유역 모형과 하천 모형의 연계를 통한 낙동강 본류 흐름 예측

Numerical Estimations of Nakdong River Flows Through Linking of Watershed and River Flow Models

강 형 식* / 장 재 호** / 안 종 호*** / 김 익 제****

Kang, Hyeongsik / Jang, Jae Ho / Ahn, Jong Ho / Kim, Ik-Jae

Abstract

In this study, the watershed and water body models were linked for the simulation of the Nakdong river flow. This is a pre-step study for the estimation of the effect of the flow and water quality on the climate change. For models of watershed and river flow, the SWAT and EFDC were used, respectively. The runoff discharge at each boundary points for the simulation of the river flow was provided from the drainage basin model. The calculated runoff discharge by the SWAT model was compared with the measured data of the Ministry of Environment at 13 locations along the Nakdong river and 30 locations along the tributary streams. The computed water discharge was shown to be similar with the measured data. For the model calibration and verification, % difference, NSE, and R^2 were computed. The computed % difference was within 15% except of a few points. The NSE and R^2 were also within a fair level. The Nakdong river flow of 2007 was simulated by using the EFDC model. The comparison with the measured data showed that the model reflected the actual values of low and high flow well. Also, it was confirmed that the acceleration and deceleration in the curved areas were appropriately simulated. The movement of dye injected at the upstream boundary was simulated. The result showed that the arrival time up to the estuary dam was computed to be about 65 days.

Keywords : SWAT model, EFDC model, Nakdong river, Runoff discharge, Dye concentration

요 지

본 연구에서는 낙동강 유역을 대상으로 유역-하천 흐름 연계 모형을 구축하였다. 본 연구는 기후변화에 따른 하천 흐름 및 수질 영향 분석을 위한 전단계의 연구이다. 낙동강 유역을 대상으로 유역 수문 모형인 SWAT 모형을 구축하고 낙동강 본류 EFDC 모형에 유량 경계자료를 제공하여 본류 흐름을 예측하였다. 유역 모의를 통해 계산된 유출량을 본류 13개, 지류 30개 지점에서 2004년부터 2009년까지의 환경부 8일 자료를 이용하여 검토하였다. 모형의 적용성을 평가하기 위하여 % difference, NSE, R^2 를 산정하였으며, % difference는 몇몇 지점을 제외하고는 대부분 15% 이내인 것으로 나타났고, NSE와 R^2 역시 대부분 적정 수준인 것으로 모의 되었다. 한편, SWAT 모형으로부터 본류의 상류 및 지류 경계의 유출량 값을 제공받아 EFDC모형에 입력하였고 낙동강 본류에서의 2007년도 흐름을 예측하였다. 계산된 결과를 낙동

* 교신저자, 한국환경정책·평가연구원, 물순환연구실 부연구위원 (e-mail: hskang@kei.re.kr)

Corresponding Author, Research Fellow, Div. of Water and Environment, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea. Tel: 82-2-380-7601

** 한국환경정책·평가연구원, 물순환연구실 초빙박사연구원

Post-Doctoral Researcher, Div. of Water and Environment, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

*** 한국환경정책·평가연구원, 물순환연구실 부연구위원

Research Fellow, Div. of Water and Environment, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

**** 한국환경정책·평가연구원, 물순환연구실 부연구위원

Research Fellow, Div. of Water and Environment, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

강 본류의 각 수위 관측소에서의 측정 데이터와 비교한 결과, 본 모형이 저수기 및 홍수기시 모두 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한 만곡부 및 하중도 부근에서의 유속 증가와 감소 현상 등을 잘 모의하는 것으로 확인되었다. 한편, 상류 경계로부터 1월1일 유입된 염료의 이동현상을 모의한 결과 하구언까지 도달하는데 약 65일이 소요되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : SWAT 모형, EFDC 모형, 낙동강, 유출량, 염료농도

1. 서론

금세기의 화두는 기후변화에 의한 영향, 특히 하천의 관점에서 보면 기후변화가 하천환경에 미치는 영향에 대한 분석이 중요한 연구 주제 중 하나이다. 이러한 영향 분석을 위해서는 먼저 목적별로 정확한 모형 구축이 우선되어야 한다. 먼저, 대규모 유역에서의 하천흐름 해석을 위해서는 하류단 수위 경계 뿐만 아니라 상류 경계 지점 및 각 지류 경계에서 유입되는 유량 데이터가 필요하다. 그러나 대부분이 치수목적으로 본류 중심의 수문관측이 이루어졌기 때문에 소유역 및 지류에서의 정확한 유출량을 산정하는 것은 어렵다. 이를 위해서는 경험식에 의한 방법과 비유량법, 유역내 유출모형을 이용하는 방법 등을 고려할 수 있을 것이다. 그러나 경험식에 의한 것과 비유량법에 의한 유출량 산정은 단순하고, 계산하기 쉽다는 장점이 있지만, 단순히 유역 크기에 의해 유출량을 산정하는 것으로서 강우의 분포 특성을 적절히 반영하지 못한다. 따라서 대규모 유역에서의 각 소유역별 유출량 해석을 위해서는 유역단위 유출모형에 의한 평가가 필요할 것이다.

