

BASINS-SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 비점원 오염배출 중점관리 대상지역 결정

Decision of Critical Area Due to NPS Pollutant Loadings from Kyongan Stream Watershed using BASINS-SWAT

장재호* · 윤춘경*[†] · 정광욱** · 손영권*

Jang, Jae Ho* · Yoon, Chung Gyeong*[†] · Jung, Kwang Wook** · Son, Yeung Kwon*

ABSTRACT

In order to improve water quality of upper watershed of Paldang reservoir, it is necessary to evaluate non-point source pollution loads and identify critical watershed pollution sources. A GIS based Soil and Water Assessment Tool was applied to evaluate model application and reliability, estimate NPS pollution load, identify critical watershed by NPS pollution sources, and suggest various best management practices for Kyongan Stream watershed. Yearly NPS pollution loads were estimated 30.0% SS, 60.1% TN and 35.4% TP, respectively. The watershed pollution load is mainly decided by precipitation condition and SS and nutrients load have a significant regression relationship. Based on 10-year average yearly NPS pollution load, critical sub-watersheds were identified. The No. 5 and 17 which have lots of relatively intensive agricultural fields and scattered industrial area were vary critical sub-watersheds and under more intensive pollution load. In order to control critical watershed, watershed best management practices such as scientific fertilizer, contour farming and parallel terrace, transferring the sloppy farmland to grass or forest and constructing a buffer zone, and constructing wetlands and retention ponds will be applied. Overall the SWAT model can be efficiently used for identification of critical sub-watersheds in order to develop a priority watershed management plan to reduce water pollutions.

Keywords: BASINS-SWAT; best management Practice; critical sub-watershed; NPS pollution load

1. 서 론

유역관리에 있어서 유역의 다양한 오염원이 환경문제의 원인이 되고 있는 만큼 획일적이거나 간단한 대안으로는 해결되기 어렵다. 궁극적으로 유역관리 즉, 수질관리방안은 국지적 환경문제, 특히 비점오염원에 초점을 맞춰왔으며, 점오염원의 제어와 비교하여 매우 복잡하고 더 자세한 정보와 각 기관들 간의

폭넓은 이해관계가 요구된다 (Ouyang et al., 2008). 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 충분할지라도 유역의 다양한 환경을 반영하기 어려워 비점오염물질의 배출특성을 정량화하기에는 한계가 있다. 유역에 대한 일반적인 특성 즉, 다양한 강우사상, 유역 내 수리·수문현황, 토양현황, 피복상태, 오염원 현황 등을 고려한 장기적인 평가는 모델링을 통한 접근이 용이하며, 충분한 실측자료를 이용하여 모델을 검·보정함으로써 모의 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다 (Jang et al., 2009a). 유역모델의 목표는 유역관리의 기반이 되는 유역의 유출특성과 비점오염원의 발생 및 배출을

* 건국대학교 환경과학과

** 한국수계환경연구소

[†] Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747

Fax: +82-2-446-2543

E-mail address: chunyeon@konkuk.ac.kr

2009년 7월 29일 투고

2009년 8월 31일 심사완료

2009년 9월 23일 게재확정

정확하게 산정하는 것이다 (Miller et al., 2007). 즉, 유역모델은 오염이동 및 확산과 관계된 유역의 수문·수질과정을 측정할 수 있는 적절한 대안을 찾아내고 관리기술의 효과적인 적용을 위해 주요 오염지역을 규명하는 등 광범위한 정보를 통합할 수 있다 (Bryant et al., 2006).

최근 국내에서는 최적관리기법 및 오염총량관리 등의 목적으로 HSPF와 SWAT 모델의 적용이 증가하고 있으며, ArcGIS 및 BASINS (Better Assessment Science Integrating point and Non point Sources) 등과 통합·운용되고 있다. 특히 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)은 물리적 기반의 준분포형 강우-유출모델로서 오염부하, 기후변화, BMPs (Best Management Practices)등을 일단위로 예측하도록 설계되었으며, 일반적으로 유역의 비점오염원 부하를 추정하고 유역관리와 주요한 오염원 규명에 널리 이용되어왔다 (Arnold et al., 1998). 본 연구에서는 수도권에 인접하고 있으면서 개발에 요구에 따른 오염원과 주위 농경지, 축산시설 및 산업시설 등 비점오염원의 영향으로 팔당호 수질에 큰 영향을 미치고 있는 경안천 유역 (Han River Basin Environmental Office, 2007)의 관리를 위해 SWAT 모델의 적용가능성을 평가하고 유역 내 비점원 오염의 배출특성 및 증점관리 대상유역 분석과 비점원 오염제어를 위한 최적관리방안을 제안하기 위하여 SWAT 모델을 적용하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

