

## BASINS/SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 오염부하 배출 특성

장재호 · 윤춘경\* · 정광욱<sup>1</sup> · 이새봄

(건국대학교 환경과학과, <sup>1</sup>한국수계환경연구소)

**Characteristics of Pollution Loading from Kyongan Stream Watershed by BASINS/SWAT. Jang, Jae-ho, Chun-Gyeong Yoon\*, Kwang-wook Jung<sup>1</sup> and Sae-Bom Lee (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; <sup>1</sup>Korea Water Environment Research Institute, KWERI, Seoul 143-837, Korea)**

A mathematical modeling program called Soil and Water Assessment Tool (SWAT) developed by USDA was applied to Kyongan stream watershed. It was run under BASINS (Better Assessment Science for Integrating point and Non-point Sources) program, and the model was calibrated and validated using KTMDL monitoring data of 2004~2008. The model efficiency of flow ranged from very good to fair in comparison between simulated and observed data and it was good in the water quality parameters like flow range. The model reliability and performance were within the expectation considering complexity of the watershed and pollutant sources. The results of pollutant loads estimation as yearly (2004~2008), pollutant loadings from 2006 were higher than rest of year caused by high precipitation and flow. Average non-point source (NPS) pollution rates were 30.4%, 45.3%, 28.1% for SS, TN and TP respectively. The NPS pollutant loading for SS, TN and TP during the monsoon rainy season (June to September) was about 61.8~88.7% of total NPS pollutant loading, and flow volume was also in a similar range. SS concentration depended on precipitation and pollution loading patterns, but TN and TP concentration was not necessarily high during the rainy season, and showed a decreasing trend with increasing water flow. SWAT based on BASINS was applied to the Kyongan stream watershed successfully without difficulty, and it was found that the model could be used conveniently to assess watershed characteristics and to estimate pollutant loading including point and non-point sources in watershed scale.

**Key words : BASINS, non-point source, point source, pollutant loads, SWAT**

### 서 론

팔당호는 서울, 경기, 강원, 충청권에 거주하고 있는 2천 3백만 명 이상의 인구에 대한 식수원을 제공할 뿐만 아니라, 공업용수 및 농업용수원, 최근에는 레저용수로서

의 중요한 역할을 하고 있다. 팔당호는 서로 다른 특징을 갖는 3개의 유입하천 중 경안천(2.5%)의 경우 남한강(57%)과 북한강(40.5%)에 비해 매우 적은 수량으로 유입되나 유입하천 부하가 팔당호 수질에 미치는 영향(BOD<sub>5</sub> 부하 66%)이 큰 것으로 나타나 많은 연구자들의 관심이 집중되어 왔으며(공 등, 2006; 박 등, 2008), 수질

\* Corresponding author: Tel: (02) 450-3747, Fax: (02) 446-2543, E-mail: chunyoonyoon@konkuk.ac.kr

개선을 위한 정부의 다양한 노력이 이루어지고 있다.

경안천 유역은 수도권에 인접하고 있어 개발 요구에 따라 토지이용도가 지속적으로 변화하고 있으며, 개발에 따른 오염원의 영향으로 수질오염이 취약한 상태이다. 또한 주거지, 도로, 농경지, 산지, 공사장 등 불특정 장소에서 다양한 경로로 배출되는 비점오염원에 의한 오염부하량이 매년 증가하고 있으며, 팔당상수원의 경우 전체 BOD 배출량의 44.5%가 비점오염원에서 배출되고, 2020년에는 54.3%까지 증가할 것으로 예측되고 있다(환경부, 2000). 따라서 상류유역의 점·비점오염원에 대한 관리 없이는 팔당 상수원의 수질개선 목표 달성에 한계가 있음을 시사한다. 비점오염원의 경우 시기별 변화가 크고 유역의 기상·수문·지형특성 등에 따라 많은 영향을 받기 때문에 정량적인 평가를 위해서는 강우시는 물론 비강우시 다양한 유역조건에 따른 유량·수질 관측자료가 필요하나 유량이나 비점오염물질의 측정이 어렵고 많은 예산과 노력이 요구된다. 또한 축적된 관측자료가 충분하다 하더라도 유역의 다양한 환경을 반영하기 어려워 비점오염물질의 배출특성을 정량화 하기에는 한계가 있다. 최근 유역의 수문·수질영향에 대한 기술적 분석은 환경부에서 시행하고 있는 오염총량관리제와 연계하여 고려할 필요가 있다. 오염총량관리는 수질모델링에 관한 조항을 포함하고 있으며 수역의 환경용량과 할당부하량 산정 및 목표수질 달성여부 판단 등 오염총량관리계획의 시행 과정에서 모델이 활용될 수 있다(박 등, 2008). 유역에 대한 전반적인 특성 즉, 다양한 강우사상, 유역 내 유량, 오염원의 유출기작 등을 고려한 장기적인 평가는 모델링을 통해 쉽게 이루어질 수 있으며, 충분한 실측자료를 바탕으로 모델을 검·보정함으로써 모델링 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다.

유역모델은 적용지역과 모델의 복잡성, 계산시간에 따라 다양하게 구분할 수 있는데, 대표적인 모델로는 AGNPS(강 등, 2003; 유 등, 2004), GWLF(황 등, 2006), ANSWERS, SWRRB(박 등, 2000), SWMM(윤 등, 2001; 장 등, 2006), HSPF(정 등, 2007; Jeon *et al.*, 2007) 그리고 SWAT(Kang *et al.*, 2006; 김과 김, 2008) 등이 있으며 최근까지 국내에서 다양한 연구분야에 활용되어 왔다. 위 언급된 유역모델 중 유역의 최적관리기법(BMPs) 및 오염총량관리(TMDLs) 등의 목적을 위해 HSPF와 SWAT이 광범위하게 사용되고 있으며(강과 박, 2003; 강, 2005; 황, 2007; 허 등, 2008), BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and non-point Source)와 통합·운용되고 있다. BASINS는 GIS, 방대한 유역자료 그리고 환경평가 및 모델링 툴을 하나의 패키지로 통합하는 유

역 및 수질평가시스템이며, 유역관리를 위한 TMDLs를 지원하고 있다. 특히 SWAT은 농촌유역의 수질관리에 적합한 모델로서 건설기술연구원에 의해 국내 적용성이 개선되고 있으며, 수자원공사와 같은 공공기관, 학교기관 및 개개의 연구자들에 의해 그 활용이 지속적으로 증가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 팔당호 수질에 직접적으로 영향을 주는 경안천 유역을 대상으로 유역 내 점·비점오염원에 따른 시기별 오염물질 발생 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 BASINS기반의 SWAT 모델을 적용하였으며, 경안천 유역의 효율적인 수질관리 방안을 마련하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구지역

유역면적이 589.3 km<sup>2</sup>에 달하는 경안천 유역은 동경 127°, 북위 37°에 위치하고 있으며, 하천유로연장은 약 47.4 km이고 평균유량은 약 5.4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이다. 연평균 강우량이 1,228.6 mm이지만 상류에 대형 저수지가 없어 유역에 내린 강우가 지체 없이 하천수로 유입된다. 갈수기와 저수기에는 유량이 적고 수심이 얕으며 물의 정체가 심해 바닥에 퇴적물이 많이 쌓인다(최 등, 2008). 이렇게 쌓인 퇴적물은 강우시에 팔당호로 유입되어 수질을 악화시킬 수 있다. 경안천 유역은 높은 인구밀도(466.6 인 km<sup>-2</sup>)와 급속한 도시화의 진행으로 오염원 증가가 예상되며, 팔당호의 수질과 직접적인 관계가 있기 때문에 이에 대한 경안천 유역의 수질오염 관리가 절실히 필요하다. 따라서 강우시 다양한 경로로 배출되는 비점오염원의 관리가 우선적으로 요구되며, 또한 경안천을 유하하는 50만 톤 일<sup>-1</sup> 중 약 1/5가량이 용인하수처리장과 광주시 하수처리장에서 방류되는 재처리수이므로(한강유역환경청, 2007) 갈수기와 저수기에는 하천유량의 많은 부분을 차지하게 되며, 이 시기(10~11월, 3~5월)에도 수질관리가 필요하다.

