와 낙본 H의 8일 간격 실측 유량과 각 구간의 지류(회천, 황강, 남강)의 8일 실측자료를 입력하였고, 하류단 경계조건인 pser.inp에는 각각 낙본 H의 8일 실측 수위자료, 수산수위관측소의 일수위자료를 입력하였다. 수온조건인 tser.inp에는 각각의 수온자료를 입력하였고, 수질(농도)경계조건인 cwqsr01.inp~cwqsr21.inp에는 상류단의 수질농도 실측치와 지류의 실측자료를 함께 입력하였다.

## 4. 모형의 적용

EFDC 모형을 이용하여 각 대상구간별로 보정과 검증을 수행하였다. 2008년 실측자료를 이용하여 각 매개변수들을 보정하고, 보정된 매개변수들과 2009년 실측자료를 이용하여 검증을 실시하였다. 수질모형에서 BOD는 직접 산정되지 않아 각 구간과 기간 별로 COD와의 선형회귀를 통하여 상관식을 구하고 실측자료와 비교하였다. 모의에서 산정된 유량과 수온, COD, TOC, DO, TN, TP은 실측자료와 비교하여 CC (Correlation Coefficient), NSEC

(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient), RMSE (Root Mean Square Error)를 산정하여 모형의 적용성을 평가하였다. 사용된 통계지표를 간단히 설명하면 다음과 같다.

CC는 2개의 변수 사이에 상관관계의 여부를 수치적으로 판단하는 지표로 이용되며, 통상  $r$ 이라는 기호로 표시하며, -1.0에서 1.0까지의 값을 가지고 두 데이터 집합 사이의 상관성을 나타낸다. 상관계수를 어떻게 해석할 것인지에 대한 절대적 기준은 없으나 대체로 0.8~1.0의 범위는 '상관이 매우 높다', 0.6~0.8의 범위를 나타내면 '상관이 높다', 0.4~0.6의 범위를 나타내면 '상관이 있다'라고 표현한다.

NSEC와 RMSE의 산출식은 Eqs. (7) and (8)과 같다.

$$NSEC = \frac{ST - SSE}{ST} \quad (7)$$

$$ST = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

여기서, ST는 통편차이고,  $\bar{y}$ 는  $y$ 값 N개의 평균이다. NSEC 값은 1에서  $-\infty$  사이의 값을 가지며, 값이 0과 1 사이에 있으면 모의치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, NSEC 값이 0보다 작으면 모형의 예측결과가 나쁘거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미한다.

$$SE = \sqrt{\frac{SSE}{N}}, SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (8)$$

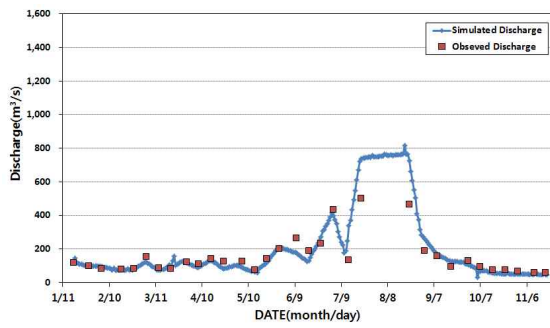
여기서, SSE는 오차제곱의 총합이고, N은 자료의 수이며,  $y_i$ 와  $\hat{y}_i$ 는 관측값과 예측값이고,  $e_i$ 는 관측값과 예측값 사이의 오차이다. 만약 실측치와 모의치가 일치하게 되면 RMSE는 0의 값을 나타내게 된다.

### 4.1 2008년 자료를 이용한 모형의 보정

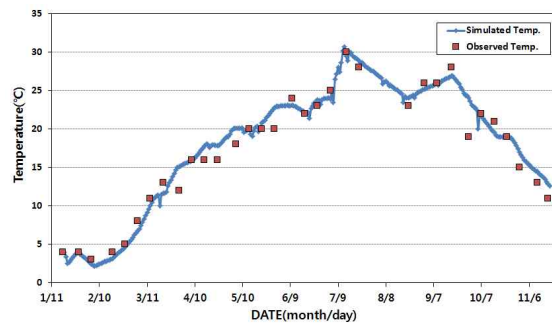
매개변수의 보정은 시행착오법(trial and error)으로 수행하였으며, 수질농도의 경우 매개변수가 다른 수질농도에도 영향을 끼쳐서 여러 번의 모의 중에서 상관도가 가장 높은 모의 결과를 선택하였다. 낙본 H와 I 지점에서 COD와 BOD의 실측자료 36개를 이용하여 회귀분석한 자료를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. BOD vs. COD Conversion Equations (2008)