본 연구의 대상지역인 경안천 유역은 동경 127°, 북위 37°에 위치하고 있으며 용인시 이동면과 원삼면의 경계인 문수봉 계곡에서 발원하여 광주시 초월면 지월리에서 곤지암천과 합류된 후 팔당호로 유입된다. 유로연장은 약 47.4 km, 유역면적은 589.3 km²이며, 평균유량은 약 5.4 m³/s로써 팔당호 전체 유입 유량의 약 2.5%를 차지하고 있다 (Jang et al., 2009a). 평균유역경사가 1/720, 경안천 하류부의 연평균 체류시간은 20.4일로 하천흐름의 정체가 심하다. 비록 연평균 강우량이 1,228.6 mm이지만 상류에 대형 저수지가 없어 유역에 내린 강우가 지체 없이 하천수로 유입된다 (Jang et al., 2009a). 갈수기와 저수기에는 유량이 적고 수심이 얕으며 물 확보를 위해 설치한 보시설과 낮은 하상경사로 인해 물의 정체가 심해 부유물의 상당량이 하천바닥에 퇴적된다 (Choi et al., 2008). 이렇게 쌓인 퇴적물은 강우시에 집중적으로 팔당호로 유입되어 수질 악화가 예상된다.

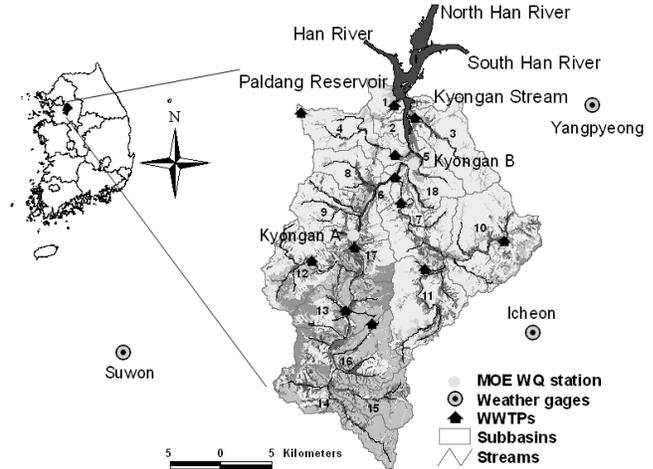


Fig. 1 Kyongan stream watershed and the monitoring stations (Jang et al., 2009a)

또한 연구지역의 도심지 (11.2 %)와 농경지 (16.4 %)가 차지하는 비중은 북한강과 남한강 유역의 2배 이상 높으며, 높은 인구밀도 (466.6 인/km²)와 급속한 도시화의 진행으로 오염원의 증가가 예상되며 팔당호의 수질에 미치는 영향을 고려할 때 경안천 유역의 수질오염 관리가 요구된다. 모델의 보정지점은 수질오염총량관리계획 목표수질 관리지점을 대상으로 하였고, 용인시는 경안천 내 광주경계지점인 매산리보 (Kyongan A)를, 광주시는 서하보 (Kyongan B)를 수질오염총량관리계획 목표수질 관리지점으로 설정하고 있다 (Fig. 1).