### 2. SWAT 모델

미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT 모델은 일 단위 모의가 가능한 준분포형 장기 강우-유출 모델로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용

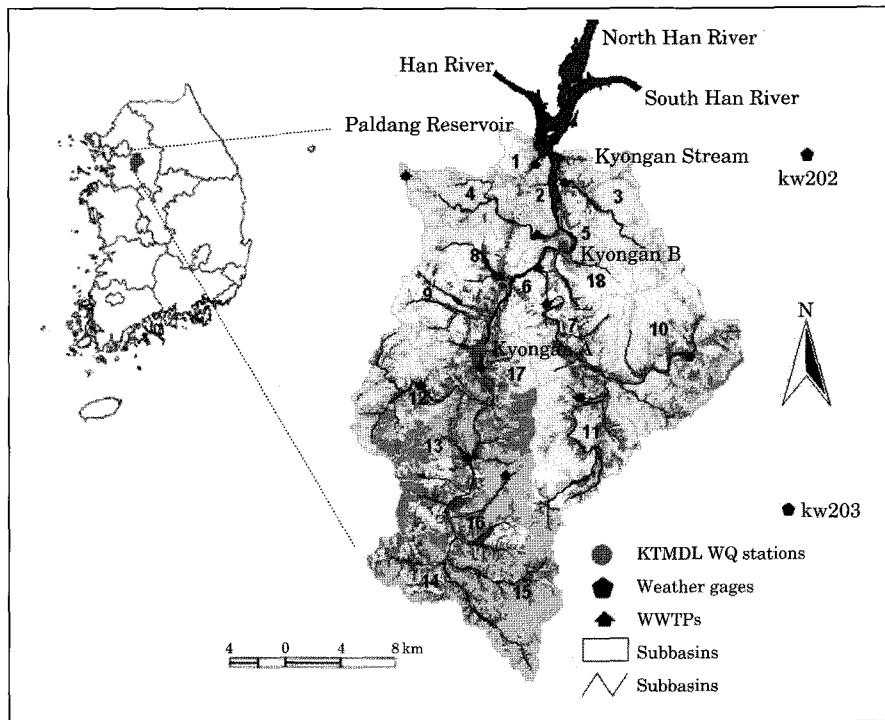


Fig. 1. The Kyongan stream watershed and monitoring stations.

및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발되었으며, 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모모델(sub-model)로 구성되어 있다(Arnold *et al.*, 1998). 수문 부모모델은 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit)로 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모델을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산하고 증발산량은 Hargreaves방법, Priestley-Taylor방법과 Penman Monteith 방법을 제공하며 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하는 Ritchie방법을 이용한다. 동일한 토지이용도와 토양도의 조합으로 구성된 수문반응 단위(HRU)를 중심으로 MUSLE(Williams and Berndt, 1975)기법을 통해 산정된 유사발생량을 하도추적과 병행하여 유사농도를 예측하고 총 질소 및 총 인과 살충제와 같은 유기성 화학물질의 이동량도 함께 모의할 수 있다는 장점이 있다. SWAT은 모델의 구동을 위한 입력자료 및 인자가 방대하기 때문에 USEPA에서 개발한 BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources)와 연계하여 사용되고 있는데, BASINS은 유역관리를 위

한 TMDL을 효과적으로 지원하는 tool로서 유역을 분할하고 각각의 분할된 유역에 대하여 토지이용상태를 분류하며, 모델링을 위한 초기값을 손쉽게 생성시켜 줌으로써 SWAT 모델의 적용을 더욱 용이하도록 돕고 있다.

### 3. 모델 입력자료 구축

모델구축을 위해서 대상 유역의 GIS 자료, 오염원자료 및 기상자료 등을 수집하였고 BASINS을 이용하여 모델을 구축하였다. GIS 기반의 공간입력 자료로서 대상유역에 대한 수치고도자료(DEM)는 환경지리정보서비스(<http://egis.me.go.kr/egis>)에서 제공되고 있는 수치지도(환경부, 2003)를 이용하여 등고자료를 추출한 후 GIS 프로그램에 의해 30 m × 30 m 격자크기의 수치지도 파일을 구축하였으며, 이를 이용하여 하천도를 생성했으며, DEM과 하천도를 이용하여 대상유역 경계를 추출하였다. 환경부 오염총량관리제에 의해 시행되고 있는 8일 간격 유량 및 수질관측지점을 고려하여 BASINS의 Automatic Delineate Tool을 이용하여 18개의 소유역 경계를 추출하였다. 토지피복도는 환경지리정보서비스에서 제공하는 1:25,000 중분류 토지피복자료(환경부, 2007)를 이용하였는데, 그 결과 산림이 65.0%, 농경지와 주거지역이 각각

16.4%, 11.2%로 나타났다(Table 1). 경안천 유역 내 토양 속성은 농촌진흥청 농업과학기술원 (NIAST, 2000)에서 제공해 주는 정밀토양도(1:25,000)를 활용하여 소유역별 토양특성과 토지이용특성을 중첩하고 HRUs를 생성하였다.

모델 적용기간은 2004~2008년으로 이 기간에 대한 일별 강우자료와 증발산량 산정을 위해 일별 기온(최대·최저기온), 풍속, 태양복사량 및 상대습도 자료는 수

원, 양평, 이천 등의 기상청 관측소 자료를 이용하였으며, 각각의 기상인자에 대한 일별 자료를 dbf파일 형태로 작성하여 모델에 입력하였다.

