

# 서낙동강 시험유역에서의 SWAT 모형을 이용한 수문 운영에 따른 연속유출 및 수질변화 예측

## Prediction of Continuous Discharge and Water Quality Change for Gate Operation in Seonakdong River Experimental Catchment Using SWAT

강 덕 호\* / 김 정 민\*\* / 김 태 원\*\*\* / 김 영 도\*\*\*\*†

Deok Ho Kang\* / Jung Min Kim\*\* / Tae Won Kim\*\*\* / Young Do Kim\*\*\*\*†

**요약** : 서낙동강 유역의 대부분은 농경지와 임야로 이루어져 있으며, 서낙동강은 상하류에 위치한 수문으로 인해 자연적인 하천흐름이 원활하지 않은 정체수역으로서 비점오염원등의 오염원으로 인해 수질이 점점 악화되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 수문운영에 따른 서낙동강의 유량과 수질 거동을 모의하였다. SWAT 모형을 검증정하기 위하여 2006년에서 2007년까지 서낙동강 주요 지류의 5개의 수위관측소 지점에서 유량 및 수질을 측정하였다. 민감도 분석을 수행한 이후에 유량과 수질의 보정 결과로  $R^2$  값은 각각 0.86과 0.70으로 나타났다. 검증기간에서의  $R^2$  값은 각각 0.81과 0.51로 나타났다. 수문 운영에 따른 수질모의 결과, 수문개방시 BOD 농도는 감소하는 경향을 보였으며, TN과 TP도 BOD와 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서는 유역단위의 시공간적인 수문 및 수질 모의가 가능한 SWAT 모형을 사용하여 서낙동강의 수질관리를 위한 수문 운영 기법을 검토하였으며, 이를 활용하여 수문 운영자는 갈수기 수질향상을 위한 최적의 유입량 및 방류량을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : BOD 부하량, 수문 운영, 서낙동강, SWAT, 민감도 분석

**Abstract** : The dominant land use at the Seonakdong river watershed is paddy and forest areas and the Seonakdong river stands still. Thus, the water pollution in the Seonakdong river is becoming more serious for the non-point source. In this study, SWAT(Soil and Water Assessment Tool) model was evaluated for simulation of flow and water quality behaviors in Seonakdong river. To perform the calibration and verification of the SWAT model, the measurements of discharge and water quality were performed for the period from 2006 to 2007 at 5 gauging stations in Seonakdong river. The  $R^2$  value for discharge and water quality were 0.86 and 0.70 respectively for calibration after the sensitive analysis. The  $R^2$  value for discharge and water quality were 0.81 and 0.51 respectively for verification. The simulation results show that BOD value in the river tends to decrease after the opening of gates and the patterns of TN and TP concentrations are similar as that of BOD. The gate operators need to determine how to supply water in drought season for effective water quality improvement. This study shows that the SWAT model, which is capable of simulating hydrologic and water quality behaviors temporarily and spatially at watershed scale, could be used to get the gate operation rule for the water quality management in Seonakdong river.

**Keywords** : BOD load, gate operation, Seonakdong River, SWAT, sensitivity analysis

+ Corresponding author : ydkim@inje.ac.kr

\* 비회원 · (주)한성개발공사 · 수자원부 · 대리 · 이학석사 · E-mail : mirea-fighting@hanmail.net

\*\* 비회원 · 인제대학교 · 환경공학부 · 박사과정 · 이학석사 · E-mail : nnccaa@paran.com

\*\*\* 정회원 · (주)웹솔루스 · 수자원시스템본부 · 상무 · 공학박사 · E-mail : ktw@websolus.co.kr

\*\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 인제대학교 · 환경공학부(낙동강유역환경연구센터) · 조교수 · 공학박사 · E-mail : ydkim@inje.ac.kr

## 1. 서 론

도시지역을 포함한 대부분의 하천유역은 이중 배수 시스템을 갖는 유역으로 하천의 물은 자연적인 하천 시스템을 통한 유출수와 인위적인 하수도 시스템을 통한 하수 또는 하수처리수로 구성되어 있다. 일반적으로 전자에서는 비점오염부하량이 후자에서는 점오염부하량이 하천으로 유입된다(정은성 등, 2006). 본 연구의 대상 하천인 서낙동강은 상류 유입부에는 대저수문, 하류 유출부에는 녹산수문이 위치하여 이와 같은 수문을 개방하지 않은 경우에는 본류 구간 전체가 정체수역을 이루어 매우 작은 유량이 흐르는 것에 비하여 예안천, 주중천, 신어천, 조만강 등의 지류로부터 오염물질이 지속적으로 유입되고 있다. 이러한 오염물질은 조만강 유역에 위치한 하수처리장같은 점오염원도 있으나 대부분 농지와 산지 유역으로 인한 비점오염원 형태로 유입된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 가장 근본적인 방안은 유역에서 발생하는 오염부하량을 소유역별로 산정하여 이를 관리하고, 최적의 수문운명을 통하여 서낙동강 본류 수역 내의 유속을 적절히 조절하여 수질개선 효과를 확보하는 것이다.

서낙동강 수계에 대한 모형연구로는 낙본N 단 위유역 오염총량관리 시행계획수립을 위하여 QUALKO 모형을 적용한 바 있고(김해시, 2006), 이남주 등(2007)이 수문운영에 따른 유속장 변화와 이로 인한 농도장 변화를 2차원 수치모형을 통해 모의한 바 있다. 또한 Hwang 등(2011)은 수문운영에 따른 본류 유량변화에 대한 장단기 수질변화를 QUAL2E 모형과 CE-QUAL-RIV1 모형을 사용하여 비교 및 분석하였다. 위와 같은 연구는 대부분 서낙동강 본류에 관한 수리 및 수질모형에 관한 연구로서 유역내 전체 오염부하량 중 농경지 및 축산계 비점오염원이 차지하고 있는 비중이 약 50%인 수계인 것이 비해서는 유역유출에 의한 비점오염 부하에 관한 모형연구는 매우 적다. 정체성 조절하천으로 서낙동강은 수량 및 수질 관리가 어려운 하천이지만 환경부의 수질측