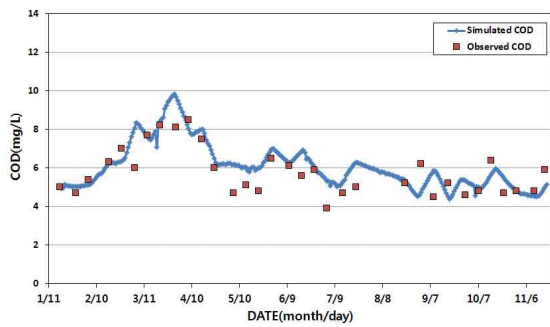
	Equation	CC
Nakbon GH	$COD = 1.1671BOD + 4.0559$	0.4184
Nakbon HI	$COD = 0.7098BOD + 4.266$	0.7929



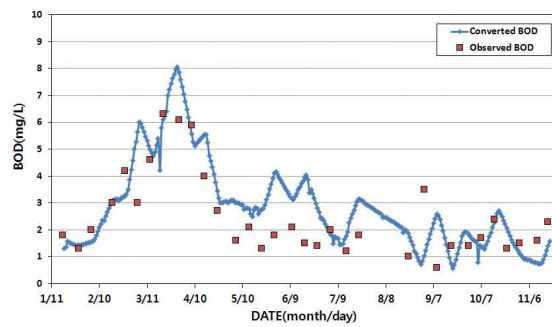
(a) Discharge



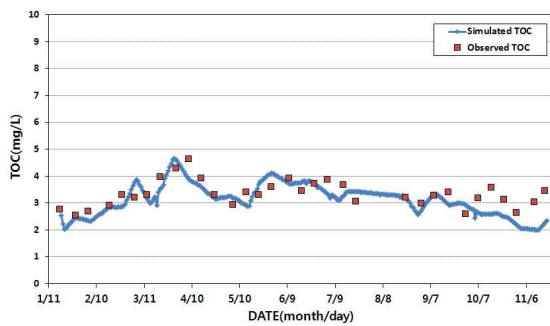
(b) Temperature



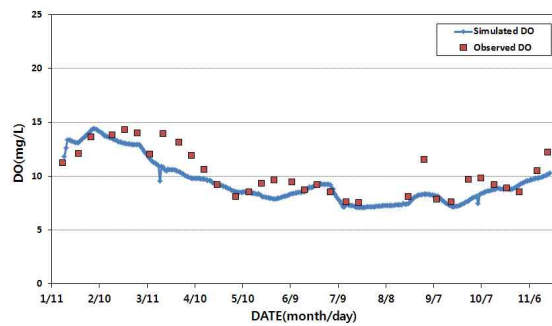
(c) COD



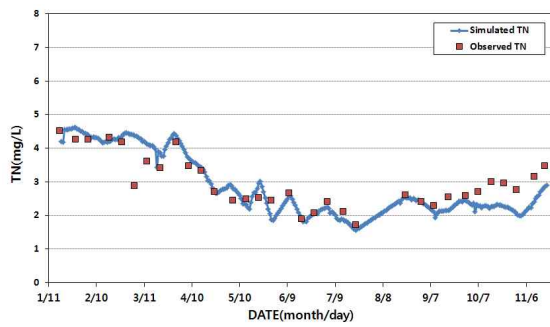
(d) Converted BOD



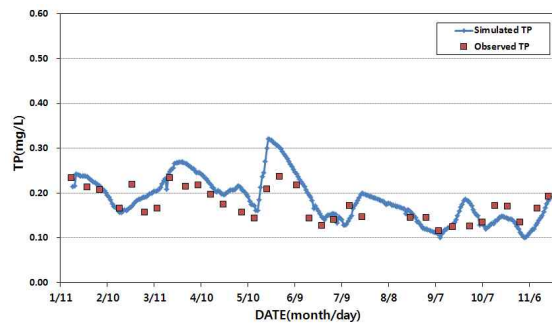
(e) TOC



(f) DO



(g) TN



(h) TP

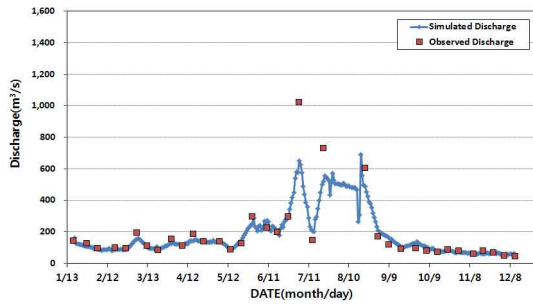
Fig. 3. Calibration Results of Nakbon H (2008)