수질 모의를 위한 점오염원 자료는 경안천 유역의 모든 환경기초시설에 대한 방류량자료를 수집하였다(환경부, 2003). 유역 내 환경기초시설은 하수종말처리장 11개소, 마을하수처리장 4개소, 분뇨처리장 3개소, 축산폐수처리장 2개소로 총 20개소로 조사되었으며, 각 시설별 배

**Table 1.** Land use characteristic of this study area.

Land use	Forest	Paddy	Cropland	Pasture	Urban	Water	Etc.
Area (km <sup>2</sup> )	189.5	40.8	87.2	44.7	132.9	21.8	72.5
% area	65.0	8.0	8.4	3.1	11.2	2.2	2.2

**Table 2.** List of adjusted parameters for calibration of SWAT model.

Variable name	Definition	Manual range	Calibrated value
<b>Hydrology</b>			
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0~1.0	0.98
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01~150.0	120, 150
CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	-0.01~0.30	0.020, 0.036
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0~1.0	0.92
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	0~1.0	0.789
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur	0~500.0	500.0
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0~5000.0	0.0
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02~0.2	0.02
<b>Sediment</b>			
SLOPE	Average slope steepness	0~0.6	0.157
SLSUBBSN	Average slope length	10.0~150.0	10.0
CH_EROD	Channel erodability factor	-0.05~0.6	0.6
CH_COV	Channel cover factor	-0.001~1.0	1.0
PRF	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	0.0~2.0	0.04
SPCON	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing	0.0001~0.01	0.006
SPEXP	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing	1.0~1.5	1.5
<b>Nutrients</b>			
GWNO3	Concentration of nitrate in ground water contribution to streamflow from subbasin	0~1000.0	1.5, 3.5
GWSOLP	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to stream flow from subbasin	0~1000.0	0.02
RS1	Local algal settling rate in the reach at 20°C (m day <sup>-1</sup> )	0.15~1.82	0.2, 0.6
RS2	Benthic (sediment) source rate for dissolved phosphorus in the reach at 20°C (mg dissolved p m <sup>-2</sup> · day)	0.001~0.1	0.001, 0.01
RS3	Benthic source rate for NH <sub>4</sub> -N in the reach at 20°C (mg NH <sub>4</sub> -N m <sup>-2</sup> · day)	0~1.0	1.0
RS4	Rate coefficient for organic N settling in the reach at 20°C (1 day <sup>-1</sup> )	0.001~0.1	0.01, 0.05
RS5	Organic phosphorus settling rate in the reach at 20°C (1 day <sup>-1</sup> )	0.001~0.1	0.001, 0.07
BC1	Rate constant for biological oxidation of NH <sub>4</sub> to NO <sub>2</sub> in the reach at 20°C	0.1~1.0	0.1, 0.15
BC2	Rate constant for biological oxidation of NO <sub>2</sub> to NO <sub>3</sub> in the reach at 20°C	0.2~2.0	1.2
BC3	Rate constant for hydrolysis of organic N to NH <sub>4</sub> in the reach at 20°C	0.2~0.4	0.4
BC4	Rate constant for mineralization of organic P to dissolved P in the reach at 20°C	0.01~0.7	0.25, 0.01

출되는 방류량과 부유물질, 총질소 및 총인의 수질로부터 하천 관측수질자료의 태별 질소 및 인의 비율을 고려하여 모델 입력에 필요한 모든 항목(FLO, SED, ORGN, NO<sub>3</sub>, MINP, NH<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub>)별 일 단위 배출부하량을 산정하였다.

#### 4. 모델의 검 · 보정

모의 결과의 안정화를 위해 2001~2003년을 준비기간으로 추가 모의하였으며, 분석기간은 2004~2008년을 대상으로 하였다. 모델의 보정은 2004년 8월부터 2006년까지, 검정은 2007년부터 2008년까지 수행되었으며 2004년 8월부터 현재까지 8일 간격으로 측정된 경안 A와 경안 B지점의 실측자료를 이용하였다. 모델 검 · 보정은 연중 일별자료를 중심으로 이루어졌으며, 시 · 공간적 변화에 따른 유량 및 수질의 모의를 위해서는 해당 연도별 토지이용자료를 사용하여야 하지만, 자료의 부족으로 본 연구에서는 보정기간 동안 토지이용변화는 없는 것으로 가정하여 보정하였다. SWAT 모델은 유역의 수문 · 수질 과정을 가능한 현실적으로 모의하기 위해 개발되었기 때문에 모델 매개 변수의 대부분은 물리적, 과학적 근거에 기초한다. 매개변수 보정 방법에는 크게 시행착오법, 최적화기법에 의한 자동보정법 등이 있는데, SWAT과 같이 매개변수의 양이 많은 유역모델의 경우 시행착오법이 이용되고 있다(Feyen *et al.*, 2000). 본 연구에서 적용한 매개변수의 결과는 Table 2와 같으며 국내외 연구자들이 보고한 매개변수를 참고하여 유량 및 수질에 적절한 매개변수를 선정하여 허용범위 내에서 변화시키면서 단순 시행착오법에 의해 검 · 보정을 수행하였다. 또한 유사는 물의 이동에 영향을 많이 받으며, 영양물질의 경우 물의 이동 및 유사이동에 따라 변하기 때문에 모델의 보정은 유량, 유사, 영양물질 순으로 관련 매개변수를 수정하였다.

실측값에 대한 모델예측을 평가하기 위해 산포도를 작성하여 두 변량간의 분포를 시각적으로 비교하였으며, 식 (1)과 (2)처럼 *NSE* (Nash and Sutcliffe, 1970)와 % *difference* (ASCE, 1993) 및 실측값과의 단순한 비 (*O/S* ratio)를 산정하여 검토하였다. *NSE*는 실측값과 모의값이 1:1 라인을 얼마나 잘 묘사하는가를 나타내며, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 모의값을 사용하는 것이 실측값의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있고, 계산된 *NSE*가 0보다 작으면 모델의 예측결과가 나쁘거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미한다(강과 박, 2003). % *difference*는 실측값과 모의값을 수학적으로 비

**Table 3.** General simulation targets or tolerances for model application (daily time step).

	Very good	Good	Fair	Poor
<i>% difference</i>				
Water flow	< 10	10~15	15~25	-
Sediment	< 20	20~30	30~45	-
Nutrients	< 15	15~25	25~35	-
<i>NSE</i>				
Water flow	0.90~0.80	0.80~0.70	0.70~0.60	0.60~0.50

교하기 위한 통계 치로서 동일한 결과가 예상되는 반복되는 측정에 대한 신뢰성을 나타내는 양적 지표로 사용되어왔다. 모든 실측치와 모의치 자료가 일치한다면 “% *difference*=0”을 나타낼 것이다.

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

$$\% \text{ diff.} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right| \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $P_i$ 는 예측 값,  $O_i$ 는 실측값,  $n$ 은 데이터 수, 그리고  $\bar{O}_i$ 는 실측값의 평균이다.

과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 Donigian (2000)은 일반적인 모델효율의 범위와 신뢰 구간을 Table 3과 같이 제시하였다. 이 범위를 기초로 하여 유량의 경우 가능한 한 % *difference* ≤ 15%, *NSE* ≥ 0.5가 될 때까지 보정하였으며, 수질의 경우 sediment와 영양물질은 각각 % *difference* ≤ 30이 될 때까지 보정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 모델의 검 · 보정

유출량의 경우 지표유출과 관련된 ESCO, CH\_K2, CH\_N2 및 SOL\_AWC와 기저유출 및 지하수 관련인자 ALPHA\_BF, REVAPMN, GWQMN, GW\_REVAP 등을 이용하여 보정하였다. 경안 A와 경안 B지점에 대한 모의 결과는 Fig. 2와 같으며, 모델의 적용성을 평가하기 위해 일별 유출량에 대해 *NSE*와 % *difference* 및 *O/S* ratio를 산정한 결과, 보정기간에 대해서는 *NSE*의 경우 경안 A는 “Fair”(0.6~0.7), 경안 B는 “Good”(0.7~0.8)를 나타냈으며, % *difference*는 경안 A가 “Fair”(15~25%), 경안 B는 “Very good”(10% 이하)를 나타냈다. 검정기간에 대해서는 *NSE*의 경우 경안 A와 B 모두 “Very good”(0.92,