2. 모델구축과 입력자료

SWAT 모델은 BASINS를 이용하여 구축하였으며, Jang et al. (2009a)의 논문결과와 동일하다. DEM (Digital Elevation Model)은 환경지리정보서비스 (<http://egis.me.go.kr/egis>)의 수치지도를 이용하여 등고자료를 추출하였고 GIS 프로그램에 의해 30 × 30 m 격자크기의 DEM을 구축하였다. 연구지역의 DEM과 하천도를 이용하여 대상유역 경계를 추출하였고, Automatic Delineate Tool을 이용하여 18개의 소유역으로 분할하였다. 토지이용도는 환경지리정보서비스에서 제공하는 1:25,000 토지피복분류를 참고하여 중분류 하였고 그 결과 산림이 65.0 %, 그리고 농경지 (16.4 %)와 주거지역 (11.2 %) 순으로 나타났다 (Table 1). 1:25,000 정밀도양도 (NAAS, 2000)는 국립농업과 학원으로부터 제공받았다. 소유역별 토양특성과 토지이용특성을 중첩하여 HRUs (Hydrological Response Units)를 생성하였다. 수위, 양평, 이천 기상관측소의 강수량, 최대·최저기온, 풍속, 일사량 및 상대습도 등의 기상자료 (2002년~2007년)를 이용하여 각 기상인자에 대한 일별 자료를 모델에 입력하였다.

Table 1 Land use characteristic of this study area (Jang et al., 2009a)

Land use	Forest	Paddy	Cropland	Pasture	Urban	Water	Etc.
Area(km ²)	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

유역 내 환경기초시설은 총 20개소로 조사되었으며, 점오염원 자료로서 각 시설별 배출되는 일 단위 방류량자료를 이용하였다 (MOE, 2003). TN과 TP의 경우 경안천 실측수질자료의 태별 N, P 비율을 고려하여 모델 입력에 필요한 ORGN, NO3, NH3, ORGP, PO4 등에 대한 배출부하량을 산정하였다.

3. 모델의 보정

모델의 보정을 위한 유량 및 수질은 2004년 8월부터 2007년까지 8일 간격으로 수질오염총량 관리를 위해 운영되고 있는 경안A와 경안B의 자료를 이용하였고, 연중 일별자료를 중심으로 보정이 이루어졌다. 모델의 안정화를 위해 앞의 2년간 (2002~2003)을 추가 모의하였다. 각각의 소유역 특성을 기초로 유량 및 수질에 관련된 매개변수 범위를 결정하였고, 기존의 SWAT 모델과 관련된 문헌들 (Arnold et al., 2000; Neitsch et al., 2002; Santhi et al., 2006)을 참고하여 적절한 허용범위 내에서 매개변수들을 변화시키면서 단순시행착오법으로 보정하였다. 실측값에 대한 모델의 적용성을 평가하기 위해 식 (1)과 (2)처럼 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency; Nash and Sutcliffe, 1970)와 % difference (ASCE, 1993) 및 실측 평균값과 모의평균값의 단순한 차이 (O/S ratio)를 산정하여 검토하였다.

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

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

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

과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 Donigan (2000)은 일반적인 모델효율의 범위와 신뢰 구간을 Table 2와 같이 제시하였다. 이 범위를 기초로 하여 본 연구에서 설정한 모의기준은 유량의 경우 O/S ratio ≤ 15 %를 기준을 만족한 후, % diff. ≤ 15%와 NSE ≥ 0.7을 만족할 때까

Table 2 General simulation targets or tolerances (Jang et al., 2009a)

Daily basis		Very Good	Good	Fair	Poor
% Difference	Water flow	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25	-
	Sediment	< 20	20 ~ 30	30 ~ 45	-
	Nutrients	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35	-
NSE	Water flow	0.90 ~ 0.80	0.80 ~ 0.70	0.70 ~ 0.60	0.60 ~ 0.50

지 보정하였으며, 수질의 경우 O/S ratio ≤ 30와 % diff. ≤ 30 각각 만족할 때까지 보정하였다 (Jang et al., 2009a).

III. 결과 및 고찰

1. SWAT의 모의결과

유량과 수질보정에서 사용된 매개변수들과 보정방법은 Jang et al. (2009a)의 연구와 동일하다. 수문보정은 지표유출, 지하수, 증발산과 관련된 매개변수들을 적절히 변화시키면서 이루어졌다. 지표유출에 민감한 CH_K2, CH_N2, ESCO, 지하수변화에 민감한 GW_DELAY, ALPHA_BF, 그리고 토양관련계수 SOL_AWC, SOL_K를 이용하여 실측값과의 차이를 최소화하면서 보정하였다. 경안 A와 B지점에 대한 유출량 모의결과는 Fig. 2와 Fig. 3과 같으며 SWAT 모델의 적용성 평가 결과, O/S ratio는 모의기간에 걸쳐 15 %이내의 모의기준을 (0.92~1.05)을 만족하였다. % diff.의 경우 경안 A -8.27 %, 경안 B 5.18 %로 “Very good”으로 평가되었고, NSE는 경안 A, B 모두 “Good” (0.7~0.8)으로 평가되었다. 특정 기간에 따라 다소 첨두유출 부분이 과대 및 과소평가되거나 기저유출 부분이 과소평가되었는데, 장기유출모델이라 하더라도 연속성이 있는 수문현상을 정확하게 묘사하는데 한계가 있다. 그러나 SWAT 모델에 의한 유량 모의는 전반적으로 모델이 실측값을 흡사하게 모의하는 것으로 나타났다.