국내에서 유출모형으로 광범위하게 사용되는 것 중의 하나가 SWAT 모형 (Neitsch et al., 2004)이다. SWAT 모형은 미농림부에서 개발한 유역기반의 장기유출모형으로서 토양수분을 중심으로 다양한 토지이용에 대하여 적용되어 왔으며, 국내에서도 유출해석을 위해 광범위하게 적용되고 있다 (김남원 등, 2008; 김대근 등, 2007; 김정곤 등, 2006; 손태석 등, 2010; 정상만 등, 2008; 신현석 등, 2007). 먼저, 김남원 등 (2008)은 충주댐 유역을 대상으로 유출곡선지수를 산정하는 방안을 검토하였으며, 김대근 등 (2007)은 SWAT의 적설 및 용설기작을 이용하여 강원도 쌍천 유역을 대상으로 적설 및 용설의 영향을 분석한 결과, 적설 및 용설의 영향을 고려할 경우 하천의 유황이 다소 증가하였고 실측유량과 유사한 경향을 나타내었다. 또한 정상만 등 (2008)은 기후인자 변화에 따른 대청댐 유역의 유출민감도에 대한 평가를 연구하였고, 김정곤 등 (2006)은 본 모형을 갑천유역에 적용하여 유출량을 산정하였다. 한편, 본 연구의 대상유역인 낙동강 유역에 대한

연구사례로는 신현석 등 (2007)이 유역내 댐방류 및 인위적인 물이용 요소를 고려한 물수지 시나리오에 따른 하천 유량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한, 낙동강 유역에서의 기후변화에 대한 영향 분석으로는 김문성 등 (2009)이 캐나다에서 개발된 CGCM 3.1 T63의 A2 기후변화 시나리오를 대상으로 한 미래기후정보를 MSPG에 의해 지역 상세화시킨 기후자료로 변환한 후 수정 TANK 강우-유출모형에 적용시켜 기후변화가 낙동강 본류 유량에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 손태석 등 (2010)은 낙동강 유역을 대상으로 기후변화로 인한 하천 유량의 영향을 분석한 결과, 하천 및 호소의 수온상승과 유출량 증대가 예상되며 이에 따른 수리 구조물의 치수능력 증대 방안에 대한 필요성을 제시한 바 있다. 한편, 유역 모형과 하천 및 호소 모형을 결합하여 흐름과 수질을 예측한 연구로는 정제호 (2010), 박재충 등 (2010), 정광욱 (2007) 등의 연구가 있다. 이들 연구는 대부분 댐유역에서의 수질변화를 분석하는 것이 목적이었고, 사용된 유역모형으로는 SWAT과 HSPF 모형을, 호소내에서의 수질예측은 EFDC와 WASP 모형을 이용하였다. 이상의 최근 연구동향을 살펴보면, 우선, 낙동강과 같은 대규모 유역에서의 유역 모형 및 하천 모형이 구축된 사례가 많지 않으며, 유역-하천모형의 연계를 통한 해석 역시 많지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 향후 대규모 유역에서의 수자원, 토지 이용, 환경 변화등을 반영할 수 있고, 기후변화에 따른 가뭄과 홍수 등의 예측과 수질 문제 등 하천환경에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 대상 유역에 대한 유역-하천의 통합모형 구축이 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 대규모 유역에서의 향후 기후변화에 의한 하천 흐름과 수질 변화를 예측하기 위한 전단계의 연구이다. 본 연구에서는 유출-흐름 연계 모형 구축을 목적으로, 낙동강 유역을 대상으로 모형 구축과 모형 검·보정을 수행하였다. 유역 모형으로는 SWAT 모형을 이용하였고, 하천 흐름 모형으로는 EFDC 모형을 적용하였다. 먼저 SWAT 모형을 구축하고 2004년-2009년까지 낙동강 본류 및 지류 43개 지점에서의 모형 검·보정을 수행하였다. 또한 낙동강 본류에 대해 EFDC 모형을 구축하고, 상류 경계와 각 12개 주요 지류 경계에서의 유출량은 SWAT모

형의 모의결과를 이용하여 2007년도 낙동강 본류의 각 수위표에서의 측정된 수위값과 비교하였다. 한편, 상류경계로부터 유입된 염료의 이동을 모의하여 하구언까지의 도달시간을 산정하였다.

2. 유역 모델링

2.1 모형구축

Fig. 1은 유역모형 구축을 위한 소유역분할, 수치고도 모델 (DEM), 토지이용도, 토양 분포도를 보여준다. 먼저 DEM은 국가수자원관리 종합정보 (resolution 30 m)에서 제공받았으며, SWAT 모형의 소유역 자동분할 기능을 사용하여 하천도 및 대상유역의 경계를 추출하였다. 오염총량관리 단위유역과 댐 방류지점 등을 기준으로 하여 총 67개의 소유역을 추출하였다. 토지이용도는 환경부 환경지리정보서비스 (<http://egis.me.go.kr/egis>)에서 제공하는 2007년 기준으로 작성된 1:25,000 해상도의 중분류 토지피복도를 사용하였다. 한편, 낙동강유역의 토지이용형태

를 살펴보면 산림 69.8%, 농경지 22.6%, 도시지역 3.2%로 나타났다.