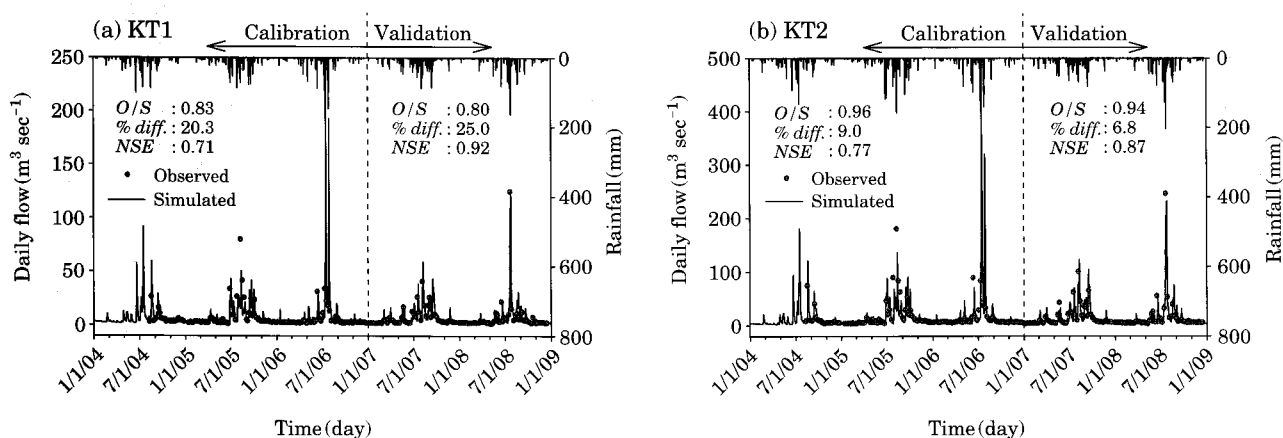


Fig. 2. Calibration and validation results for daily flow.

0.87), % difference는 경안 A는 “Fair” (15~25%), 경안 B는 “Very good” (10% 이하)를 나타냈다. 특정 기간에 따라 다소 침투유출 부분이 과대평가되거나 기저유출 부분이 과소평가되는 경향을 볼 수 있으나 O/S ratio가 0.83~0.96 범위에서 1.0값에 근사하게 나타나므로 모델이 실측값을 잘 반영함을 알 수 있었다. 전반적으로 경안천의 하류부인 경안 B지점에서 실측자료의 경향이 좀 더 유사하게 나타났는데, 모의에 이용된 관측자료는 홍수기에 비해 평수기 및 갈수기의 관측자료가 충분하여 평수량 이하의 유출량 모의가 잘 반영되었기 때문으로 판단된다. 이는 경안천 하천 바닥면의 상승과 보 시설 등에 의해 평상시에도 풍부한 수량 확보가 가능해졌기 때문으로 사료된다.

수질의 검·보정은 SS, TN, TP 순서로 이루어졌으며 Figs. 3~5와 같다. SS의 경우에는 MUSLE와 관계된 경사(SLOPE) 및 경사장(SLSUBSN), 유사이동에 관계된 PRF, SPCON, SPEXP과 하천의 토양유실과 관계된 CH\_EROD와 CH\_COV가 주요 매개변수로 작용하였다. 검·보정기간의 % difference는 경안 A와 B지점 모두 “Very good” (20% 이하)로 평가되었으며 O/S ratio도 0.92~1.14 수준으로 모의값이 실측자료의 경향을 적절히 묘사하는 것으로 나타났다.

영양물질 검·보정은 GWNO3과 GWSOLP 등의 하천 수질에 영향을 주는 매개변수와 지하수의 영양물질의 침전과 용출을 나타내는 RS1~RS5와 태별 질소와 인의 변화를 나타내는 BC1~BC4가 주요한 매개변수로 작용하였다. 질소는 질산화, 탈질화, 질소고정 등 반응 기작이 다양하고, 특히 농경지에서는 대부분 NO<sub>3</sub>-N 형태로 존재하며, 인의 경우 질소와 달리 물에 쉽게 녹지 않고 주로 토양에 흡착되어 토양과 함께 유출되는 특성을 지니는

등 유역의 복잡한 반응기작을 감안할 필요가 있다. TN의 경우 두 지점 모두 검·보정기간에 걸쳐 % difference가 “Good” (25% 이하) 이상을 나타냈으며, TP의 경우 보정기간 동안 두 지점 모두, 검정기간은 경안 A에서 “Very good” (15% 이하)을 나타내었지만 경안 B는 검정기간 동안 “Fair” (25~35%)의 수준에 있었다. O/S ratio의 경우 0.78~1.32 범위에서 1.0과 근사하게 변하는 것으로 나타났으며, 전반적으로 모의기간 동안 적절히 모의된 것으로 사료된다.

Fig. 6은 전체 검·보정지점의 실측값과 모의값의 산포도이다. 산포도는 분산도라고도 하며 변량  $x$ 와 그 분포  $F(x)$ 가 주어졌을 때, 그 분포의 중심적 위치의 측도를  $m$ 이라 할 때  $F(x)$ 의,  $m$  주위에서 흩어져 있는 정도를 나타내는 기술적 지표이다(정 등, 2007). 본 연구에서는 실측값과 모의값의 관계를 분석하기 위해 신뢰구간 95%에서 두 변량간의 분포와  $R^2$ 를 나타내었다. Flow, TN의 경우 실측값과 모의값이 1:1라인을 중심으로 집중되어 있는 반면에 SS와 TP의 경우는 outlier들이 다소 있기는 하지만 대체적으로 분포의 흩어진 폭이 좁게 나타났으며, 각 항목의  $R^2$ 가 0.56~0.87로 산정되어 모의값이 실측값을 적절히 설명해 주고 있음을 확인할 수 있었다.

## 2. 오염부하량 평가

### 1) 연간 오염부하량

경안천 유역 말단에 대한 2004년부터 2008년까지 오염물질 배출변화를 분석한 결과는 Fig. 7과 Table 4와 같다. SWAT 모의결과, 팔당호로 유입되는 경안천 유역의 연간 평균 오염부하량은 SS, TN, TP가 각각 30,562~43,364 ton year<sup>-1</sup>, 1,395,285~1,545,574 kg year<sup>-1</sup>, 74,552

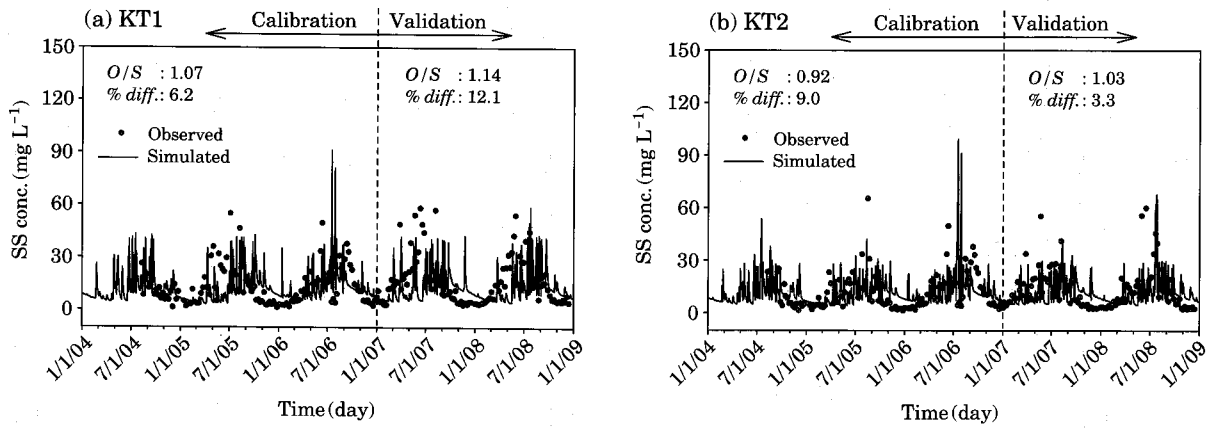


Fig. 3. Calibration and validation results for SS.