수질의 경우 유사는 물의 이동에 영향을 크게 받으며, 영양물질의 경우 물의 이동 및 유사이동에 따라 변하기 때문에 SS, TN, TP 순으로 보정이 이루어졌다 (Fig. 2, Fig. 3). SS는 MUSLE와 관계된 경사 (SLOPE) 및 경사장 (SLSUBBSN), 유사이동에 관계된 PRF, SPCON, SPEXP과 하천의 토양유실과 관계된 CH_EROD와 CH_COV가 주요 매개변수로 작용하였다. O/S ratio는 1.03~1.12로 모델이 실측값과 모의값이 30 %이내의 범위에서 경안 A, B 모두 모의기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다. % diff.의 경우 경안 A, B지점 모두 “Very good”로 각각 평가되어 모델이 실측자료의 경향을 적절히 묘사하는 것으로 나타났다. 여름철 강우시 모델의 피크농도가 과대평가

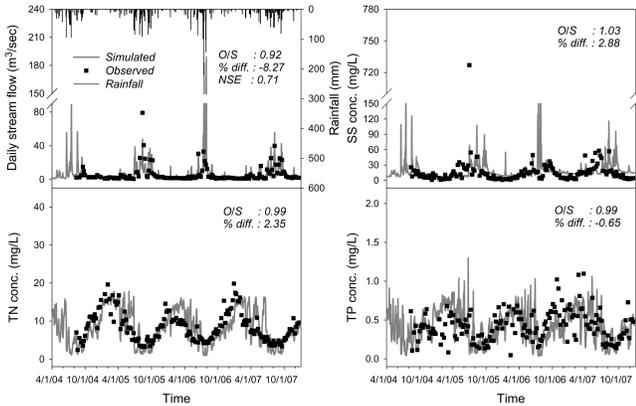


Fig. 2 Calibration results for daily flow, SS, TN, and TP at the Kyongan A

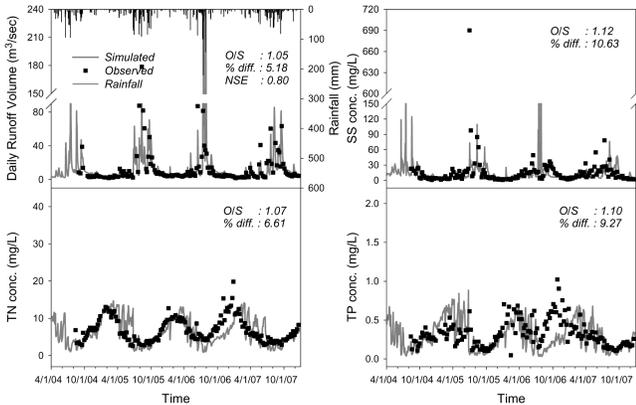


Fig. 3 Calibration results for daily flow, SS, TN, and TP at the Kyongan B

되거나 평상시에 일정부분 실측값과 상이한 경향을 보이면서 유량변화와 유사하게 나타났다. 또한 실측자료는 유량변화에 민감하게 반응하며 다소 모의결과와 차이를 나타냈는데, 이는 측정지점이 포함된 No. 17과 18 소유역과 곤지암 유역 및 상류 유역의 토지이용 중 도시가 차지하는 비율이 비교적 크기 때문에 초기강우유출과 유사한 경향을 나타낸 것으로 판단된다 (Table 5).