토양특성 등의 정보는 국립식량과학원에서 제공하는 1:25,000 해상도의 정밀토양도를 이용하여 모형을 구축하였으며, 토양의 물리적 특성 및 화학적 특성은 한국토양정보시스템 (<http://asis.rda.go.kr>)의 자료를 사용하였고, 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들은 한국건설기술연구원에서 제공하는 HyGIS Soil DB에서 추출하여 사용하였다. 낙동강 유역에서는 삼암 (17.8%), 대본 (12.2%), 송정 (10.7%)순으로 두드러지게 나타났으며 표토성분은 대본 양질세사토, 삼암과 송정은 양토로, 모두 배수가 양호한 토양으로써 전이나 답의 표토로 사용이 추천된다. 유역경사도 범주는 일반적으로 이용되는 0~7%, 7~15%, 15~30%, 30~60%, 60%이상 등 5개로 구분하였으며, 수문반응단위 (HRU: Hydrologic Response Unit) 생성을 위해 소유역별 토양특성과 토지이용특성을 중첩하고 토지이용, 토양면적, 유역경사도 비율을 각각 10%로 설정하여 총 1,256개의 HRUs를 생성하였다.

(a) Subbasins delineation

(b) DEM

(c) Land use coverage

(d) Soil coverage

Fig. 1. Distribution Maps of Subbasins Delineation, DEM, Land Use Coverage, and Soil Coverage

강우 데이터 구축을 위해 국토해양부 산하 35개 지점과 기상청 산하 21개 지점 등 총 56개 지점에서의 일강우량 자료를 수집하였다. 또한 강우량을 제외한 온도, 풍속, 일조량, 상대습도 등의 기상자료는 낙동강 유역 내의 합천, 밀양, 구미, 남해, 대구, 마산, 문경, 부산, 산청, 안동, 영덕, 영주, 영천, 울산, 의성, 진주, 추풍, 통영, 포항, 거창 그리고 춘양(봉화)의 총 21개소의 기상관측소에 대한 자료를 수집하여 입력 자료를 구축하였다.

SWAT 모형에서 이용 가능한 방류량 자료는 크게 환경기초시설과 댐으로 구분되며 환경기초시설로부터 방류되는 유량은 2007년 전국 오염원 기초자료(환경부, 2008a)를 이용하였다. 각각의 소유역에 위치한 환경기초시설의 방류량을 산정하였고, 댐 방류량은 한국수자원공사의 각 댐별 제원과 일방류량(1994~2009)을 수집하여 관측 일유량법(observed daily outflow method)으로 모델에 적용하였다. 취수량의 경우 생활용수 및 공업용수, 관개용수에 대한 조절유량을 반영하기 위해 2007년도 상수도 통계연보(환경부, 2008b)를 이용하여 소유역별 생공용수량을 산정하였다. 관개용수 즉, 농업취수량의 경우 하천 유량과 강우량 및 수정 Penman식에 의해 산정된 증발산량 등을 이용하여 추산한 자료를 적용하였으며, 농업용수의 회귀율은 특정한 다른 용도의 용수에 비해 유효수량의 비중이 높다는 것과 회귀수량이 반복 이용됨으로써 반복 이용효율이 높으며 물의 소비기구가 복잡하여 기상, 토양, 작물의 종류, 생육조건, 수원공의 종류 등의 관련 인자에 크게 영향을 받기 때문에 조사자와 연구방법에 따라 최소 1.34%에서 최대 130.2%까지 다양하며 심한 편차를 보이고 있다(추태호,

2004). 이는 연구자에 따라 지표배출로 국한하여 회귀수량을 정의하거나 지표배출과 지하침투를 합한 수량을 회귀수량으로 정의하기 때문이라고 판단된다. 건설교통부(2000)를 참고하여 약 35%가 하천으로 회귀하는 것으로 하였다. 또한 생공용수량과 농업용수량을 합산하여 산정한 각각의 소유역별 취수량자료를 유역모형에 입력하였다.

2.2 모형 검·보정

SWAT 모형의 모의기간은 총 8년(2002~2009)이며, 모의기간의 안정화를 위해 2002~2003년을 추가 모의하였다. 모형의 보정은 2007년부터 2009년까지, 검증은 2004년부터 2006년까지 수행되었으며, 낙동강 유역의 총량 8일 간격 관측자료를 사용하여 연중 일별로 이루어졌다. 매개변수 보정 방법에는 크게 시행착오법과 최적화기법에 의한 자동보정법이 있다. 본 연구에서 사용한 자동보정법의 경우 한 개의 보정지점 당 계산시간이 상당히 길기 때문에 시행착오를 최소화하기 위하여 국내외 연구자들이 보고한 매개변수를 참고하여 유량모의에 적절한 매개변수를 선정하여 허용범위 내에서 변화시키면서 단순 시행착오법에 의해 보정하였다(Table 1). 보정은 본류구간 13개 지점(낙본 A~M)과 지류구간 30개 지점 총 43개 지점에 대하여 각각 수행되었으며, 각각의 위치는 Fig. 2와 같다. 실측자료를 이용한 본류구간의 검·보정결과는 본류구간 및 지류구간의 일부 주요 지점에 대하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. Fig. 3을 살펴보면, 2004년부터 2009년 전반에 걸쳐 갈수기와 홍수기 시의 유출량이 유역모형 결과와 실측값이 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수