Fig. 3은 낙본 H 지점의 모의결과와 실측자료를 비교한 그래프이고, Table 2는 각 농도별 통계지표를 나타내었다. 유량의 경우 상류단 경계조건으로 사용된 낙본 G 지점의 실측자료 중 홍수기의 결측으로 8월의 결과가 일

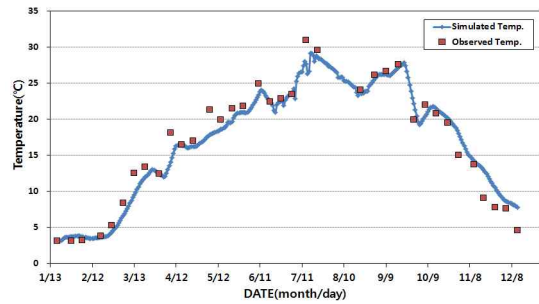
정하게 나타나지만 홍수기를 제외하고는 실측치와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 수온과 COD, TOC, TN, TP의 결과는 실측자료의 경향성을 나타내고 있는 것으로 판단된다. DO의 경우에는 실측자료보다 낮은 모의결과를

Table 2. Relative Coefficients for Calibration Results of Nakbon H (2008)

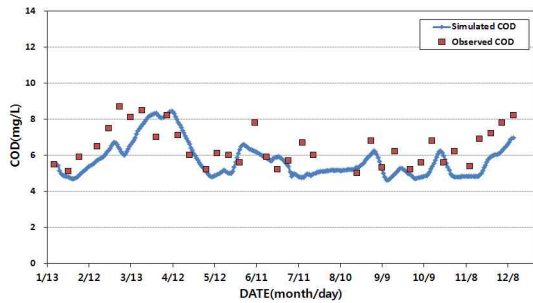
Results	Discharge	Temp.	COD	Converted BOD	TOC	DO	TN	TP
CC	0.9230	0.9803	0.7858	0.7674	0.7152	0.8670	0.8977	0.7963
NSEC	0.4985	0.9551	0.4312	0.3075	-0.0921	0.6266	0.6030	-0.0521
RMSE	77.77	1.57	0.90	1.24	0.50	1.31	0.45	0.04