영양물질은 GWN03과 GWSOLP 등의 하천수질에 영향을 주는 매개변수와 지하수의 영양물질 침전과 용출을 나타내는 RS1 ~ RS5가 주요한 매개변수로 작용하였다. 질소는 질산화, 탈질화, 질소고정 등 반응 기작이 다양하고, 특히 농경지에서는 대부분 NO₃-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. O/S ratio의 경우 TN, TP 모두 0.99~1.10의 범위로 25%의 모의기준을 만족하였다. TN과 TP의 % diff. 산정결과

-0.06~9.27% (“Very good”)를 나타내었다. 경안 A, B지점 모두 2007년도 초반에 저수기, 평수기를 거치면서 모의결과와 비교하여 실측농도가 증가하는 경향을 보였는데, 저수기 및 평수기에 경안천을 흐르는 물은 하수처리방류수가 차지하는 비율이 매우 크다 (Kim et al., 2009). 따라서 급격한 인구증가와 그에 따른 공동주택의 증가로 하수처리인구수가 증가하여 (Han River Basin Environmental Office, 2007) 용인, 광주, 곤지암 하수처리장 등의 방류수 수질에 영향을 준 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 2와 3에서 나타난 바와 같이 전반적인 모의경향은 실측자료를 적절히 따라가는 것을 알 수 있었다.

2 연구지역의 비점원 오염부하량 평가

본 연구에서는 대표적으로 SS, TN 그리고 TP 항목에 초점을 맞추어 각 수질항목에 대한 비점원 SWAT을 이용하여 10년 (1999~2008년) 평균 오염부하량을 산정하였다. SPSS를 이용하여 산술평균을 한 결과, 각각 66,833 ton, 967,985 kg 그리고 26,257 kg으로 나타났다 (Table 3). 이는 모의된 총오염부하량의 30.0%, 60.1% 그리고 35.4%로 Jang et al., (2007, 2009a, 2009b)이 발표한 연구의 비점원 오염부하량과 유사한 결과이며, MOE (2003)에서 보고한 30~35% BOD 수준과도 유사한 범위에서 나타났다. 그러나 Han River Basin Environmental Office (2007)에서 보고한 바에 따르면 각각의 항목에 대한 비점원 오염부하량이 차지하는 비율은 8.2~11.0%로 비점오염원에 의한 영향이 비교적 작게 나타났다. 비점오염원으로 간주하는 토지계의 배출부하량은 발생부하량의 기준 유량인 저수기 10 mm 이상의 강우빈도를 고려하여 발생부하량의 25%정도만이 강우에 의한 유출이 이루어질 것이라는 가정 하에 산정하며 원단위를 이용한 부하량 산정은 단순 강우유출비에 의해 표현되기 때문에 시기별 강우패턴을 적절히 반영하지 못하는 단점이 있다 (Yang and Kim, 2001). 산술평균은 각 수질항목별 10개의 표본을 대상으로 95% 신뢰수준과 ±31% 표준오차범위에서 산정되었다. 표준오차 범위가 큰 이유는 표본개수가 작기 때문이며 표준오차 범위 내에서 적절히 산정된 것으로 판단된다.

유역에 내리는 강우자료는 SWAT 모델에서 가장 민감한 인자 중의 하나이며, 오염물질 이동에 대한 주요 원동력이다. 따라서 연평균 강우량과 연간 비점원 오염부하량의 변화는 유사한 경향으로 나타났으며 (Fig. 4), Table 3에서와 같이 강우량과 부하량은 1%의 유의수준에서 높은 상관성 (0.774~0.860)을 나타내었다. 2000년, 2001년, 2004년, 2007년은 강우량의 차이에도 불구하고 각 항목별 부하량이 유사한 범위에서 모의되었다. 2001년~2003년에는 강우량이 증가함에 따라 TN부

하량도 유사한 경향을 보였지만 SS부하량과 TP부하량의 경우 2001~2002까지 증가경향을 보였으나 2003년에는 강우유출에 대한 영향이 감소하여 부하량이 감소하는 결과를 나타냈다. 강우시 유량변화에 따른 수질항목별 농도변화는 유량에 비례하여 증가하는 유형과, 유량에 비례하여 증가 후 다시 원래 수준으로 감소하는 유형, 유량 증가시 농도가 감소하는 유형 및 유량변화와 상관없이 일정농도를 유지하는 유형으로 구분이 가능한 것으로 보고된 바 있다 (Meybeck et al., 1992). 따라서 강우패턴에 따른 농도변화의 다양한 유형이 각 수질항목별 부

하량에 다소 영향을 미쳤을 것이라고 판단된다.