Table 1. Calibration of Model Parameter

Input file	Variable Name (units)	Definition	Manual range	Calibrated value
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.0~1.0	0.15~0.75
.hru	EPCO	Plant uptake compensation factor	0.0~1.0	1.0
.mgt	CN2	SCS runoff curve number for AMC II	35~98	▽ 8
.sol	SOL_AWC (mm/mm)	Available water capacity of the soil layer	0.0~1.0	0.02~0.34
.sol	SOL_K (mm/hr)	Saturated hydraulic conductivity	0.0~2,000	35.6~180.7
.gw	ALPHA_BF (days)	Baseflow alpha factor	0.0~1.0	0.18~0.98
.gw	REVAPMN (mm)	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur	0.0~500	500
.gw	GWQMN (mm)	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow to occur	0.0~5,000	0
.gw	GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02~20	0.02
.rte	CH_K2	Effective hydraulic conductivity in channel	-0.01~150	5~120
.rte	CH_N2	Manning's "n" value for main channel	-0.01~0.3	0.014~0.02

Fig. 2. Measured Points of Water Discharge in Main River and Tributary Streams

있다. 그러나 각 년도별 최대 유량을 본 모형이 과대 산정하는 것을 볼 수 있는데, 이는 실측값이 8일 간격 유량이라는 점과 홍수기 보다는 평수기 중심으로 유량을 관측하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 총량 8일 간격 관측 자료의 홍수기 유량한계를 보완하기 위하여 국토해양부의 주요 분류 및 지류지점의 일간격 유량 관측자료를 이용하여 홍수기 유량에 대한 보정을 수행하였다. Fig. 4는 일간격 고유량에 대한 모델링과 실측값을 비교한 것이다. 비교결과 결정계수 R^2 의 값이 상류와 하류 유역 각각에 대해 0.66과 0.69인 것으로 나타났으며, 홍수기 고유량에 대한 실측과 예측 값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 결정계수의 정의에 대해서는 다음 부분에서 언급하였다. 좀 더 명확한 모형 검보정을 위해서는 환경부의 8일 자료 뿐만 아니라 국토해양부 일일자료에 대해서도 검보정이 필요하다. 그러나 본 모형이 오염총량단위유역을 기반으로 구축된 것이고, 모형의 소유역 경계지점과 국토해양부의 일일 관측지점이 서로 일치하지 않는 지점이 많아 검보정 자료로 이용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

한편, 내성, 남강 등의 낙동강 지류에서는 갈수기시 유량을 국부적으로 과소 산정하는 것으로 나타났는데, 이는

모형 내의 유출관련 매커니즘 중에서 지하수유출, 기저유출, 증발 등과 관련된 매개변수를 낙동강 유역 전체를 대상으로 그룹모의를 하였기 때문에 유량이 상대적으로 적은 지류에서 갈수기시 유량의 손실이 크게 나타나는 것으로 판단되었다. 특히 입력자료로 이용되는 강우관측 자료의 제한으로 강우의 공간적 분포가 대상유역을 충분히 고려하지 못하는 SWAT 모형의 한계로 인해 상류지점 등 특정지점에서 과대 또는 과소 모의된 것으로 판단된다.

실측값에 대한 모의결과와 정확성을 평가하기 위해서 Eqs. (1) and (2)처럼 % difference (ASCE, 1993), NSE (Nash and Sutcliffe, 1970)와 결정계수 (Coefficient of Determination, R^2)를 산정하였다.

$$\% \text{ difference} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

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

여기서, P_i 는 예측 값, O_i 는 실측값, n 은 데이터 수, 그리고 $\bar{O}$ 는 실측 값의 평균이다. 한편, % difference와 NSE에 대해 Table 2와 같이 Donigian (2000)이 제시한 일반적

Fig. 3. Comparisons of Computed Runoff Discharge and Measured Data

인 모델효율의 범위와 신뢰 구간을 이용하였다. SWAT 모형에 의한 유량모의 결과는 본류와 지류구간에 대해

여 Tables 3 and 4와 같이 나타내었다. 본류구간의 경우 보정기간에 대한 % difference는 5.03~20.13로서 낙본B

Fig. 4. Comparisons of Computed Runoff Discharge and Measured Data

Table 2. Confidence Interval

Grade	Very Good	Good	Fair	Poor
% difference	< 10	10~15	15~25	-
R^2 , NSE	> 0.8	0.80~0.70	0.70~0.60	< 0.6

Table 3. Results of Model Calibration and Verification in Main River

Site	Calibration					Verification				
		평균	% diff.	NSE	R^2		평균	% diff.	NSE	R^2
낙본A	Obs.	4.47	8.80	0.88	0.89	Obs.	6.71	24.00	0.60	0.75
	Sim.	4.07				Sim.	5.09			
낙본B	Obs.	17.54	20.13	0.84	0.89	Obs.	22.71	6.66	0.74	0.77
	Sim.	21.08				Sim.	24.22			
낙본C	Obs.	57.82	13.36	0.76	0.86	Obs.	73.11	9.08	0.87	0.89
	Sim.	50.10				Sim.	67.47			
낙본D	Obs.	91.00	7.85	0.62	0.64	Obs.	176.01	0.31	0.80	0.86
	Sim.	98.14				Sim.	175.47			
낙본E	Obs.	112.93	9.93	0.85	0.86	Obs.	228.44	13.10	0.68	0.83
	Sim.	124.15				Sim.	198.52			
낙본F	Obs.	124.54	11.94	0.81	0.82	Obs.	194.72	8.23	0.83	0.84
	Sim.	139.40				Sim.	178.69			
낙본G	Obs.	205.91	15.04	0.82	0.86	Obs.	296.42	5.00	0.95	0.96
	Sim.	174.95				Sim.	281.60			
낙본H	Obs.	220.85	6.95	0.90	0.91	Obs.	351.67	2.55	0.95	0.96
	Sim.	205.51				Sim.	342.71			
낙본I	Obs.	319.31	5.03	0.90	0.94	Obs.	426.73	5.83	0.89	0.91
	Sim.	303.27				Sim.	401.85			
낙본J	Obs.	330.75	8.26	0.92	0.93	Obs.	462.61	12.04	0.76	0.80
	Sim.	303.43				Sim.	406.92			
낙본K	Obs.	332.15	7.25	0.92	0.95	Obs.	464.00	5.06	0.79	0.81
	Sim.	308.07				Sim.	440.53			
낙본L	Obs.	339.65	8.26	0.92	0.95	Obs.	465.02	11.08	0.77	0.80
	Sim.	311.60				Sim.	413.51			
낙본M	Obs.	550.17	17.39	0.85	0.92	Obs.	864.56	13.79	0.90	0.90
	Sim.	454.52				Sim.	745.36			