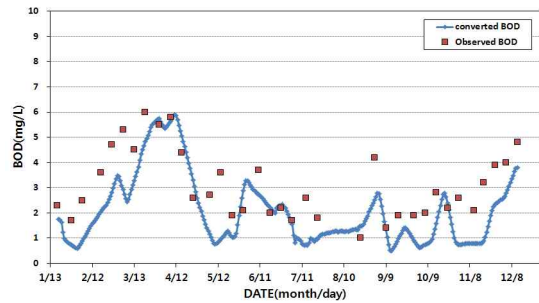
(a) Discharge



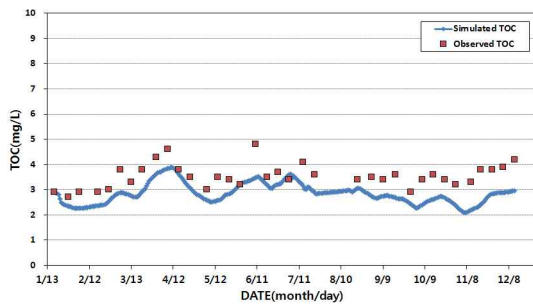
(b) Temperature



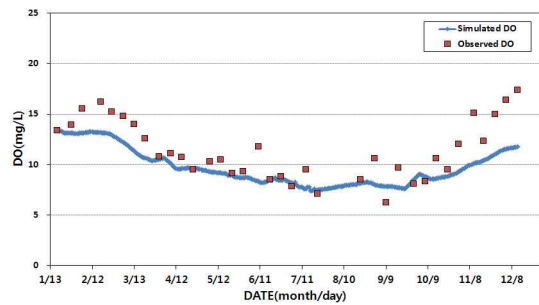
(c) COD



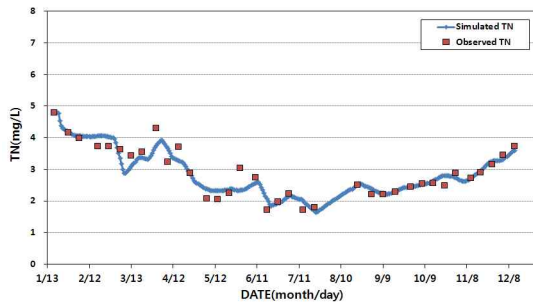
(d) Converted BOD



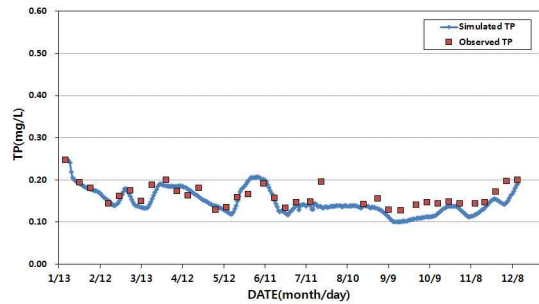
(e) TOC



(f) DO



(g) TN

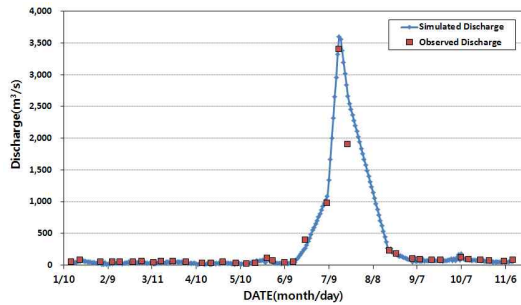


(h) TP

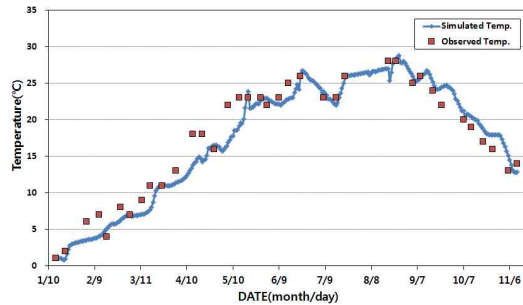
Fig. 4. Calibration Results of Nakbon I (2008)

Table 3. Relative Coefficients for Calibration Results of Nakbon I (2008)

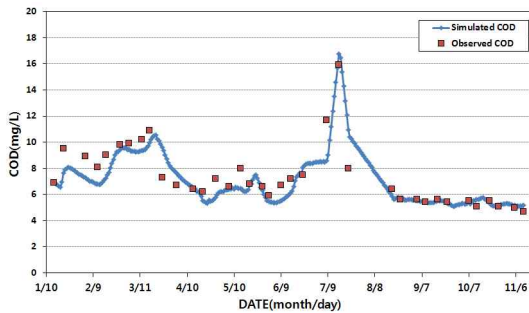
Relative Coefficients \ Results	Discharge	Temp.	COD	Converted BOD	TOC	DO	TN	TP
CC	0.9735	0.9657	0.5832	0.7652	0.6109	0.8378	0.9200	0.7428
NSEC	0.8493	0.9475	-0.0562	0.0843	-1.7883	0.3806	0.8801	0.0616
RMSE	77.93	1.82	1.10	1.29	0.77	2.30	0.25	0.02