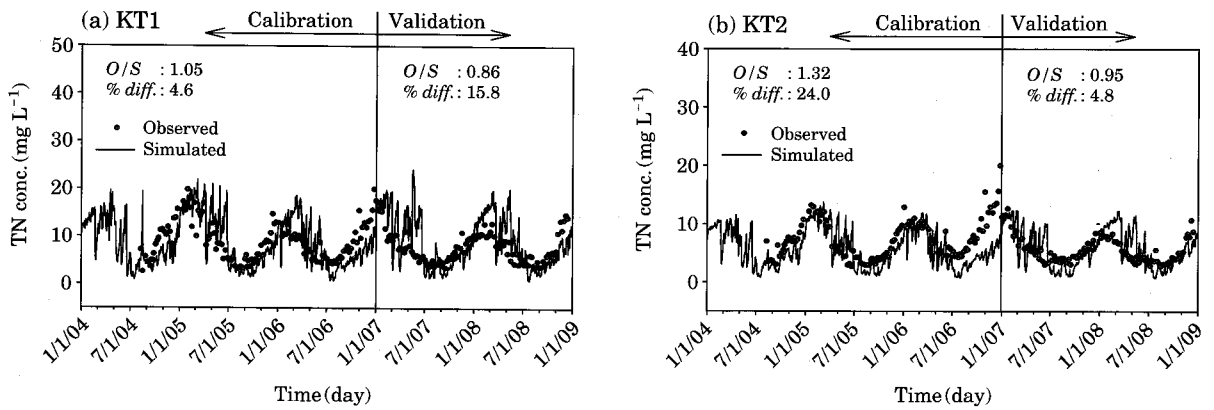


Fig. 4. Calibration and validation results for TN.

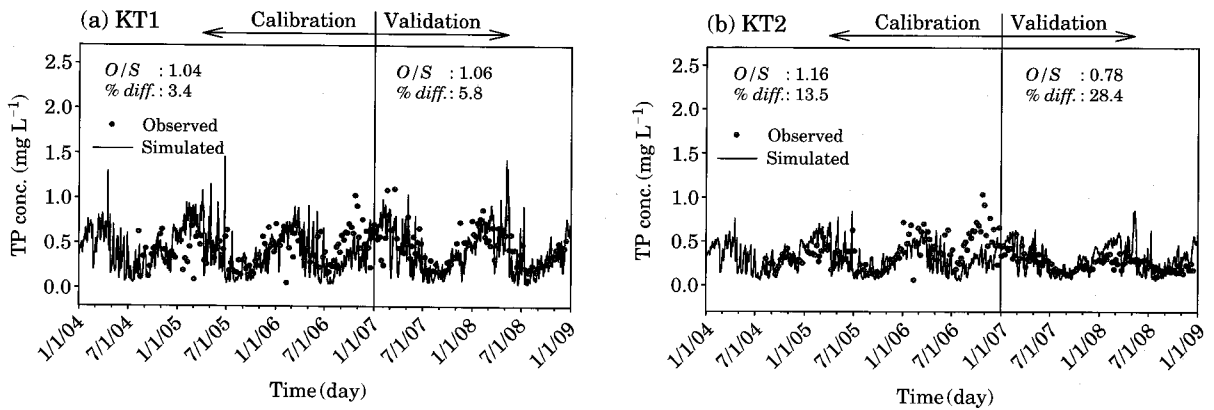


Fig. 5. Calibration and validation results for TP.

~92,375 kg year<sup>-1</sup>의 범위로 산정되었다. SS의 연간 오염부하량 중 2005년은 유출량이 증가함에 따라 총부하량이 증가하였고 비점오염부하량의 비중은 타 년도와 유

사하였으나 점오염부하량이 다소 증가하였다. 경안천 유역의 인구는 2000년 이래로 급속히 증가하고 있으며 높은 인구증가율과 인구밀도를 보이고 있는 것에서 원인을

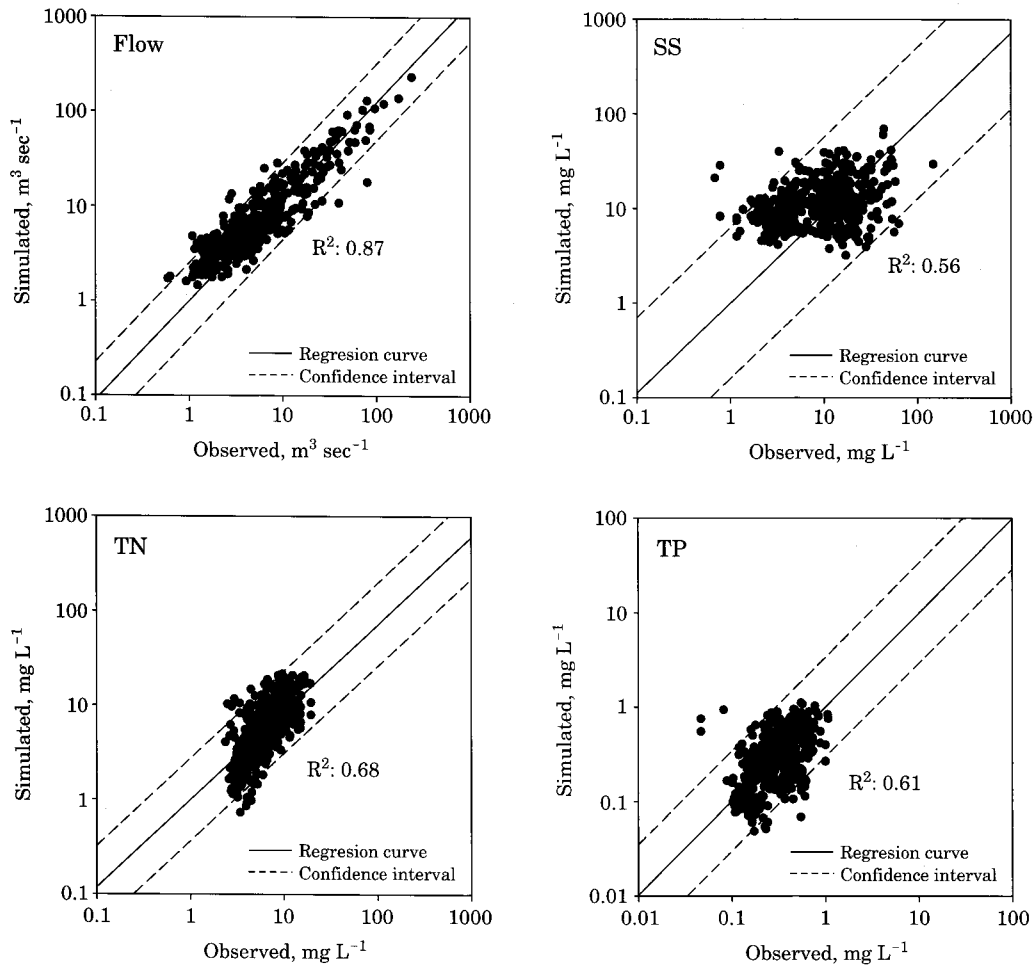


Fig. 6. Scatter plots of simulated to observed data from all monitoring stations.