계절에 따른 부하량 변화를 분석하기 위하여 SS, TN, TP에 대한 5년 월별 평균 오염부하량을 산정하였으며 (Fig. 5), 각 항목별 결과는 Jang et al. (2009a)의 연구결과와 동일하다. SS의 오염부하량은 시기별로 차이가 있으나 저수기 혹은 평수기에는 점오염원에 의한 영향이 크며, 강우가 집중되는 하절기(6~9월)에는 비점오염원에 의한 영향이 크기 때문에 이 시기의 SS의 비점오염부하량은 전체 오염부하량의 88.7%나 차지하는 것으로 나타났다. SS농도는 강우변화에 민감하게 반응하여 하절기에 중간유출과 지표유출로 인해 높은 수질농도를 나타낸 반면, 비강우기에는 수질응답 특성에 따라 강우 전 수질 농도를 회복하는 경향을 보였다.

Table 3 Statistical analysis for average 10 years NPS pollution loads

	NS ^a	Min.	Max.	Mean(%) ^b	SE ^c	SD ^d	R ^e
SS(ton/yr)	10	22,961	168,518	66,833(30.0)	14,644	46,309	0.774**
TN(kg/yr)	10	594,903	1,356,187	967,985(60.1)	70,942	224,340	0.860**
TP(kg/yr)	10	11,668	56,344	26,257(35.4)	4,108	12,990	0.809**

^a: number of statistic, ^b: % of NPS load, ^c: standard error, ^d: standard deviation, ^e: correlation coefficient, **: correlation is significant at the 0.01 level

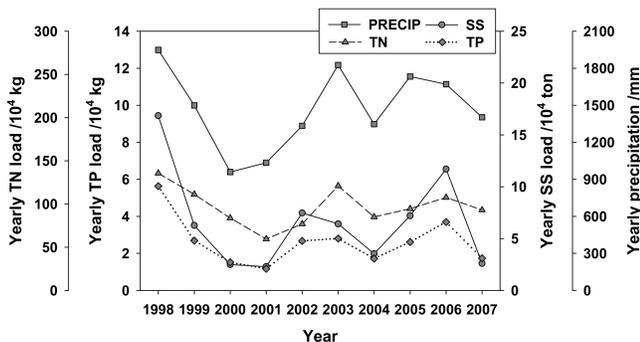


Fig. 4 Comparison among estimated average NPS pollution load(SS, TN and TP) and precipitation in outlet of study area

TN과 TP의 경우도 하절기에 비점원 오염부하량이 다량 배출(각각 61.8%, 82.8%)되며, 평수기 및 저수기에는 SS와 유사하였다. 갈수기 및 저수기에는 경안천을 유하하는 약 50만 톤/일 중 1/5가량이 용인시와 광주시 하수처리장에서 방류되는 처리수이며, 방류수에 포함된 고농도의 질소와 인이 하천 수질에 큰 영향을 미치고 있다 (Han River Basin Environmental Office, 2007). 질소 및 인 성분은 유기물질이나 부유물질처럼 강우초기에 많은 양이 유출되기보다 강우 후반에도 꾸준히 유출되며 토양입자에 흡착되어 있던 성분들이 서서히 유출되기 때문에 저수기에도 TN과 TP의 비점원 오염부하량의 비율이 SS보다는 비교적 많은 것으로 사료된다.

TN과 TP의 계절별 수질변화도 뚜렷하게 나타났는데, 겨울철 저수기에는 하수처리장 방류수와 하수관거월류수 등 점오염원의 증가와 하천의 자정능력 감소로 TN과 TP 수질에 절대적인 영향을 미친다. Kim et al. (2009)에 따르면 경안 A지점에서의 TN농도의 계절적인 변화는 환경기초시설 방류수질과 유의적인 상관성이 있다고 보고되었으며, Rim et al. (2000)은 점오염원의 영향이 지배적인 하천에서 수질악화는 희석유량이