정망 4지점을 제외하고는 관련 정보가 매우 부족하며, 하천유량에 관해서는 본류 및 지류에서 국가수위관측소가 운영되고 있지 않는 기계측유역인 관계로 유역모형에 관한 연구가 수행되기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 서낙동강 유역에 실시간 수위관측시스템을 설치하고, 각 설치지점에서의 장기간 유량측정을 통한 수위-유량관계곡선을 작성하여 실시간 수위자료를 이용한 지천별 유량 자료를 확보하였다. 또한 서낙동강 하류에 위치한 녹산수문을 유역의 출구지점으로 하여 SWAT 모형을 구축하였고, 유출 및 수질에 영향을 미치는 민감한 매개변수들을 선정하였으며, 모형의 신뢰성을 확보하기 위해 각각의 지천에서의 일정 간격으로 유량 및 수질측정을 수행하여 모형의 보정 및 검증 자료로 이용하였다. 또한 구축된 유역모형을 이용하여 수문 개폐에 따른 수질개선효과를 분석하였으며, 이와 같은 결과는 향후 수질관리를 위해 수문 운영에 대한 기초자료로 이용될 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

### 2.1 대상 유역 현황

Fig. 1은 서낙동강 유역내 주요하천 현황을 보여주고 있다. 서낙동강의 유역면적은 304.1 km<sup>2</sup> 이고, 유로연장은 18.5 km로서 유역형상이 방사상과 우상의 혼합상으로 비교적 구형을 이루고 있으며, 유역의 평균폭은 동서방향으로 17~20 km, 남북방향으로는 약 18 km 정도이다. 연평균기온은 13.5~15.3℃이며 연평균강수량은 연 1,349 mm이다. 서낙동강은 평균 수면적이 7.8 km<sup>2</sup>이며, 저수량은 1,840만 m<sup>3</sup>로서 농업용수로 사용하기 위해 설치한 수문에 의해 1년 중 대부분의 기간 동안 유량이 정체되어 있다. 대저수문의 유입량 변화와 농업용수의 사용량에 따라 수위의 변화가 매우 심하며, 녹산수문의 운영에 따른 일시적인 방류에 의하여 수층의 교환이 한시적으로 일어나는 독특한 수문학적 특성을 가진다(서낙동강관계

기관합동, 2005).

서낙동강의 흐름은 상류에 위치한 대저수문의 유입에 의한 흐름과 하류 낙산수문의 방류에 의한 흐름, 그리고 지천 유입에 따른 흐름이 수문 운영과 강우사상에 따라서 매우 다양하게 나타난다. 수문의 운영은 서낙동강의 홍수조절 및 김해평야의 관개용수 취·배수와 수질개량을 목적으로 대저·낙산수문관리규정(강서구 훈령 제153호, '02.4.26)에 따라 강서구청에서 운영하고 있는데, 낙산 수문은 5물에서 11물 사이(음력 13일~19일, 28일~4일)에서는 1일 2회 방류할 수 있으나, 대부분 1회 미만으로 방류하고 있다. 수문개방시간은 보통 3시간정도이며 이는 대저수문에서 개방된 물이 최하류인 낙산수문까지의 도달 시간이다. 하지만 물때가 맞더라도 태풍 및 호우주의보시에는 수문을 개방하지 않는다(경남지역환경기술개발센터, 2007).

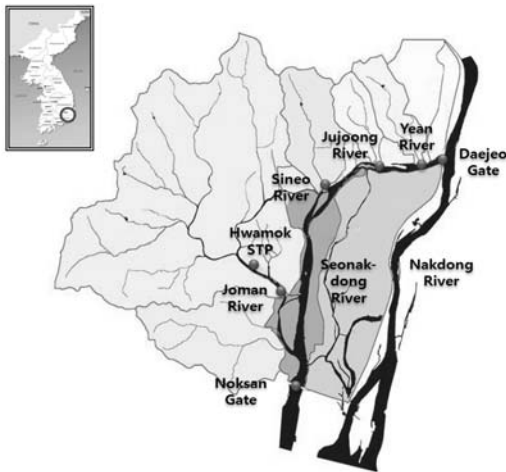


Fig. 1. Seonakdong river watershed

## 2.2 SWAT 모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구국(Agricultural Research Service: ARS)에서 개발된 유역모형으로서 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및

토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위하여 개발되었다(Arnold 등, 1996). 특히 SWAT은 강우-유출모형과 수질모형을 GIS와 연계한 호환모형으로서 장기간에 걸친 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미계측 지역에서도 모의가 가능하다. 또한 경작형태나 기후, 식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화 할 수 있는 특징을 가지고 있다(Smithers와 Engel, 1996). SWAT 모형을 이용하여 수문현상 및 수질변화를 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다(박윤식 등, 2007).

SWAT 모형은 장기간에 걸친 기상자료와 토양 특성 및 토지이용 등에 따른 하천의 유출량, 유사량 및 수질 특성에 관해 연구를 수행하기 위하여 국내외에서 다수의 유역에 적용된 사례가 있다. 국외의 경우, Arnold 등(1999)은 미국 텍사스주 6개 유역에 관하여 유역별 연평균 유사량 모의결과를 관측치와 비교하여 모형의 적정성을 검토한 바 있다. 국내의 경우, 정은성 등(2006)이 전형적인 도시하천 특성을 갖는 안양천에서의 수량 및 수질 특성을 모의한 바 있고, 박윤식 등(2007)은 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미'로 인하여 장기간의 고탁수 문제가 발생한 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위하여 SWAT 모형의 적용성을 평가한 바 있다. 김보경 등(2007)은 임하호의 유입량 및 유입 부유사량 모의를 위한 매개변수의 범위를 산정하기 위해 SWAT 모형을 적용하였다. 또한 최근에는 특정 유역에서의 기후변화에 따른 유출량 및 유사량, 또는 수질 영향을 평가하기 위하여 SWAT 모형이 적용되었다(박종윤 등, 2009; 예령 등, 2009; 박민지 등, 2010). 이종소 등(2011)이 하천 측량성차가 없는 미계측 유역의 수리계수 산정을 위해 경안천 유역을 대상으로 HEC-RAS 모형과 SWAT 모형을 이용하여 수리계수를 각각 산정하여 결과들을 비교 분석 하였

다. 김정민 등(2011)은 도시지역과 농촌지역이 혼재되어 있는 서낙동강 유역의 오염부하량을 산정하기 위하여 SWAT 모형과 SWMM 모형을 연계하였다. 또한 최정화 등(2009)은 SWMM 모형을 이용하여 조경천의 수문환경 변화에 대한 유출분석을 실시한 바 있으며, 김연수 등(2011)은 섬진강댐 운암호에 대하여 HEC-GeoHMS 모형을 이용하여 장기유출량을 산정하고, EFDC 모형을 이용하여 호소 수질 변화를 시공간적으로 모의한 바 있다. 이와 같은 연구들은 유역특성에 따른 유출 특성 변화가 하천 및 호소의 수질에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 수행되었다.