찾을 수 있을 것으로 판단된다. 2006년의 경우 43,364 ton year<sup>-1</sup>으로 가장 높게 나타났으며, 점오염에 의한 부하량이 감소한 반면 비점오염에 의한 부하량이 50.1%로 타년도와 비교하여 급증하였다. 이는 2006년도 평균 강수량(수원, 이천, 양평 기상관측소 평균자료)이 증가함에 따른 유량 증가가 SS의 비점오염부하량 증가에 영향을 미친 것으로 판단되며 TP의 경우도 유사한 경향을 나타내었다. 2007년의 경우 강수량이 감소함에 따라 비점오염부하량이 타년도에 비하여 감소하는 결과를 나타내었으며, 점오염부하량이 81%까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 인구의 급격한 증가와 그에 따른 공동주택 등의 증가로 하수처리인구수가 증가하였음에도 전체 하수도 보급률이 76.4%로 감소(한강유역환경청, 2007)한 결과라고 판단된다. TN의 연간 오염부하량은 매년 유사한 범위에서 변화하였으며, 2006년에는 유출량 증가에 따라 비점오염부하량이 다른 년도와 비교하여 다소 감소하였는

데, 유량증가에 따른 질소성분의 희석이나 산화·휘발작용으로 인하여 농도가 감소한 결과라고 판단된다(Woli et al., 2004). TP는 점오염부하량의 경우 TN과 같은 경향을 보였으나, 비점오염부하량은 물의 이동과 유사이동에 영향을 크게 받기 때문에 SS의 연간 배출경향과 유사하게 나타났다.

각 항목에 대한 대상유역의 2004년부터 2008년까지의 연평균 비점오염 부하량은 SS 30.4%, TN 45.3%, TP 28.1%수준으로 산정되었다. Table 5는 수계오염총량관리 기술지침에 제시된 방법을 통해 산정한 2006년도 개별 배출부하량(한강유역환경청, 2007)과 본 연구의 결과를 비교하기 위해 나타낸 것이다. 일 배출부하량은 TN과 TP의 경우 7,094 kg day<sup>-1</sup>, 765 kg day<sup>-1</sup>로 본 연구결과보다 2~3배가량 더 크며, 비점오염부하량이 차지하는 비율은 8.2~11.0%로 점오염원에 의한 영향이 비교적 크게 나타나 본 연구결과(37.6~50.1%)와 차이를 나타내었



다. 일반적으로 발생 및 배출되는 오염물질의 양은 지역, 기후, 강우강도, 토지이용도 등에 따라 많은 차이를 보인다. 총량의 경우 유역 및 하천의 유달율 개념이 적절히 고려되지 않았으며, 비점오염으로 간주하는 토지계의 배출부하량은 발생부하량의 기준유량인 저수기 10 mm 이상의 강우빈도를 고려하여 발생부하량의 25% 정도만이

강우에 의한 유출이 이루어질 것이라는 가정 하에 산정(한강유역환경청, 2007)하기 때문에 나타난 차이로 판단된다. 또한 원단위를 이용한 부하량 산정은 단순 강우유출비에 의해 표현되기 때문에 시기별 강우패턴을 적절히 반영하지 못하는 단점이 있다(양과 김, 2001). 장 등(2007)이 2004년부터 2006년까지 경안천 유역을 대상으로 HSPF를 적용한 결과, BOD<sub>5</sub>, TN, TP의 비점오염 부하량 비율이 30.7%, 67.4%, 41.9%로써 유기물의 경우 유사한 수준을 보였으나 TN과 TP는 다소 작게 산정되었다. 이는 기상자료, 공간입력자료, 소유역 분할 및 모의기간 등의 차이로 인해 나타나는 결과라고 판단되며, 본 연구결과의 신뢰성 확보를 위해 동일한 기상 및 공간입력자료 등의 구축을 통한 HSPF와의 비교연구가 이루어질 필요가 있을 것으로 사료된다.

2) 월별 오염부하량

Fig. 8에는 계절별 오염부하량 발생 및 오염원별 영향 정도를 파악하기 위하여 5개년(2004~2008년)간의 월별 평균 오염부하량을 나타내었다. SS의 오염부하량은 시기별로 차이가 있으나 저수기나 평수기의 비점오염원에 의한 영향은 점오염원에 비해 상대적으로 작게 나타났다. SS는 강우로 인한 하상주변 토양침식과 도시지역의 비점오염물질 유출 등에 큰 영향을 받는다. 따라서 비점오염부하량의 대부분은 강우가 집중되는 6~9월(하절기)에 많이 배출되는 것(88.7%)으로 나타났으며, 수질변화 또한 강우유출의 영향으로 하절기에 높은 수질농도를 나타내었다. TN은 강우기에 비점원오염부하량이 다량 배출(61.8%)되며, 평수기 및 저수기(10~12월, 1~5월)에는 점오염원에 의한 영향 정도가 비점오염원 보다 더 크게 나타났다. TP의 경우도 TN과 유사한 경향을 보였는데, 전반적으로 비점원오염부하량은 하절기 강우의 영향(82.8%)이 크며, 저수기는 TN과 유사하게 변화하였다. 이는 같은 기간에 경안천은 용인시와 광주시 하수처리장의 방류수가 차지하는 정도가 크기 때문에(최정연 등, 2008)

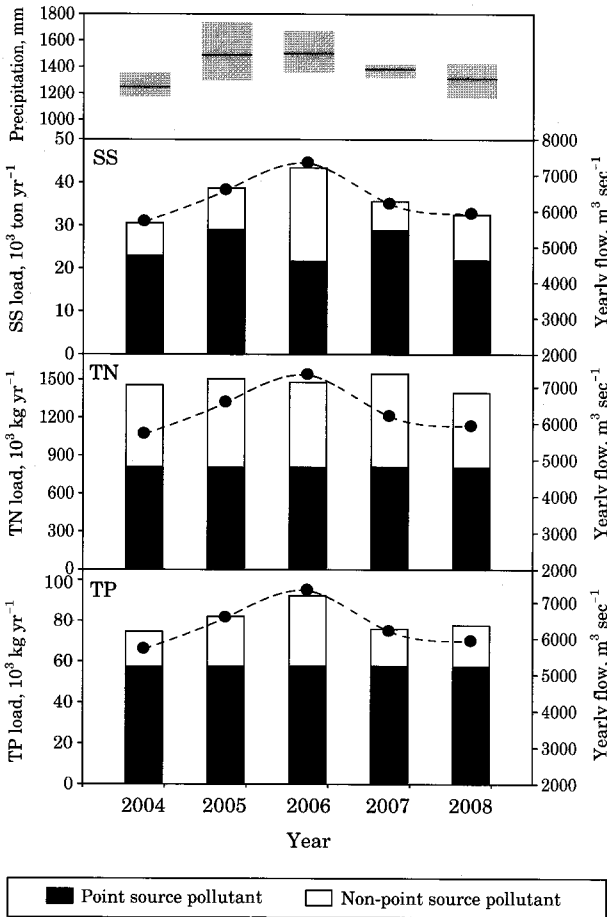


Fig. 7. The contribution of yearly SS, TN and TP load from 2004 to 2008.