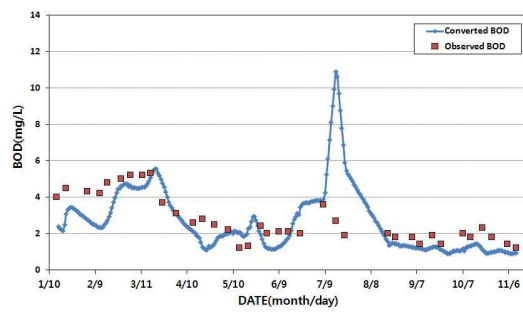
(a) Discharge



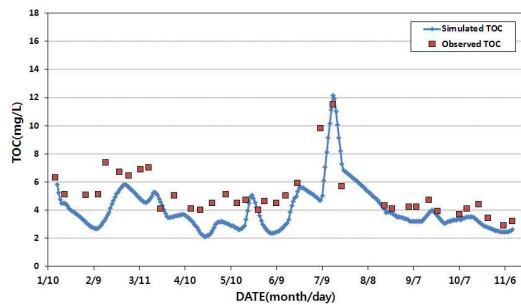
(b) Temperature



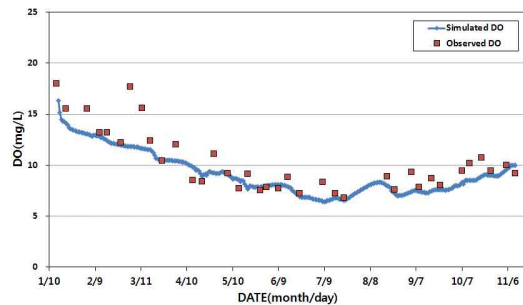
(c) COD



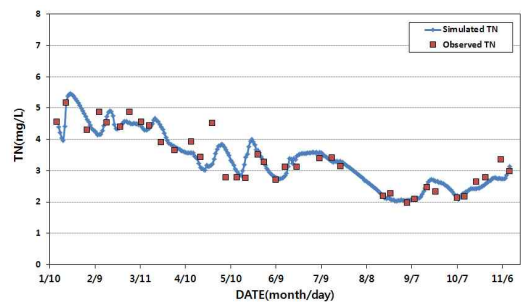
(d) Converted BOD



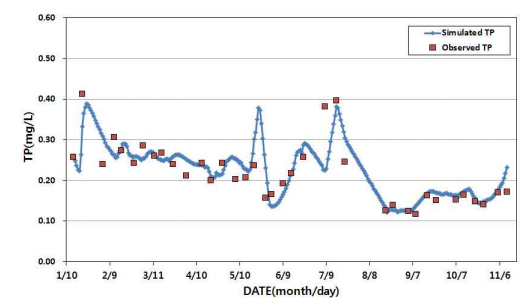
(e) TOC



(f) DO



(g) TN



(h) TP

Fig. 5. Verification Results of Nakbon H (2009)



나타내며, TP의 경우 반대로 실측자료보다 높은 모의결과를 나타내었다. COD에서 환산된 BOD는 COD의 경향성을 가지며 BOD 실측자료보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 유량과 각 농도들의 CC는 0.7152~0.9803의 범위로 상관도가 높게 나오는 것으로 판단되며, NSEC는 TOC와 TP에서 다른 농도들보다 낮은 값으로 산정되었다.

Fig. 4와 Table 3은 낙본 I 지점의 모의결과와 실측자료를 비교한 그래프와 통계지표이다. 유량 실측자료가 6월 26일과 7월 4일, 7월 14일에서 각각 297.7, 1,020.5, 145.1 cms로 큰 폭으로 변화하는데 모의결과는 침투값을 쫓아가지 못하고 650 cms로 나타나 8일 간격의 실측자료로 모의하는 것에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 수온과 TN, TP는 실측자료와 유사한 경향성을 나타내는 것으로 판단되며, COD, TOC, DO는 실측자료보다 낮은 모의결과를 나타내었다. CC는 0.5832~0.9735의 범위로 전반적으로 높은 상관도를 나타내며, NSEC는 수온과 유량, TN은 1에 가까운 값으로 모의결과가 양호하나 COD와 TOC, BOD는 다른 농도들 보다 낮은 값으로 산정되었다.

#### 4.2 2009년 자료를 이용한 모형의 검증

2008년의 실측자료를 이용하여 보정된 매개변수를 적용하고, 2009년 실측자료를 경계조건으로 사용하여 모형을 검증하였다. 낙본 H와 I 지점에서 COD와 BOD의 실측자료 각각 42와 40개를 이용하여 회귀분석한 자료를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 5는 낙본 H 지점의 모의결과와 실측자료를 비교한 그래프이고, Table 5는 각 농도별 통계지표를 나타내었다. 유량의 경우 7월 22일의 실측자료를 제외하고 침투값과 저유량이 잘 일치하는 것으로 판단되며, 수온과 COD, TN, TP의 결과는 실측자료의 경향성을 반영하는 것으로 판단된다. DO와 TOC의 경우에는 실측자료보다 낮은 모의결과를 나타내었다. 유량과 각 농도들의 CC는 BOD의 0.4282를 제외하고 0.7210~0.9900의 범위로 상관도가 높게 나오는 것으로 판단되며, NSEC는 유량과 TN, COD가 다른 성분들보다 높은 농도값을 보이며, BOD와 TOC가 다소 낮은 값으로 산정되었다. RMSE는 다른 농도와의 비교가 합리적이지 않은 것으로 판단하여 보정결과와 비교를 하였다. 수온과 TP는 보정결과와 거의 유사한 오차를 보였으며, 유량, COD, BOD, TOC, DO는 검증