Table 4. Results of Model Calibration and Verification in Tributary Streams

Site	Calibration					Verification				
		Mean	% diff	NSE	R ²		Mean	% diff	NSE	R ²
내성A	Obs.	13.12	6.63	0.56	0.64	Obs.	15.78	2.30	0.64	0.74
	Sim.	13.99				Sim.	16.14			
내성B	Obs.	26.52	5.06	0.64	0.71	Obs.	47.56	15.41	0.72	0.83
	Sim.	27.86				Sim.	54.89			
금천A	Obs.	4.29	7.69	0.68	0.68	Obs.	10.61	0.48	0.81	0.80
	Sim.	4.62				Sim.	10.56			
이안A	Obs.	2.71	23.93	0.87	0.86	Obs.	5.56	18.05	0.84	0.85
	Sim.	3.35				Sim.	6.56			
영강A	Obs.	12.45	14.32	0.67	0.66	Obs.	20.02	20.80	0.68	0.79
	Sim.	14.23				Sim.	24.19			
병성A	Obs.	3.74	18.86	0.68	0.76	Obs.	9.31	5.01	0.76	0.88
	Sim.	4.44				Sim.	9.77			
반변A	Obs.	6.93	2.52	0.79	0.87	Obs.	20.25	1.95	0.78	0.85
	Sim.	7.10				Sim.	20.64			
용천A	Obs.	4.13	7.36	0.87	0.92	Obs.	11.88	29.00	0.58	0.84
	Sim.	3.83				Sim.	8.44			
길안A	Obs.	3.28	32.04	0.86	0.83	Obs.	9.45	2.94	0.78	0.87
	Sim.	4.33				Sim.	9.73			
반변B	Obs.	10.82	22.19	0.88	0.91	Obs.	21.66	6.97	0.93	0.93
	Sim.	13.22				Sim.	23.16			
미천A	Obs.	4.60	6.83	0.77	0.89	Obs.	9.34	24.01	0.50	0.75
	Sim.	4.91				Sim.	7.10			
위천A	Obs.	3.96	21.08	0.89	0.78	Obs.	15.25	19.38	0.55	0.86
	Sim.	4.79				Sim.	12.30			
위천B	Obs.	9.85	12.56	0.72	0.69	Obs.	19.34	6.57	0.64	0.64
	Sim.	11.08				Sim.	20.61			
감천A	Obs.	7.66	21.17	0.91	0.93	Obs.	11.17	5.51	0.71	0.71
	Sim.	9.28				Sim.	10.55			
백천A	Obs.	4.04	6.19	0.88	0.95	Obs.	3.28	2.24	0.69	0.73
	Sim.	3.79				Sim.	3.35			
금호A	Obs.	8.26	14.83	0.56	0.74	Obs.	19.50	6.86	0.62	0.82
	Sim.	9.49				Sim.	18.17			
금호B	Obs.	11.22	18.76	0.67	0.70	Obs.	33.77	27.14	0.50	0.81
	Sim.	13.33				Sim.	24.61			
금호C	Obs.	26.07	9.68	0.78	0.84	Obs.	39.94	14.03	0.74	0.75
	Sim.	23.55				Sim.	34.33			
묘산A	Obs.	1.29	33.30	0.57	0.65	Obs.	0.88	109.69	-1.16	0.51
	Sim.	1.71				Sim.	1.84			
가야A	Obs.	3.28	2.99	0.79	0.94	Obs.	2.55	16.66	0.76	0.82
	Sim.	3.18				Sim.	2.98			
회천A	Obs.	11.49	20.43	0.86	0.94	Obs.	17.62	27.98	0.65	0.80
	Sim.	9.15				Sim.	12.69			
황강A	Obs.	12.65	4.51	0.74	0.86	Obs.	16.49	2.14	0.57	0.78
	Sim.	13.22				Sim.	16.84			
임천A	Obs.	9.69	18.74	0.71	0.75	Obs.	8.93	8.57	0.85	0.85
	Sim.	7.88				Sim.	8.17			
남강A	Obs.	23.29	17.18	0.73	0.84	Obs.	28.87	20.94	0.66	0.82
	Sim.	19.29				Sim.	22.83			
남강B	Obs.	44.55	10.45	0.76	0.83	Obs.	35.78	5.78	0.63	0.63
	Sim.	39.89				Sim.	37.85			