본 연구에서는 유역모형으로 SWAT 모형을 선정하여 서낙동강의 강우유출 및 수문운영에 따른 오염부하량 변화를 산정하였으며, Fig. 2는 본 연구에서 사용된 SWAT 모형의 수행 모식도를 나타낸 것이다.

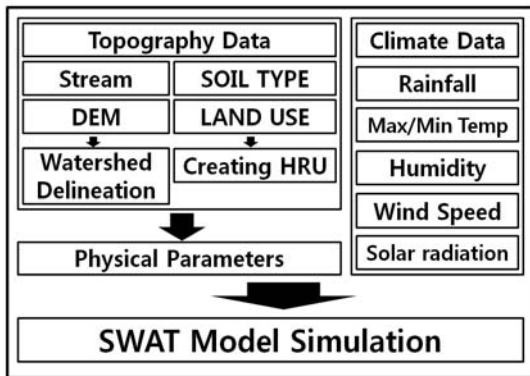


Fig. 2. flowchart for SWAT model simulation

### 2.3 SWAT 모형의 입력자료 구축

SWAT 모형을 구축하기 위한 입력자료는 지형자료, 지형자료의 속성과 관련된 자료 그리고 기상 및 유역관리에 관련된 자료 등 크게 3가지로 구분된다. 지형자료중 수치고도모형(DEM)은 1:25,000 수치지도를 이용하여 30 m 간격으로 추출하였다(Fig. 3(a)). SWAT 모형은 토지이용과

토양의 상태에 따라서 유출해석의 기본 단위인 HRU (Hydrologic Response Unit)을 정하여 소 유역의 복합적인 특성을 반영할 수 있는 구조를 가지고 있으며, HRU 계산단위를 통하여 모형 입력 매개변수를 생성하고, 모의를 수행할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 농촌진흥청의 토지이용도(1:25,000) 및 정밀토양도(1:25,000)를 사용하였으며, 환경부의 토지피복분류를 이용하여 모형을 구축하였다(Fig. 3(b), (c)). 서낙동강 유역은 주로 논과 숲으로 구성되어 있으며, 토지이용현황을 분석한 결과는 Table 1과 같다.

증발산량 산정에 필요한 기상자료는 1986년 1월 1일~2007년 12월 31일까지 김해공항 기상관측소 자료를 활용하였으며, 태양복사량 자료는 기상관측소에 관측 자료가 없어 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS: <http://www.wamis.go.kr>)에서의 일사량을 사용하여 모형에 적용하였다. 모형 내에서 비점오염원 모의뿐만 아니라 점오염원에 대한 고려를 위해 유역 내 오염원 총괄 현황 및 각 환경기초시설에 대한 시설용량 등을 조사하였고, 각 환경기초시설의 방류량과 수질 농도를 모형의 점오염원으로 적용하였다. Table 2는 본 연구에서 점오염원으로 입력한 대저수문에서의 유입량 및 오염부하량과 조만강 유역에 위치한 환경기초시설의 월별 방류량 및 오염부하량을 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1. Land use classification of Seonakdong river catchment

	Area(km <sup>2</sup> )	Area ratio(%)
Urban	26.75	14.83
Paddy	103.88	36.00
Upland	11.17	3.88
Forest	107.33	37.20
Orchard	5.17	1.79
Wetland	37.33	0.01
Water	18.19	6.30
Total	272.53	100.00

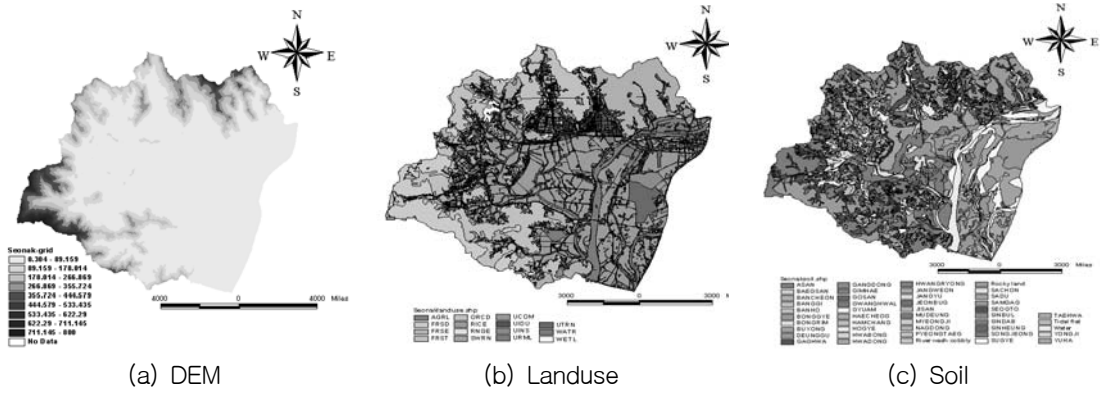


Fig. 3. Seonakdong river watershed

Table 2. Pollution load of point sources in Seonakdong river

Date	Daejeo Gate				Hwamok Sewage Treatment Plant			
	Flow (m/day)	BOD (Kg/day)	TN (Kg/day)	TP (Kg/day)	Flow (m/day)	BOD (Kg/day)	TN (Kg/day)	TP (Kg/day)
2006.01	3.99	1484.07	1343.45	40.38	1.10	523.99	1418.88	114.12
2006.02	6.39	2375.07	2489.76	75.12	1.09	485.14	1351.29	132.93
2006.03	12.52	5190.83	4754.51	150.32	1.07	829.01	1338.91	156.16
2006.04	18.00	5443.83	5144.81	216.20	1.23	875.00	1442.86	133.26
2006.05	14.22	3562.06	4159.66	142.48	1.42	631.68	1430.48	110.19
2006.06	3.18	632.80	811.41	29.44	1.40	489.43	1181.45	122.66
2006.07	0.00	0.00	0.00	0.00	1.84	551.42	1585.89	150.68
2006.08	4.79	662.82	1119.23	60.48	1.46	408.13	1301.64	108.69
2006.09	10.73	1391.12	2512.20	114.07	1.41	355.29	1301.85	110.97
2006.10	9.84	1275.12	1855.39	101.16	1.21	283.83	1234.28	105.38
2006.11	22.39	3094.87	5618.66	199.23	1.19	349.60	1127.64	79.76
2006.12	13.48	2912.37	3436.84	139.79	1.17	457.81	1003.25	61.75
2007.01	9.00	2721.60	2770.81	101.87	1.11	445.84	1019.97	82.47
2007.02	12.21	4115.73	4002.33	165.68	1.17	538.46	1161.54	82.89
2007.03	12.48	4961.59	4087.40	148.85	1.26	564.39	1155.09	84.07
2007.04	10.35	2772.14	2520.78	134.14	1.24	475.94	1025.86	63.68
2007.05	6.24	1348.26	1735.40	79.28	1.38	514.87	943.15	63.09
2007.06	6.23	1021.90	1255.38	72.07	1.40	329.81	931.98	70.78
2007.07	1.60	262.13	378.59	19.87	1.68	423.17	1067.01	103.68
2007.08	3.41	530.52	638.53	50.99	1.62	385.82	1124.02	88.44
2007.09	8.63	1192.32	1924.53	94.64	1.69	240.31	1016.98	115.00
2007.10	7.40	1023.42	1707.47	63.96	1.40	203.97	878.73	65.23
2007.11	18.00	3576.96	4302.29	163.30	1.31	401.22	1028.65	79.36
2007.12	14.95	3487.91	4702.27	161.48	1.31	624.26	1212.23	122.06