Table 4. BOD vs. COD Conversion Equations (2009)

	Equation	CC
Nakbon GH	$COD = 0.7258BOD + 3.9933$	0.8187
Nakbon HI	$COD = 1.1196BOD + 3.8818$	0.5666

Table 5. Relative Coefficients for Verification Results of Nakbon H (2009)

Results Relative Coefficients	Discharge	Temp.	COD	Converted BOD	TOC	DO	TN	TP
CC	0.9900	0.9184	0.8867	0.4282	0.7984	0.7210	0.7907	0.7908
NSEC	0.9542	0.6587	0.7516	-0.9076	0.0258	0.6587	0.8203	0.6585
RMSE	134.80	1.59	1.15	1.76	1.69	1.59	0.38	0.04

Table 6. Relative Coefficients for Verification Results of Nakbon I (2009)

Results Relative Coefficients	Discharge	Temp.	COD	Converted BOD	TOC	DO	TN	TP
CC	0.9721	0.9248	0.4030	-0.1531	0.5127	0.6575	0.6345	0.5678
NSEC	0.9185	0.8885	0.0428	-1.1480	-1.9842	0.3757	0.6762	0.1456
RMSE	155.93	2.27	1.79	1.75	1.99	1.88	0.50	0.05

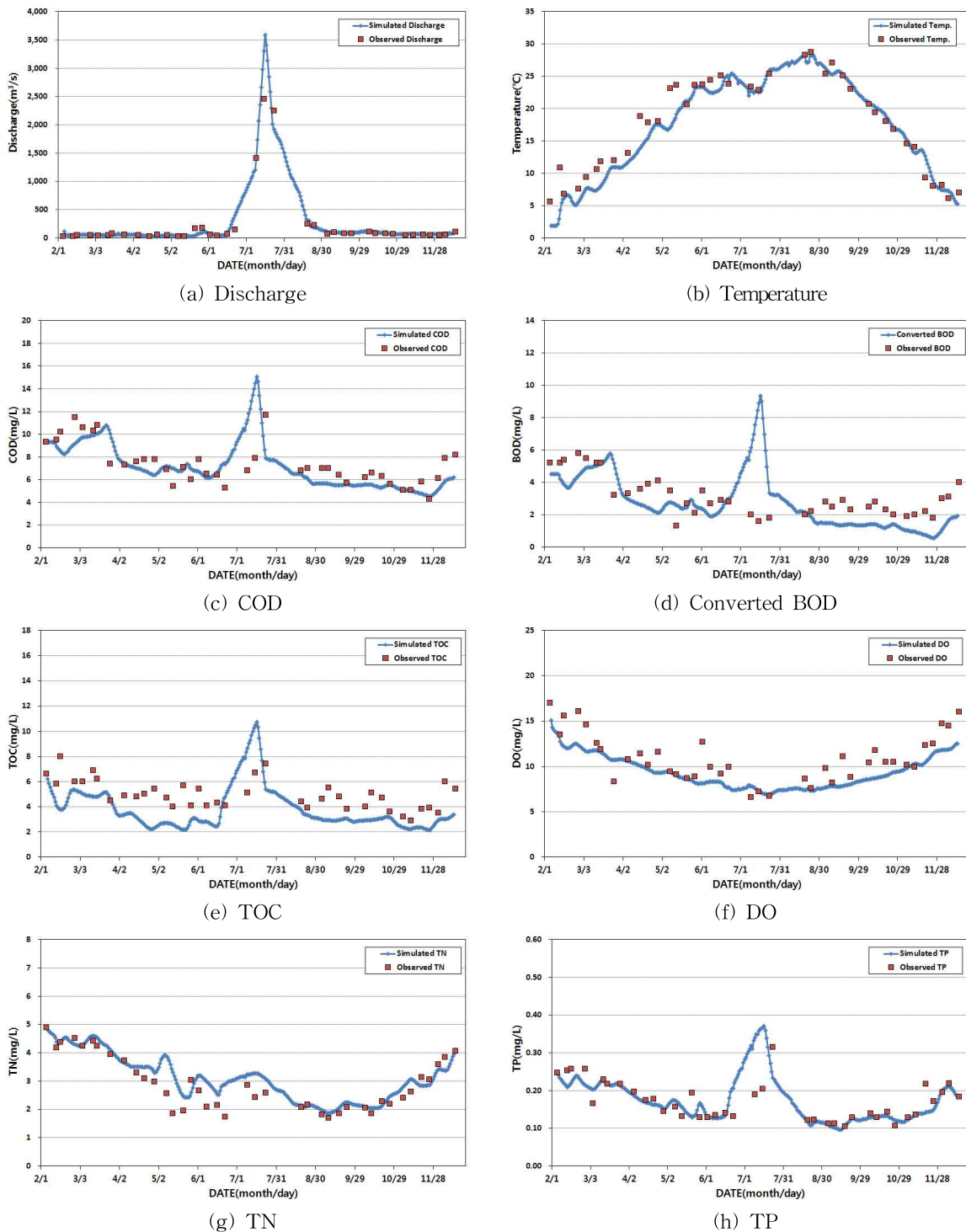


Fig. 6. Verification Results of Nakbon I (2009)

결과의 오차가 보정결과의 오차보다 크게 나타났으며, TN은 검증결과의 오차가 더 작게 나타났다.

Fig. 6과 Table 6은 낙본 I 지점의 모의결과와 실측자료를 비교한 그래프와 통계지표이다. 유량의 경우에는 전반적으로 실측값과 잘 일치하고 있으나 실측 침투값 사이