Table 4. Results of Model Calibration and Verification in Tributary Streams (continued)

Site	Calibration					Verification				
		Mean	% diff	NSE	R ²		Mean	% diff	NSE	R ²
남강C	Obs.	29.28	19.02	0.64	0.69	Obs.	45.25	1.14	0.55	0.60
	Sim.	34.85				Sim.	45.76			
남강D	Obs.	60.85	6.65	0.88	0.88	Obs.	60.45	2.62	0.81	0.89
	Sim.	56.81				Sim.	62.03			
남강E	Obs.	60.57	9.89	0.77	0.83	Obs.	68.58	9.10	0.97	0.97
	Sim.	66.56				Sim.	74.82			
밀양A	Obs.	18.12	26.64	0.76	0.89	Obs.	11.95	2.22	0.83	0.84
	Sim.	13.29				Sim.	11.68			
밀양B	Obs.	21.12	2.20	0.91	0.93	Obs.	26.82	18.03	0.74	0.88
	Sim.	21.59				Sim.	21.98			

(20.13)와 낙본M(17.39)지점을 제외하고는 좋음 (Good) 수준 이상으로 보정목표치내에서 모의되었으며, NSE는 0.62~0.92로서 낙본D (0.62, Fair)를 제외하고는 모두 좋음 등급 이상으로 모의되었다. 한편, 선형회귀분석에 의한 결정계수는 각각 0.64~0.95의 범위로 분석되어 실측값과 모의값 간의 유의성이 높은 것으로 나타났다. 검증기간에 대한 % difference는 2.55~24.00, NSE는 0.60~0.95로 적절하게 모의되었음을 나타내었다. 또한 결정계수는 0.75~0.95인 것으로 나타났다.

지류구간의 경우 보정기간에 대한 % difference는 길안 A (32.04), 묘산A (33.30), 밀양A (26.64)지점을 제외한 27개 지점에서 25% 내에서 (Fair 등급 이상) 모의되었으며, NSE는 내성A (0.56), 금호A (0.56), 묘산A (0.56)를 제외하고는 0.64~0.91로 나타났다. 결정계수는 모두 0.64~0.94로 분석되어 두 자료간의 유의성이 있는 것으로 분석되었다. 검증기간 동안 % difference는 용전A (29.00)와 묘산A (109.69)를 제외한 모든 지점에서 25% 이하를 나타내었고, NSE의 경우 미천A (0.50), 위천A (0.55), 금호B (0.50), 묘산A (-1.16), 황강A (0.57), 남강C (0.55)를 제외하고 0.62~0.97로 분석되었다. 결정계수는 묘산A를 제외하고 0.60~0.97을 나타내었다. 이상의 유량모의 결과를 정리하면, 일부 지류구간의 보정지점을 제외하면 본류 및 지류 전 지점에 걸쳐 구축된 SWAT 모형이 실측값의 경향을 적절히 잘 반영하는 것으로 나타났으며, 지류구간보다 본류구간에서 실측값의 일관성이 더 양호하고 실측 자료의 경향과 더 유사한 결과를 나타냈다. 이는 저수기에도 본류하천의 유량이 풍부하며 특히 홍수기의 유출량 모의가 잘 반영된 결과로 판단된다.

3. 하천흐름 예측

낙동강 구간에서의 흐름 모델링을 위하여 EFDC (Envi-

ronmental fluid Dynamics Code) 모형을 이용하였다. EFDC 모형은 Virginia Institute of Marine Science의 Hamrick에 의해 1990년대 초에 개발되었고, 현재는 USEPA와 Tetra Tech Inc.에 의해 개발·관리되고 있다. 본 모형은 수직 방향으로 σ 좌표계를 사용하고, 수평 방향으로는 직선 또는 직교곡선좌표계를 사용하고 있다. 수직 와동점성계수의 산정에는 Mellor and Yamada (1982)의 level 2.5 turbulence closure scheme을 사용하고, 수평와동 점성계수는 Smagorinsky type diffusivity를 사용한다. 또한 Mass conservation scheme을 사용한 마름/젖음 구간 처리가 가능하다.

3.1 모형구축

하천 단면 데이터는 낙동강수계 하천기본계획 (변경) 보고서 (부산지방국토관리청, 2009a, b)의 하상고 자료를 이용하였다. 계산 구간은 낙동강 하구언 (St. No. 0)부터 상류 약 292.7 km (St. No. 620까지)에 해당되며, 구축된 격자망은 Fig. 5와 같다. 전 구간에 대한 격자수는 15,444개 ($1,404 \times 11 \times 1$)로서 셀 수는 14,030개이다. 계산시간 간격 (Δt)은 4초이고, 365일 모의 시간 (CPU Time)은 약 24시간이 소요되었다.

Fig. 5(b)는 대상 구간에서 합류되는 주요지류, 수위 관측소 위치 등 전반적인 모식도를 보여준다. 그림에서 지류 위치는 앞의 유역 모델링과 동일하다. 또한 유역 모의를 통한 2007년 일평균 유량 결과를 12개의 각 지류 및 상류 경계에서의 유량 경계조건으로 사용하였다. Fig. 5(b)의 각 수위표 위치는 본 연구에서 계산된 수위 결과를 비교하기 위한 지점 수위표이다. 각 수위표 지점에서의 관측 수위는 한국수문조사연보 (국토해양부, 2007)의 자료를 이용하였다. 또한 하류단 경계지점인 하구언에서의 일평균 수위는 한국수문조사연보의 자료를 이용하였으며, 하구언에서의 연평균수위는 0.86m이고, 연 최고 수위는

Fig. 5. Numerical Grid System and Locations of Tributaries and Water Level Monitoring Site

7월 22일 3.09 m을 기록하였다.