## 2.4 수질 및 유량측정

본 연구에서는 미계측유역인 서낙동강 유역의 일유출량 자료를 확보하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 주요 지류 5개 지점과 본류 2개 지점에 실시간 수위관측시스템을 설치하였다. Fig. 5는 각각의 수위관측시스템의 설치현황을 나타낸 것이다. 이 중 5개 주요 지류에 대하여 장기간에 걸쳐서 수위에 따른 유량측정을 실시하였다. 초음파 자동수위계에서 2007년에서 2008년까지 측정된 수위자료를 이용하여 연속적인 유량변화를 산정하기 위하여, 각 지천별 수위-유량관계곡선을 작성하였으며, 이를 이용하여 모형의 검보정에 활용할 수 있는 일유출량 자료를 확보하였다. 또한 수질모의 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 2006년에서 2007년까지 낙본N 단위유역 중 예안천, 주중천, 신어천, 조만강 등의 지천내 소유역 말단부에서 8일 간격으로 측정된 수질자료를

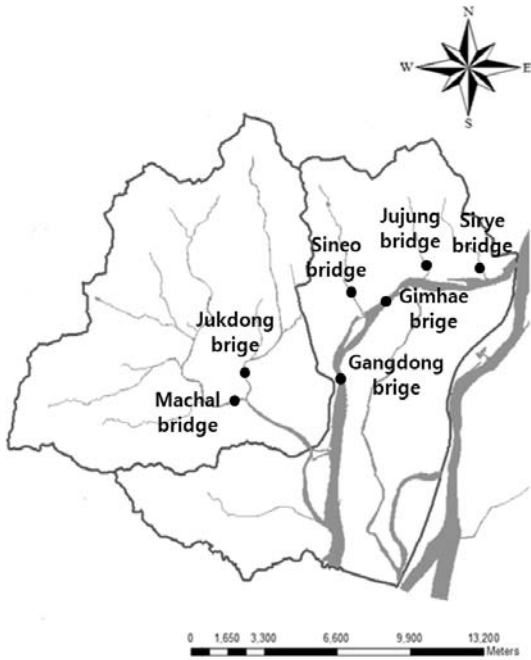


Fig. 4. Location map of gauging stations in Seonakdong river

사용하여 모형의 보정 및 검증을 수행하였다. 수질측정 방법은 수질공정시험법에 준하여 실시하였으며, 수질측정 위치는 Fig. 4에서 표기된 5개 지점에서 측정된 자료로, 수질항목 및 분석방법은 Table 3과 같다. 오염부하량 산정을 위한 8일 간격의 유량측정 위치는 Fig. 4에서 수질측정 위치와 동일하며, 유속 측정은 수심이 깊은 곳은 교량위 측정을 하였고, 그 밖의 작은 지천들은 도섭법을 이용하였으며, Valeport사의 1차원 프로펠라 유속계인 BFM001과 BFM002를 이용하였다.

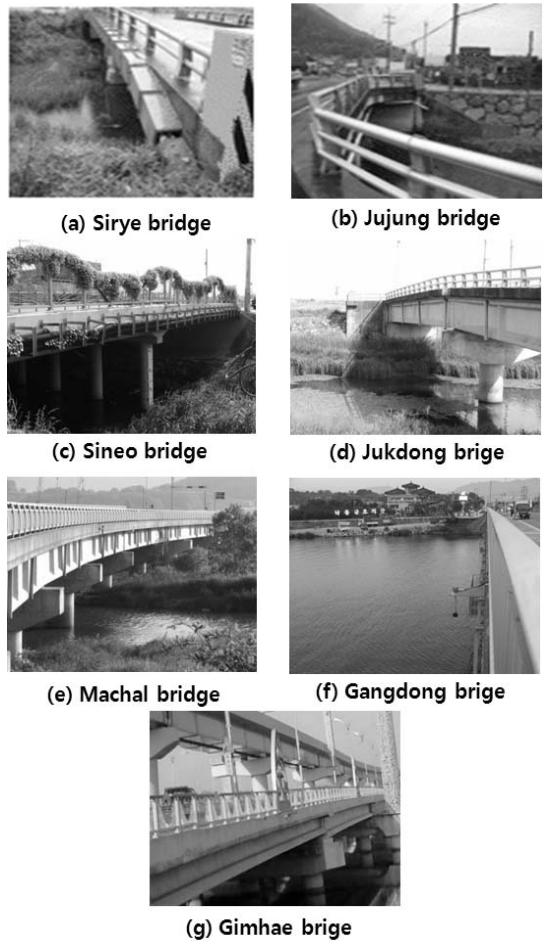


Fig. 5. Photographs of gauging stations in Seonakdong river and tributaries

Table 3. Method of measurement for water quality items

Measurement Item	Unit	Analysis Method	Remarks
BOD5	mg/ℓ	Winkler-Sodium azide Modification	Korean Standard Methods for Quality
SS	mg/ℓ	GF/C Method	Korean Standard Methods for Quality
TN	mg-N/ℓ	UV absorption spectrotometer (Alkaline Potassium Persulfate Method)	Korean Standard Methods for Quality
TP	mg-P/ℓ	Absorption metric Analysis (Ascorbic acid reductionism)	Korean Standard Methods for Quality

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 민감도 분석

많은 매개변수들을 가진 SWAT 모형과 같이 복잡한 유역모형의 경우, 실제적으로 모든 매개변수 값들을 한정된 자료로부터 직접 추정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 모든 매개변수들을 고려하여 검정을 하기보다는 유출 및 수질 변화에 중요한 영향을 미치는 매개변수 중 유량부분 10개, 수질부분 13개를 선정하여 서낙동강 유역에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 물리적인 매개변수(토양의 종류, 토지형태 등)는 검정 대상이 되지 않으므로 지하침투, 지표유출, 증발산 등 수문학적 매개변수 중 유출과 수질에 관련된 매개변수들에 대하여 민감도분석을 수행하였다.