에 모의 침투값이 발생해서 상류단 경계조건과 남강의 경계조건 영향을 받은 것으로 판단된다. 수온과 TN, TP는 실측자료와 유사한 경향성을 나타내는 것으로 판단되며, COD, TOC, DO는 실측자료보다 낮은 모의결과를 나타내었다. CC는 BOD가 음의 값으로 상관성이 낮은 것으로 나

타났으며 다른 농도는 0.4030~0.9721의 범위를 나타내며, NSEC는 수온과 유량은 다른 농도에 비해 높은 값을 나타내고 COD와 TOC, BOD는 다른 농도들 보다 낮은 값으로 산정되었다. 낙본 I 지점에서 RMSE는 DO를 제외한 모든 농도들의 오차가 보정결과의 오차보다 크게 산정되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 EFDC 모형의 수질해석의 재현성을 평가하기 위하여 낙동강 중하류에 해당하는 낙본 GH 구간과 HI 구간을 대상유역으로 모형을 적용하였으며 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) EFDC 모형을 이용한 수리해석의 경우 상관도가 0.9721~0.9900의 범위로 매우 높은 상관도를 나타내며, NSEC 또한 0.4985~0.9542의 범위로 모의의 예측결과가 우수한 것으로 판단되며 재현성이 높은 것으로 사료된다.
- 2) 수질해석에서는 상관계수는 0.4030~0.9248의 범위로 전반적으로 높게 나타나고 있으며, NSEC와 같이 고려할 경우 수온과 TN이 가장 높은 재현성을 나타내었고, 수질 농도 전반적으로 실측자료의 경향을 잘 반영하는 것으로 판단되며 수질해석에서도 활용가능성이 높은 것으로 사료된다.
- 3) EFDC 모형의 수질모듈에서 직접 계산되지 않는 BOD의 경우 COD와의 회귀분석을 통해 산정하여 실측자료와 비교한 결과 상관계수가 -0.1531~0.7674의 범위로 다른 농도에 비해 낮게 나타난다.

본 연구에서 수행한 EFDC를 이용한 수리 및 수질 모델링의 모의의 예측결과는 우수한 것으로 판단되나, BOD의 경우 다른 인자들의 모의결과에 비해 다소 낮게 나타나고 있는데, 이는 COD나 TOC와 관련된 BOD의 환산에 대한 연구의 부족으로 인한 결과로 보이며, 향후 보다 향상된 기법을 이용한다면 이러한 문제는 개선될 것으로 판단된다.