대상하천에서의 조도계수 값은 부산지방국토관리청 (2009a, b)에서 산정한 값을 사용하였으며, Fig. 5(b)와 같다. 부산지방국토관리청 (2009a, b)에서는 과거의 홍수 사상으로부터 1차원 부정류 모형을 이용하여 조도계수를 추정하였다. 그림을 보면, 금호강을 기준으로 낙동강 상류측에서의 조도계수는 0.024~0.026이고, 하류측에서는 0.02~0.023인 것으로 나타났다. EFDC 모의를 위한 초기 수심 자료는 2007년 1월 1일 상류단 유량-하류단 수위 조건에 대한 CCHE 모형 (Zhang and Jia, 2009)의 2차원 흐름 모의를 수행하고, 그 결과를 EFDC 모형의 초기 조건으로 이용하였다.

3.2 모형 결과

Fig. 6은 각 수위 관측소별 계산수위와 관측 데이터의 비교를 보여준다. 먼저, 전반적인 계산결과를 보면, 전 구간에서의 계산결과와 측정 데이터가 잘 일치함을 볼 수

있다. 특히, 구축된 모형이 저수위와 고수위에서의 수위 값을 잘 예측하며, 수위 변화 양상 역시 관측 데이터와 매우 유사함을 볼 수 있다. 그러나 마수원 지점을 보면, 홍수기를 제외한 대부분의 구간에서 관측 수위가 변화 없이 동일한 값을 보이는데, 이는 저수기시 수위관측이 비정상적이었던 것으로 추측되며, 오히려 계산 결과가 좀 더 자연스러운 수위 변화를 보인다. 이러한 현상은 화원 관측소의 1~3월 부분에서도 보인다. 또한 수산 수위표에서 계산된 저수기 수위가 국부적으로 큰 값을 보이는데, 이는 유입유량이 국부적으로 큰 값을 갖기 때문인 것으로 보인다. 한편, 각 관측소에서의 최대 홍수위를 비교해 보면, 지보, 구미, 화원 관측소에서 최대 홍수위를 다소 과소 산정하는 것을 볼 수 있으나 그 차이는 크지 않으며, 다른 관측소에서는 관측 데이터와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 한편, Table 5는 계산과 실측 수위에 대한 결정계수, % difference, NSE의 값을 보여준다. 8개 비교 지점에서의 결정계수는 0.72~0.94로서 실측과 모델링 예측 값이

Table 5. Determination Coefficient, % Difference, and NSE of Water Surface Elevation

Site	지보	낙동	구미	왜관	화원	마수원	수산	삼랑진
R^2	0.88	0.72	0.72	0.94	0.89	0.89	0.92	0.93
% difference	0.1	0.64	2.01	1.1	2.07	15.9	16.9	13.4
NSE	0.81	0.98	0.50	0.85	0.85	0.43	0.83	0.87

Fig. 6. Comparisons of Computed Water Surface Level and Measured Sata at Each Water Level Monitoring Site

비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 % difference와 NSE 역시 마수원을 제외하고는 실측값과 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5(a)의 A 구간에서의 수심 분포도 및 유속 백터도를 보여준다. Fig. 7의 계산 결과는 홍수기인 계산시간 260일 때의 결과이다. 전반적인 계산 결과가 각 흐름 특성을 잘 보여주고 있는 것을 볼 수 있다. 특히, Fig. 7(a)에서 상류 구간을 보면, 하중도에 의해 마른 하도 구간이 존재하며, 구축된 모형이 이를 잘 반영하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 하중도 좌안 측에서 통수단면적 감소에 의한 유속 증가 현상 및 그 하류단의 만곡 외측 부분에서의 유속 증가, 그리고 수면폭이 증가하는 구간에서의

유속 감소 현상 등 하천 흐름의 물리적 현상을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 상류경계에 50 mg/l의 염료가 2007년 1월 1일에 0.5일간 유입 되었을 경우 시간에 따른 염료의 이동을 보여준다. 염료 유입 후 약 10일이 경과하였을 경우, 염료는 감천 합류부 근처까지 이동하며, 20일 후에는 백천 합류점 부근, 40일 후에는 남강 합류점까지 도달하여 약 65일 후에 하구언까지 도달하게 되는 것을 볼 수 있다. 염료의 이동시간을 통하여 체류시간을 고려한다면, 대상구간에서 저수기 유량 때의 체류시간은 약 65일 정도임을 알 수 있다.

(a) Water depth

(b) Flow velocity

Fig. 7. Contours of Water Depth and Flow Velocity in Site A.

(a) 10 days

(b) 20 days

(c) 30 days

(d) 40 days

(e) 60 days

Fig. 8. Movement of Dye with Time

4. 결론

본 연구는 낙동강 유역을 대상으로 유역 유출 모형과 하천에서의 흐름모형 연계를 통한 본류 흐름 해석을 수행하였다. 사용된 유역과 하천 흐름 모형으로는 각각 SWAT과 EFDC 모형을 적용하였다. 먼저 SWAT 모형을 이용하여 2004~2009년도의 유출해석을 수행하고 낙동강 본류와 지류 43개 지점에서의 측정값과 비교하였다.