서낙동강유역에 대한 SWAT 모형의 민감도분석을 실시한 결과 1% 이상 변화를 하는 매개변수들

은 각 토양층의 가용토양수분능(SOL\_AWC), 지하수 지체시간(GW\_DELAY), 유출곡선지수 CN값(CN2), 각 토양층의 유기탄소 함양(SOL\_CBN), 침전에 의한 BOD 제거율(USLE\_K), BOD 분해율 계수(RK1, RK3)들이 유출과 수질에 민감하게 영향을 주는 매개변수들임을 알 수 있었다(Fig. 6과 Fig. 7 참조). 상대적으로 민감도가 낮은 매개변수들을 살펴보면 유출에서는 기저유출 감수 상수(ALPHA\_BF), 기저유량에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량(GWQMN), 얇은 대수층은 REVAP 계수(GW\_REVAP), 침투에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량(REVAPMN), 토양증발 보상계수(ESCO) 등이 있고, 수질에서는 질산 침투 계수(NPERCO), 인산 침투 계수(PREPERCO) 등이 있다. 서낙동강 유역의 대부분은 농지와 숲으로 이루어져있어서 강우 발생 후 농지와 숲에서 나오는 유출은 그 농지를 이루고 있는 토양의 상태와 형태에 따라 유출량이 변화되어 민감한 것으로 판단된다.

Table 4. Model parameters used for annual runoff

Contents	Variable name	Input file	Default value
Runoff	SOL_AWC	.sol	each value
	GW_DELAY	.gw	31
	CN2	.sub	0.014
	ALPHA_BF	.gw	0.048

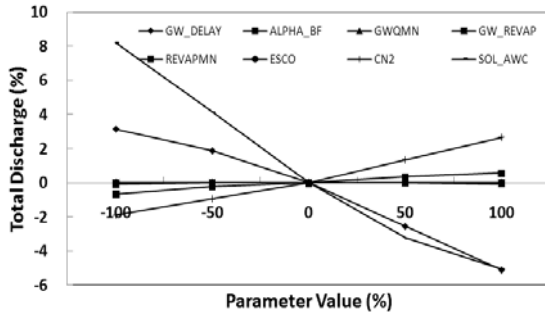


Fig. 6. Sensitivity analysis for streamflow

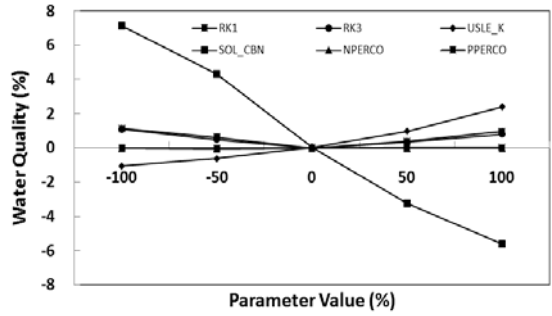


Fig. 7. Sensitivity analysis for water quality

### 3.2 모형의 보정 및 검증

서낙동강 유역에 대한 SWAT 모형을 적용함에 있어 민감도 분석을 수행한 후 민감도가 높은 매개변수를 중심으로 보정을 수행하기 위해 조만강 유역 내 실시간 수위계가 설치된 주요 5개 지점 중 상대적으로 수위-유량관계곡선의 정확도가 양호한 것으로 나타난 죽동교와 마찰교 지점의 유량 자료를 이용하였다. 이때 조만강 유역에 위치한 화목하수처리장의 방류수를 점오염원으로 고려하여 모의하였다. 앞서 실시한 민감도 분석에 따라 유출에 대해서는 각 토양층의 가용토양수분능 (SOL\_AWC), 지하수 지체시간(GW\_DELAY), 유출곡선지수 CN값(CN2) 등에 대해서 보정을 실시하였고 수질부분에서는 각 토양층의 유기탄소 함량(SOL\_CBN), 침전에 의한 BOD 제거율 (USLE\_K), BOD 분해율 계수(RK1, RK3) 등을 보정하였다. 국가 수위 및 수질 측정망이 없는 관계로 실시간 수위관측시스템 구축 시작년도에

따라 본 연구기간은 2007년부터 1년으로 설정하여 2007년 1월~5월 까지 모델의 안정화기간으로 하였으며 2008년 6월~8월을 보정기간, 2008년 9월~12월을 보정기간으로 하였다. 일별 유출을 검정한 결과 결정계수( $R^2$ )값 0.86이며, 수질에 대한 결정계수는 0.70 이상으로 높게 나타났다. 모형의 검정에 적용한 매개변수를 이용하여 검증한 결과, 일별 유출에 대한 결정계수는 0.81이며, 수질은 0.51 이상으로 나타났다. Ramanarayanan 등(1997)은 결정계수가 0.5 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제안하였다. 따라서 구축된 SWAT 모형은 서낙동강 유역에 대하여 유량 및 수질 모의에 적합한 것으로 판단된다. Fig. 8에서 Fig. 9는 유출량과 수질항목에 대한 보정결과를 도시한 것이며, Fig. 10에서 Fig. 11은 유출량과 수질항목에 대한 검증 결과를 도시한 것이며, Table 4는 보정 및 검증에 대한 결정계수 값을 나타낸 것이다.