Table 4. Point and non-point source pollutant load assessment.

Year	SS		TN		TP	
	TL (ton) <sup>a</sup>	% of NPL <sup>b</sup>	TL (kg) <sup>a</sup>	% of NPL <sup>b</sup>	TL (kg) <sup>a</sup>	% of NPL <sup>b</sup>
2004	30,562	24.8	1,455,112	44.4	74,552	22.9
2005	38,673	25.1	1,504,622	46.5	82,019	29.8
2006	43,364	50.1	1,478,267	45.5	92,375	37.6
2007	35,617	19.0	1,545,574	47.6	75,897	24.0
2008	32,553	32.9	1,395,285	42.3	77,665	25.9
Average	36,154	30.4	1,475,772	45.3	80,501	28.1

<sup>a</sup>: Total pollutant load (ton year<sup>-1</sup>, kg year<sup>-1</sup>)

<sup>b</sup>: % of non-point source pollutant load

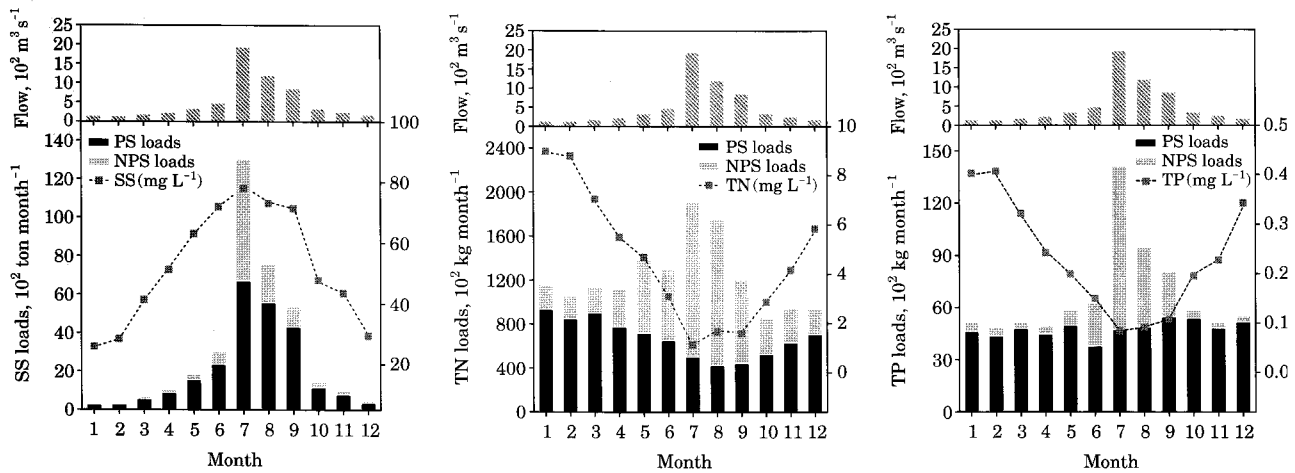
**Table 5.** Comparison between unit loads in the literature and daily loads of this study for BOD, TN and TP pollutants.

Category	BOD		TN		TP	
	kg day <sup>-1</sup>	%	kg day <sup>-1</sup>	%	kg day <sup>-1</sup>	%
Domestic	9,840	84.3	6,082	85.7	648	84.7
Livestock	350	3.0	246	3.5	30	4.0
Industrial	147	1.3	176	2.5	18	2.3
Land use <sup>a</sup>	1,285	<b>11.0</b>	579	<b>8.2</b>	66	<b>8.6</b>
Etc	53	0.4	12	0.2	3	0.4
Sum	11,675	100.0	7,094	100.0	765	100.0
Daily loads <sup>b</sup>	124,282 <sup>c</sup>	<b>50.1</b>	4,047	<b>45.5</b>	250	<b>37.6</b>

<sup>a</sup>: The unit load from land use is the same non-point source pollutant load.

<sup>b</sup>: Non-point source pollutant daily loads in this study

<sup>c</sup>: Sediment total pollutant load



**Fig. 8.** Monthly pollutant load and source composition to monthly concentration behavior.

이 시기에 고농도의 질소와 인이 부하량 변화에 영향을 주며, 질소 및 인 성분은 유기물질이나 부유물질처럼 강우초기에 많은 양이 유출되기보다 강우 후반에도 꾸준히 유출되며 토양입자에 흡착되어 있던 성분들이 서서히 유출되기 때문에 (한강유역환경청, 2007) 저수기에도 TN과 TP의 비점오염부하량의 비율이 SS보다는 비교적 많은 것으로 판단된다. 계절별 수질변화도 뚜렷하게 나타났는데, 강우빈도 및 강우량이 낮은 시기에 하수처리장 방류수나 하수관거월류수 등 점오염원에 의한 TN과 TP 수질이 절대적인 영향을 미치기 때문에 최고 9 mg L<sup>-1</sup>, 0.4 mg L<sup>-1</sup>까지 각각 높게 나타났으나 하절기 7월에는 풍부한 유량으로 인한 희석으로 수질이 가장 양호하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 강우가 많은 시기에 부하량은 높을지라도 하천의 TN, TP 수질은 오히려 깨끗한 수준이며, TN과 TP 부하량과 하천수질이 동일한 경향으로 증감하지 않는다는 것이 확인되었다(정 등, 2007).

**적 요**

최근 상수원 수질관리에 있어서 팔당호 수질악화에 직접적으로 영향을 주는 경안천 유역관리에 대한 관심이 증가하여 적절한 대책이 필요하다. 이를 위해 SWAT 모델을 적용하여 유역 내 점·비점오염원에 따른 오염물질 발생 특성을 평가하고자 하였으며, 연구결과는 향후 경안천 유역의 효율적인 수질관리를 위한 기초자료로서 도움이 되고자 한다.

BASINS는 유역의 오염현황을 신속하고 용이하게 파악가능하고 예측모형의 입력자료를 자동적으로 생성해 주기 때문에, BASINS 적용을 위한 공간입력자료인 유역 경계와 하천도, DEM, 토지이용도, 토양도 등을 tool 형식에 맞게 변환하고 입력하여 SWAT과 같은 유역모델을 연구목적에 맞게 적용할 수 있었다.