한편, 구축된 유출모형으로부터 낙동강 본류 경계와 지류 경계에서의 계산된 유출량을 EFDC 모형의 경계유량으로 입력하여 계산하고, 실측 수위와 비교하였다.

먼저, SWAT모형을 이용하여 유출량을 모의한 결과, 본류와 지류 구간에 걸쳐 실측값과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본류 구간에서의 % difference는 낙본B와 M을 제외하고는 대부분 15% 이내인 것으로 나타났고, NSE와 R^2 역시 대부분 적정 수준인 것으로 모의 되었다.

한편, 지류 구간 역시 일부 구간을 제외하고는 대부분 실측값의 경향을 적절히 예측하는 것을 확인하였으며, 지류 보다는 본류 지점에서 실측값의 경향을 좀 더 잘 반영하는 것으로 나타났다. 이상의 낙동강 유역과 같이 대규모이고, 각각의 중소규모 유역특성이 다양하고 광범위하다는 것을 고려해 볼 때 본 연구에서 구축된 모형이 허용 가능한 범위 내의 결과를 잘 예측하는 것으로 판단된다.

하천 흐름 모형은 2007년도 낙동강 본류 각 지점별 관측 수위를 비교한 결과 저수기와 홍수기를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 만곡부 및 하중도 부근에서의 유속 감속과 가속 현상 등 물리적 현상을 구축된 모형이 잘 재현하고 있음을 확인하였다. 한편, 1월 1일 주입된 염료의 이동을 계산한 결과, 상류경계에서 하구언까지의 염료 도달시간은 약 65일이 소요되는 것으로 나타났다. 본 연구는 유역-하천 연계모형을 이용한 기후변화에 따른 흐름과 수질 등 수환경 변화를 분석하기 위한 전단계의 연구로서, 낙동강 유역과 같은 대유역 평가를 위한 모형 구축에 그 의미가 있으며, 향후 본 모형이 다양한 연구에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국환경정책평가연구원 녹색성장정책연구의 일환으로 수행된 “기후변화 대응을 위한 수질제어 및 관리방안” 연구 보고서의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부 (2000). 수자원장기종합계획, 건설교통부, 한국수자원공사.

김남원, 이진원, 이정우, 이정은 (2008). “SWAT을 이용한 충주댐 유역의 유출곡선지수 산정 방안.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제12호, pp. 1231-1244.

김대근, 정재웅, 박재현, 박창근 (2007). “적설 및 용설의 영향을 고려한 장기유출 모의.” **대한상하수도학회 논문집**, 대한상하수도학회, 제21권, 제3호, pp. 265-272.

김문성, 고익환, 김상단 (2009). “CGCM의 미래 기후정보를 이용한 기후변화가 낙동강 유역 유황에 미치는 영향 분석.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제6호, pp. 863-871.

김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006). “갑천유역을 대상으로 SWAT 모형의 다 변수 및 다 지점 검토.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 867-880.

국토해양부 (2007). 한국수문조사연보-수위편.

박재충, 최재훈, 송영일, 송상진, 서동일 (2010). “HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질 예측.” **한국환경영향평가학회지**, 한국환경영향평가학회, 제19권, 제5호, pp. 465-473.

부산지방국토관리청 (2009a). 낙동강수계 하천기본계획 (변경) 보고서 [금호강합류점-하구, 밀양강, 양산천].

부산지방국토관리청 (2009b). 낙동강수계 하천기본계획 (변경) 보고서 [국가하천기점-금호강합류점].

손태석, 이상도, 김상단, 신현석 (2010). “유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천유량 영향 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제10호, pp. 865-881.

신현석, 강두기, 김상단 (2007). “낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 251-263.

정광욱 (2007). Development of 3D integrated water quality simulation system by applying BASINS/WinHSPF and EFDC in Han River basin and Paldang Reservoir. 박사학위논문, 건국대학교.

정상만, 서형덕, 김형수, 한규하 (2008). “기후인자의 변화에 따른 대청댐유역의 유출민감도 모의평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제11호, pp. 1095-1106.

정제호 (2010). 기후변화를 고려한 댐유역의 수질변화 분석. 박사학위논문, 경북대학교.

추태호 (2004) 낙동강 유역의 월곡저수지 내 논 농업용수 회귀를 조사·분석. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제2b호, pp. 123-129.

환경부 (2008a). 2007년 전국오염원 조사.

환경부 (2008b). 2007년 상수도통계연보.

ASCE (1993). “ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models, Criteria for Evaluation of Watershed Models.” *Irrigation Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 3, pp. 429-442.

Donigian, Jr. A.S. (2000). HSPF Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22, EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC.

Mellor, G.L., and Yamada, T. (1982). “Development of a turbulence closure model for geophysical fluid

problems.” *Rev Geophys. Space Phys*, Vol. 20, pp. 851-875.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “Riverflow forecasting through conceptual model.” *Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, J.R., and Williams, J.R. (2004). Soil and Water Assessment Tool; The theoretical documentation (Version 2005),

U.S. Agricultural Research Service.

Zhang, Y., and Jia, Y. (2009). 2D structured mesh generator user’s manual, School of Engineering, The University of Mississippi.

논문번호: 11-049	접수: 2011.05.04
수정일자: 2011.06.07/06.27	심사완료: 2011.06.27