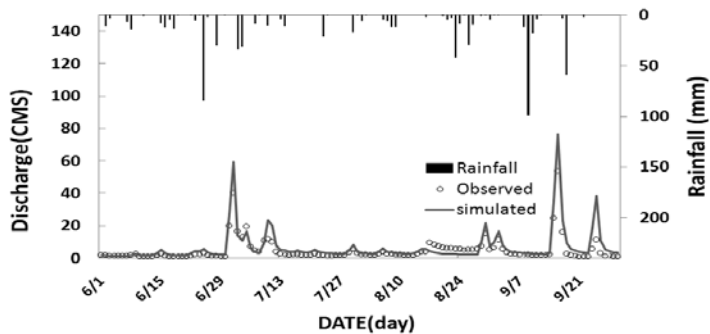


Fig. 8. Calibration results for streamflow in SWAT model



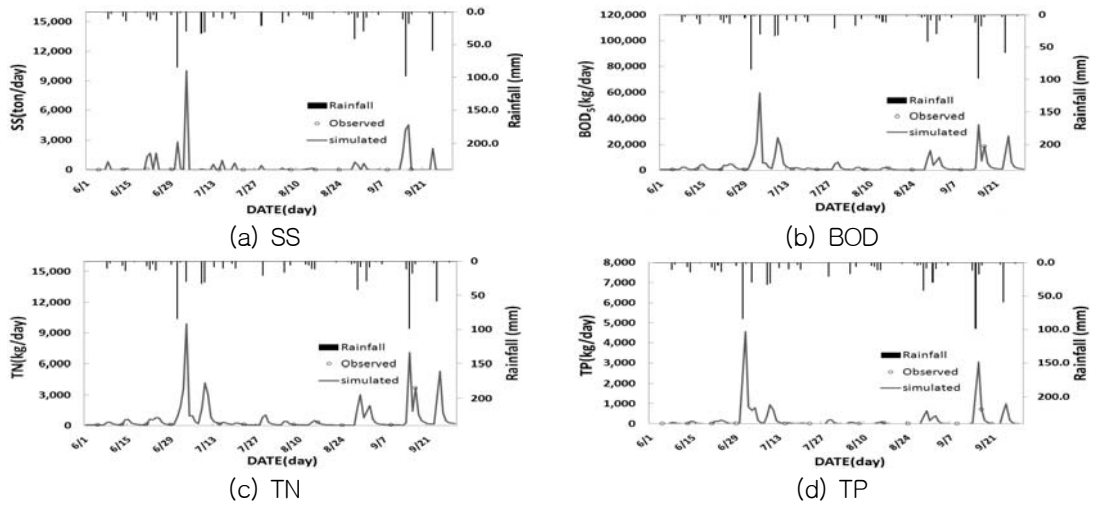


Fig. 9. Calibration results for water quality in SWAT model

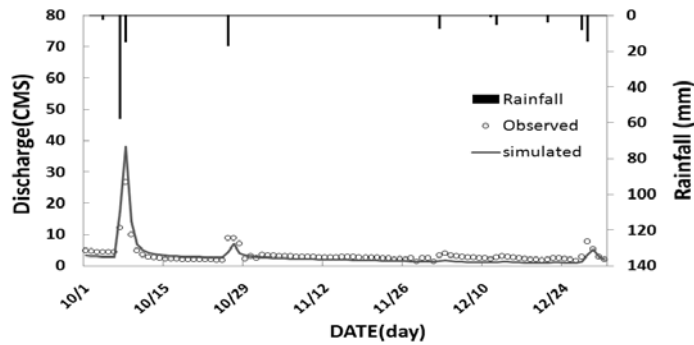


Fig. 10. Verification results for streamflow in SWAT model

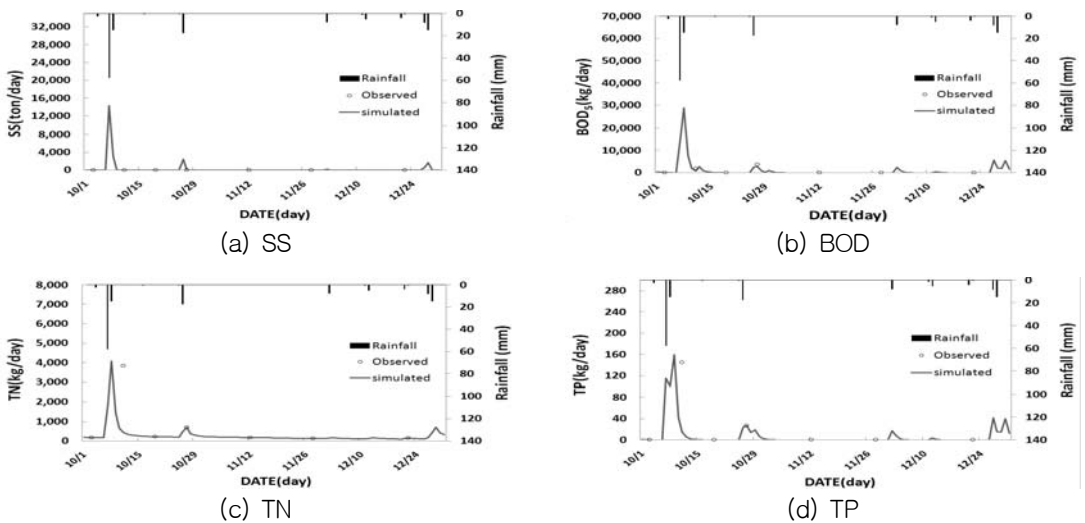


Fig. 11. Verification results for water quality in SWAT model

Table 4. Correlation coefficient of runoff and water quality

	Discharge	SS	BOD <sub>5</sub>	TN	TP
Calibration	0.86	0.83	0.75	0.71	0.73
Verification	0.81	0.59	0.63	0.51	0.67

### 3.3 수문운영에 따른 수질 분석

본 연구에서 대저수문 유입량 자료는 2007년 부산광역시 강서구청에서 관측한 자료를 이용하였다. 대저수문의 유입총량과 SWAT에서 일 단위로 모의된 부하량을 농도로 환산하여 대저수문에서의 유입량 증가에 따른 서낙동강의 말단지점인 녹산수문 인근에서의 BOD, T-N, T-P 농도변화를 분석하였다(Fig. 12~Fig. 14 참조). 6월 13일 대저수문 개방전에는 BOD 6.1 ppm, T-N 0.87 ppm, T-P 0.096 ppm이었으며, 6월 14일까지 양일간 21.4 mm의 강우발생으로 인하여 일시적으로 BOD 13.7 ppm, T-N 1.96 ppm, T-P 0.415 ppm까지 급격한 상승이 일어났으나, 6월 14일에서 18일까지 약 8백만 ton이 대저수문으로부터 유입된 이후에는 6월 19일 BOD 4.2 ppm, T-N 0.60 ppm, TP 0.013 ppm으로 떨어지는

것을 확인할 수 있다. 또한 7월 29일 21.3 mm의 강우로 인하여 BOD 11.6 ppm, T-N 1.94 ppm, T-P 0.425 ppm까지 상승하나, 7월 30일 대저수문에서 약 4백만 ton을 유입시킴으로써 7월 31일 기준으로 BOD 5.6 ppm, T-N 0.93 ppm, T-P 0.155 ppm까지 낮아지는 것으로 나타났다. 9월 10일에서 9월 13일까지는 4일에 걸쳐서 대저수문으로부터 약 9백5십만 ton이 유입되어 BOD 1.6 ppm, T-N 0.31 ppm, T-P 0.001 ppm으로 비교적 양호한 수질을 유지하나, 대저수문 개방 직후인 9월 14일에서 9월 17일까지 3일에 걸쳐서 128.7 mm의 강우량이 발생하여 BOD 9.3 ppm, T-N 1.87 ppm, T-P 0.361 ppm까지 상승하는 것으로 나타났다. 이후 9월 24일 59.2 mm의 강우가 추가로 발생하여 9월 27일에서 29일까지 3일간 일평균 4백만 ton씩 방류된 후인 9월 30일 기준의 하천 수질이 BOD 3.5 ppm, T-N