검증을 위한 실측치로 8일 간격 실측치를 이용하였는데 이 자료의 경우 8일 간격이므로 실제로 결측치가 많이 발생을 하고, 또한 유량이 많이 발생하는 홍수기시에는 관측을 하지 않는 문제가 있어 실제로 자료의 변동이 큰 경우에는 모의 결과가 실측치의 경향을 잘 쫓아가지 못하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 모의결과 신뢰도 향상을 위해 일간격의 실측치를 확보하거나 또는 결측치를 보완할 수 있는 기법에 대한 선행 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년 BK21 사업에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 강형식, 장재호, 안종호, 김액재 (2011). “유역 모형과 하천 모형의 연계를 통한 낙동강 본류 흐름 예측.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제7호, pp. 577-590.
- 김선주, 서동일, 안기홍 (2011). “저수지 수온성층 해석능력 제고를 위한 적정 EFDC 매개변수 선정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제9호, pp. 741-751.
- 김영도, 강부식, 홍일표, 노희진 (2011). “도암댐 수질관리를 위한 통합탁수관리시스템 구축.” **한국하천협회지**, 한국하천협회, 제7권, 제1호, pp. 85-91.
- 박재충, 최재훈, 송영일, 송상진, 서동일 (2010). “HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질 예측.” **한국환경영향평가학회논문집**, 한국환경영향평가학회, 제19권, 제5호, pp. 465-473.
- 서승원, 이화영 (2008). “새만금호 완공에 따른 수질변화 모의.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제 1B호, pp. 79-93.
- 안기홍, 이규탁, 반양진, 손병용 (2010). “국내 댐 저수지에 대한 3차원 수리·수질 예측 모델의 적용성 평가.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제43권, 제2호, pp. 51-57.
- 허영택, 박진혁 (2009). “EFDC 모형의 낙동강 하류부 수리 해석 적용성 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제4호, pp. 309-317.
- Glaser, D., Rhea, J.R., Opdyke, D.R., Russell, K.T., Ziegler, C.K., Ku, W., Zheng, L., and Mastriano, J.J. (2009). “Model of zebra mussel growth and water quality impacts in the Seneca River, New York.” *Lake and Reservoir Management*, Vol. 25, No. 1, pp. 49-72.
- Franceschini, S., and Tsai, C.W. (2010). “Assessment of uncertainty sources in water quality modeling in the Niagara River.” *Advances in Water Resources*, Vol. 33, No. 4, pp. 493-503.
- James, S.C., Shrestha, P.L., and Roberts, J.D. (2006). “Modeling Noncohesive Sediment Transport Using Multiple Sediment Size Classes.” *Journal of Coastal Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 1125-1132.

- Jeong, H.J., Hwang, W.T., Kim, E.H., and Han, M.H. (2009). "Radiological risk assessment for an urban area: Focusing on a drinking water contamination." *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 36, pp. 1313-1318.
- Jeong, S.M., Yeon, K.S., Hur, Y.T., and Oh, K.R. (2010). "Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River." *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 22, No. 6, pp. 934-939.
- Ji, Z.G., Hamrick, J.H., and Pagenkopf, J. (2002). "Sediment and metals modeling in shallow river." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 128, No. 2, pp. 105-119.
- Jia, H., Wang, S., Wei, M., and Zhang, Y. (2011). "Scenario analysis of water pollution control in the typical peri-urban river using a coupled hydrodynamic-water quality model." *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, Vol. 5, No. 2, pp. 255-265.
- 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*, Vol. 52, pp. 107-116.
- Luo, F., and Li, R. (2009). "3D Water Environment Simulation for North Jiangsu Offshore Sea Based on EFDC." *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 1, pp. 41-47.
- Park, K., Jung, H.S., Kim, H.S., and Ahn, S.M. (2005). "Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea." *Marine Environmental Research*, Vol. 60, No. 2, pp. 171-193.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). Updated Model Report for Christina River Basin, Pennsylvania-Delaware-Maryland Bacteria and Sediment TMDL Development.
- Wu, G., and Xu, Z. (2011). "Prediction of algal blooming using EFDC model: Case study in the Daoxiang Lake." *Ecological Modelling*, Vol. 222, pp. 1245-1252.
- Xia, M., Craig, P.M., Wallen, C.M. Stoddard, A., Poulsen, J.M., 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*, Vol. 27, No. 1, pp. 73-86.

논문번호: 12-006	접수: 2012.01.20
수정일자: 2012.05.01	심사완료: 2012.05.01