연구목적에 맞게 모델을 적절히 적용하기 위하여 유량, SS, TN, 그리고 TP순으로 2004년부터 2008년까지 일별로 검·보정 하였고, 모델 통계 치와 효율 산정 및 산포도 작성을 통해 모델의 정량적, 정성적 모의특성을 판단하였다. 유량의 경우 실측값에 대한 모의 경향이 잘 반영되었으며, SS, TN, TP의 경우 특정기간에서 과대 또는 과소평가 되었으나 유역이라는 광범위하고 복잡한 특성과 그 안에서의 복잡한 수질기작 등을 고려해 볼 때 허용할 수 있는 범위에서 실측값을 적절히 묘사한 것으로 판단되었다. 그러나 결과의 정확한 해석과 적용을 위해서는 보다 상세한 측정자료 확보 및 검·보정 작업이 필요하며, 특히 점오염원 배출현황에 대한 관측자료의 검증을 통해 이상 치들의 정확성을 개선할 필요가 있다.

년간 오염부하량을 산정한 결과, SS와 TP의 경우 강우량이 증가함에 따른 유출량 변화가 비점오염부하량 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. TN은 점오염부하량이 매년 유사한 범위에서 산정되었으나, 유량증가에 따른 질소성분의 희석이나 산화효과로 인하여 질소농도 감소가 비점오염부하량 감소로 나타났다. 수계오염총량관리 기술지침에 의해 산정된 배출부하량과 비교한 결과, 총량에서는 본 연구결과가 2~3배가량 더 작으며, 비점오염부하량의 경우 더 큰 것으로 나타났다. 원단위를 이용하여 부하량을 산정할 경우 유달개념이 고려되지 않고 단순 강우유출비만을 고려하기 때문에 나타나는 결과라고 판단되었다.

연중 일정하게 나타나는 점오염원의 특성과는 달리, 비점오염원에 의한 부하량은 강우가 집중되는 6~9월에 61.8~88.7%수준으로 크게 증가하며 강우유출량에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었으나, TN과 TP는 평수기 및 저수기(10~5월)에 점오염원에 의한 영향이 크게 나타났다. 이는 저수기에 흐르는 경안천 유량의 많은 양이 용인시와 광주시에 위치한 환경기초시설의 방류량이며, 이에 따라 하절기 비점오염뿐만 아니라 저수기의 수질개선을 위한 관리 또한 적절히 필요한 것으로 판단되었다.

## 인 용 문 헌

- 강동균. 2005. 소양강댐 상류 내린천 유역에서 SWAT을 이용한 BMP의 유사발생 저감 효과의 분석. 강원대 석사논문.
- 강문성, 박승우. 2003. 비점원오염모델을 이용한 오염총량도의 시스템의 개발 및 적용, 한국수자원학회논문집 36: 117-128.
- 강문성, 박승우, 전종안. 2003. RS와 GIS-AGNPS 모형을 이용한 소유역에서의 비점오염부하량 추정. 한국농공학회지 45(1): 102-114.
- 공동수, 윤성규, 이형진, 김병익, 박지형. 2006. 남한강수계 오염물질 유출 및 수질변동 특성에 관한 연구(II). 한강물환경연구소.
- 김철검, 김남원. 2008. 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성. 한국물환경학회지 24(4): 465-472.
- 농촌진흥청 농업과학기술원. 2000. <http://water.nier.go.kr/weis>.
- 박경철, 안규홍, 염익태, 강선홍. 2000. 팔당호의 영양염류 예측을 위한 수질관리모형의 비교. 대한상하수도학회지 14(2): 174-180.
- 박준대, 신동석, 김문숙, 공동수, 류덕희, 정동일, 나은혜. 2008. 수질오염총량관리를 위한 하천수질모델 (QUAL-NIER) 개발. 한국물환경학회지 24(6): 784-792.
- 박지형, 공동수, 민경석. 2008. 팔당호 상류유역의 점·비점오염원 유달부하 특성-남한강·경안천 수계를 대상으로. 한국물환경학회지 24(6): 750-757.
- 양홍모, 김 혁. 2001. 발생부하원단위와 수치표고모형을 이용한 하천유역 오염부하량. 한국조경학회지 29(1): 22-31.
- 유병로, 정승권, 전계원. 2004. 공간정보를 이용한 분포형 유역수질 모의. 한국수자원학회논문집 37(11): 897-913.
- 윤춘경, 함종화, 전지홍. 2001. SWMM과 회귀분석법에 의한 유역의 오염부하량 산정 비교. 한국물환경학회지 17(2): 157-168.
- 장재호, 김형철, 이새봄, 이승재, 신아현. 2007. 경안천 유역의 오염부하량 삭감 시나리오에 따른 하류수질예측. 대한상하수도학회·한국물환경학회, 공동주최 학술발표회논문집 737-744.
- 장주형, 박해식, 박정길. 2006. GIS 기반의 SWMM 모형을 이용한 하수도시스템 선정에 따른 도시하천 수질개선효과의 정량적 분석. 한국물환경학회지 22(6): 982-990.
- 정광욱, 윤춘경, 장재호, 김형철. 2007. BASINS/HSPF를 이용한 화성유역 오염부하량의 정량적 평가. 한국농공학회지 49(2): 61-74.
- 최정현, 하주현, 박석순. 2008. 팔당호 수질관리 정책의 효과 분석. 대한환경공학회지 1225-1230.
- 한강유역환경청. 2007. 경안천 중권역 물환경관리계획(2008-2012).
- 환경부. 2000. 팔당상수원 비점오염원 최적관리방안 타당성 조사 및 기본계획 용역보고서.
- 환경부. 2003. <http://egis.me.go.kr/egis>.
- 환경부. 2007. <http://egis.me.go.kr/egis>.
- 황세운, 장태일, 박승우. 2006. 기후변화에 따른 농촌 소유역에서의 비점오염 영향 분석. 한국농림기상학회지 8(4): 209-221.
- 황하선. 2007. 우리나라 수질오염총량관리제에 있어 유역특성을 고려한 BASINS/HSPF의 적용성 연구. 건국대 박사논문.
- 허성구, 전만식, 박상헌, 김기성, 강성근, 옥용식, 임경재. 2008.

- 고랭지 농업의 작물별 개토량 변화에 따른 토양유실 저감 분석. *한국물환경학회지* **24**(2): 185-194.
- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling. *Journal of American Water Resources Association* **34**(1): 73-89.
- ASCE. 1993. ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models, Criteria for Evaluation of Watershed Models. *Irrigation Drainage Engineering* **119**(3): 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, D.C.
- Feyen, L., R. Vazquez, K. Christianens, O. Sels and J. Feyen, 2000. Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* **4**(1): 47-63.
- Kang, M.S., S.W. Park, J.J. Lee and K.H. Yoo. 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *J. of Agricultural Water Management* **79**: 72-79.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. Riverflow forecasting through conceptual model. *J. of Hydrology* **10**(3): 282-290.
- Jeon, J.H., C.G. Yoon, K.W. Jung and J.H. Jang. 2007. HSPF-Paddy simulation of water flow and quality for the Saemangeum watershed in Korea. *Water Science and Technology* **56**(1): 123-130.
- Williams, J.R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, ARS-S-40, USDA-ARS.
- Woli, K.P., T. Nagumo, K. Kuramochi and R. Hatano. 2004. Evaluating river water quality through land use analysis and N budget approaches in livestock farming areas. *Science of the Total Environment* **329**: 61-74.

(Manuscript received 11 May 2009,  
Revision accepted 1 June 2009)