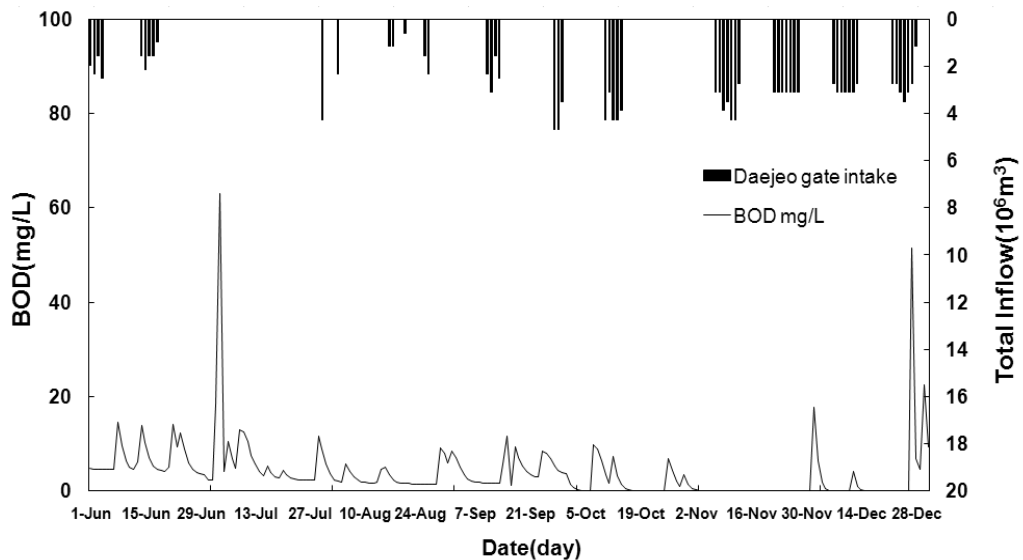


Fig. 12. BOD concentration and total inflow from Daejeo gate

0.71 ppm, T-P 0.009 ppm로서 상당히 오랜 기간 동안에 양호한 수질을 유지되었다. 일반적으로 대저수문이 위치한 낙동강 본류의 수질이 서낙동강 본류의 수질보다 좋기 때문에 이와 같이 수문 운영을 통해 낙동강 본류수를 유입하는 것은 서낙동강의 하천 유향을 개선하고, 이에 따라 주요 수질항목의 농도가 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, T-N이나 T-P와 같은 영양물질들

은 유사와 연관이 깊어서 강우에 의해 일어나는 유사유출의 영향을 많이 받는다. 따라서 강우시 비점오염원이 발생하여 하천내 유입되는 오염부하량이 높은 시기에 대저수문과 녹산수문의 개폐를 조절하여 하천 유량을 증가시키고, 이에 따른 수질개선 효과를 얻는다면 유역의 오염부하량 관리와 더불어 서낙동강 수계의 수질관리에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

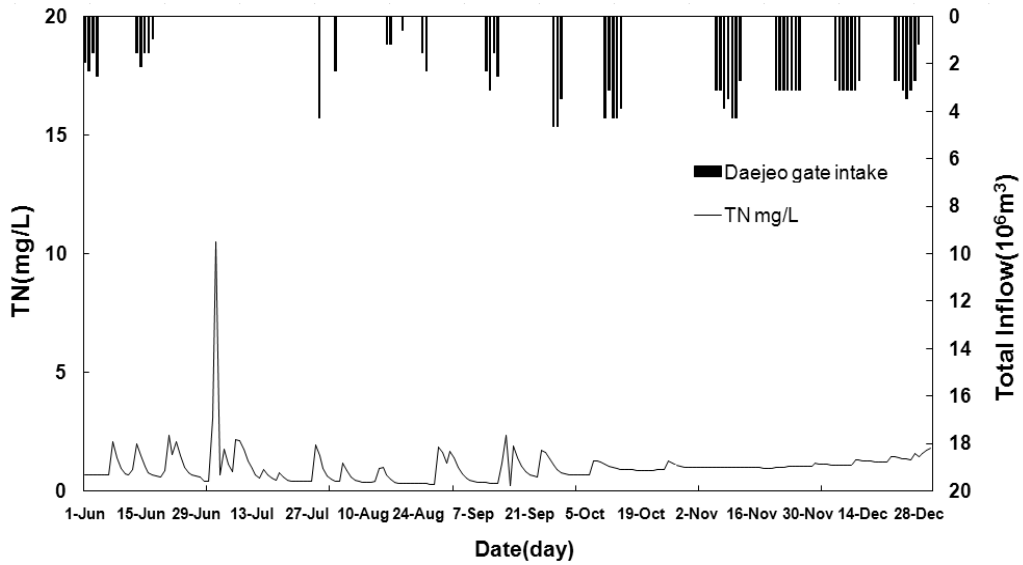


Fig. 13. T-N concentration and total inflow from Daejeo gate

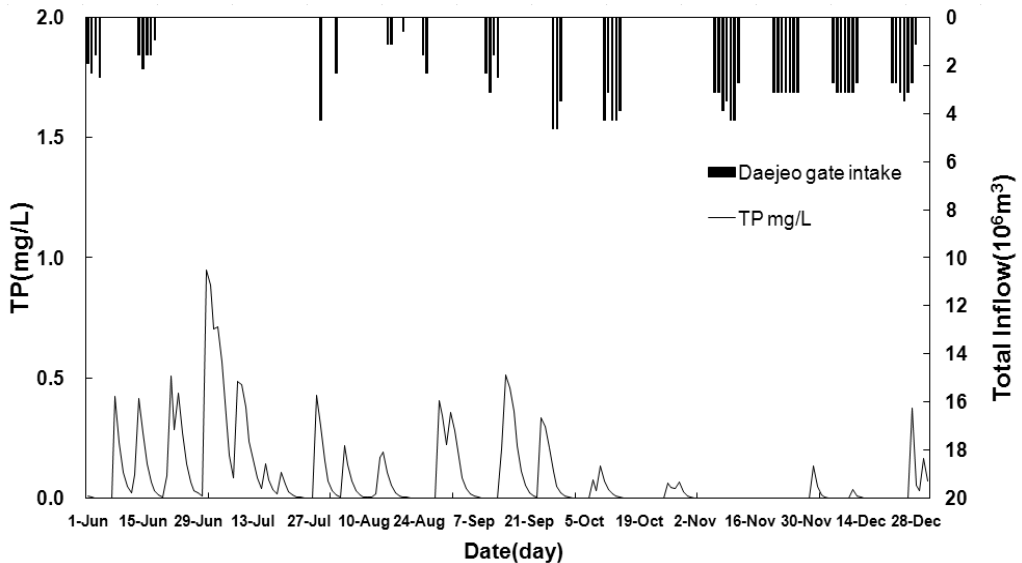


Fig. 14. T-P concentration and total inflow from Daejeo gate

## 4. 결 론

본 연구를 통해 정체 수역 형태를 지니고 있는 서낙동강에 대한 유출 및 수질 현상을 분석하기 위해 서낙동강 유역에 대한 민감한 매개변수들을 분석하였으며, 2006~2007년까지 유량 및 수질측정을 수행하여 모형의 검증 및 검증을 수행하였다. 또한 수문운영에 따른 서낙동강에 대한 BOD 부하량을 분석하여 수질관리에 대한 자료를 제공하고자 하였다.

- 1) 서낙동강 유역에 대하여 강우-유출에 따른 수질변화를 모의하기 위해 매개변수들에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, 토양층의 가용토양수분능, 지하수 지체시간, 유출곡선 지수, 각 토양층의 유기탄소 함양, 침전에 의한 BOD 제거율 및 분해율 계수들이 유출과 수질에 민감한 변수들로 나타났고 서낙동강 유역의 대부분은 농지와 숲으로 이루어져 있어 강우 발생으로 인한 토양의 상태와 형태에 따라 유출량 변화가 수질에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.
- 2) 서낙동강 유역의 대부분은 농지와 숲으로 이루어져 있어 강우 발생으로 인한 토양의 상태와 형태에 따라 유출량 변화가 수질에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 2006~2007년까지 유량 및 수질측정 자료들을 이용하여 SAWT 모형을 보정 및 검증을 수행한 결과, Ramanarayanan 등(1997)이 제안한 결정계수 0.5 이상으로 본 연구에서 구축한 유역모형이 서낙동강의 유역 유출 및 오염부하 현상을 잘 모의함을 알 수 있었다.
- 4) 정체수역인 서낙동강에 대한 대저수문 유입량 자료를 이용하여 대저수문 유입시와 비유입시 서낙동강의 BOD, T-N, T-P 농도변화를 분석한 결과, 강우유출로 인한 비점오염원 발생시와 대저수문 비개방시 BOD, T-N, T-P는 증가하는 것으로 나타났으며,

대저수문 개방시에는 상대적으로 저농도인 낙동강 본류의 원수 유입으로 인하여 하천의 유황이 개선되고, BOD, T-N, T-P가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구결과를 활용하면 서낙동강 유역내 오염부하량 관리와 더불어 적절한 수문 운영을 통한 추가적인 수질개선 방안을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2006년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(331-2006-1-D00595).

## 참 고 문 헌

- 경남지역환경기술개발센터. 2007. 서낙동강 대저수문과 녹산수문 운영시 유량 및 수질 모니터링. *인제대학교 낙동강유역환경연구센터 연구보고서*.
- 김보경, 김상단, 이은태, 김형수. 2007. SWAT 모형 매개변수의 적정 범위 추정방법개발: 임하호 유입량 및 부유사량에의 적용. *대한토목학회논문집*, 27(6B): pp 661-668.
- 김연수, 김수전, 김형수. 2011. HEC-HMS 모형에 의한 장기유출량과 EFDC 모형을 이용한 호소내 수질특성 분석, *한국습지학회지*, 13(3): pp. 707-720
- 김정민, 김영도(2011). SWAT-SWMM 연계모형을 이용한 서낙동강 오염부하량 산정 방안 연구, *상하수도학회지*, 25(6): pp. 825-837.
- 김해시.2006. *낙동강수계 낙본 N 단위유역 경상남도 김해시 오염총량관리 시행계획*.
- 박민지, 신형진, 박근애, 김성준. 2010. SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 미래 수자원 영향 평가. *대한토목학회논문집*, 30(4B): pp. 337-346.
- 박윤식, 김종건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동,

- 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재. 2007. 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4): pp. 467-473.
- 박종윤, 박민지, 안소라, 김성준. 2009. 기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는 영향평가를 위한 유역 모델링. *한국수자원학회논문집*, **42**(10): pp. 877-889.
- 서낙동강관계기관합동. 2005. *서낙동강수질개선종합대책*.
- 예령, 정세웅, 이홍수, 윤성완, 정희영. 2009. SWAT 모형을 이용한 대청댐 유역의 기후인자에 따른 유출 및 유사량 민감도 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(1): pp. 7-17.
- 이남주, 김영도, 권재현, 신찬기. 2007. 수문운영에 따른 서낙동강 수질변화에 관한 이차원 수치모의. *상하수도학회지*, **21**(1): pp. 101-112.
- 이종소, 김수전, 김덕길, 강나래, 김형수. 2011. SWAT 모형을 이용한 미계측 유역의 수리계수 산정. *한국습지학회지*, **12**(2): pp. 319-327.
- 정은성, 이길성, 신문주. 2006. SWAT 모형과 EMC 산정결과를 이용한 안양천의 수량 및 수질 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(4): pp. 648-657.
- 최대규, 신현식, 윤영삼, 김상단. 2009. SWAT 모형을 이용한 영양물질 모의 및 유달을 추정에의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(3): pp. 375-385.
- 최정화, 이정주, 권현한. 2009. 조경천 유역의 도시화에 따른 유출 변화 추이 분석. *한국습지학회지*. **11**(3): pp. 161-169.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Srinivasan, R., and King, K. W.. 1996. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual. USDA, Agriculture Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Ramanarayanan, T.S., and DiLuzio, M.. 1999. Water resources of the Texas Gulf basin. *Water Science Technology*, **39**(3): pp. 121-133.
- Hwang, J.Y., Kim, Y.D., Kwon, J.H., Park, J.H., Noh, J.W., Yi, Y.K.. 2011. "Numerical Modeling for Water Quality Management of Seonakdong River in Korea." *Desalination and Water Treatment*, (in press).
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M. and McFarland, A. M. S.. 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. Minnea-polis, MN. Paper No. 97-2209
- Smithers, J.C. and Engel, B.A.. 1996. An initial assessment of SWAT as a hydrological modeling tool for the Midwest USA. ASAE, No. 96-2065.

- 논문접수일 : 2011년 10월 28일
- 심사의뢰일 : 2011년 10월 31일
- 심사완료일 : 2012년 01월 17일