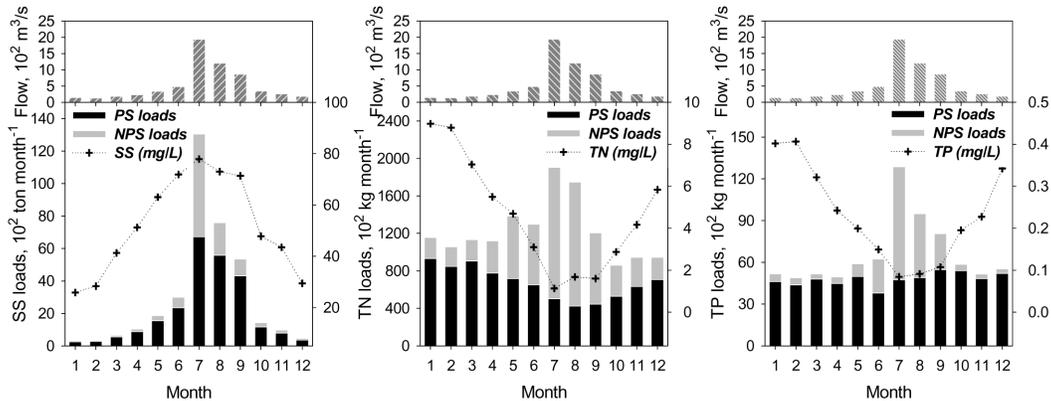


Fig. 5 Average monthly pollutant load and source composition to monthly concentration behavior (Jang et al., 2009a)

감소하는 갈수기에 나타나는 것으로 보고하였다. 저수기에서 풍수기로 접어들면서 TN과 TP농도는 수량이 풍부한 강우의 희석효과로 인해 수질이 양호해진 것으로 판단된다. 하천유량 조건에 따라 수질에 영향을 야기하는 요인들의 상대적인 중요성은 다르게 나타나는데 환경기초시설 방류수는 유량이 적은 시기에 그 중요성이 강조 될 수 있으며 (Kardis et al., 1983), 강우초기에는 강우유출로 인한 비점오염원의 영향이 증가될 수 있다.

3. 주요 비점오염원 영향지역 분석

비점오염원으로 인한 주요 오염지역을 판단하기 위해 모의결과로부터 SS, TN, TP의 비점원 오염부하를 산정하여 소유역 별로 각각 할당하였다 (Fig. 6, Table 4). 연구지역에 대한 비점원 오염우심지역을 판단하기 위해서는 지역내부의 영향과 상류유역의 개발로 인한 영향을 모두 고려할 필요가 있다. SS의 경우 No. 5 소유역이 3.97 ton/ha로 비점오염원에 의한 영향이 가장 크게 나타났고 No. 3, 4 소유역은 약 0.76 ton/ha 이하로 비교적 크게 나타났다. T는 No. 5, 17 소유역이 30.0 kg/ha 이상으로 가장 우심지역으로 나타났으며, 그 밖에 No. 6~11, 18 소유역도 16.8~18.9 kg/ha 수준으로 비점오염원의 영향이 비교적 큰 것으로 나타났다. TP의 경우 No. 5 소유역에서 2.49 kg/ha로 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 No. 3, 4, 17 소유역 또한 0.35~0.41 kg/ha 수준으로 비교적 높게 산정되었다. 반면에 경안천 상류에 위치한 No. 12~16 소유역은 비점오염원에 의한 영향이 비교적 작은 것으로 나타났다.

No. 1~5 소유역은 상수원보호구역으로서 주거지역이 차지하는 비중이 0.8~5.2 %인 만큼 개발이 많이 제한되어 왔으며, 대부분이 산지로 구성되어 있다 (Table 5). 농경지가 차지하는 비중이 10 %대로 농업활동이 다소 제한적이지만, No. 5 소유역의 경우 농경지가 유역면적대비 44 %로 타 지역에 비

하여 상당히 많은 부분을 차지하고 있다. 하천과 근접하여 집중적으로 분포하고 있으며, 비교적 경사지에 위치하고 있기 때문에 영농기간 및 강우시 농경지로부터의 배출수가 하천수질에 큰 영향을 미칠 수 있다. Ouyang et al. (2008)에 따르면 오염물질의 유출은 토지이용형태 보다는 경사도를 더 중요한 인자로서 제시한 바 있다. 또한 논, 밭의 경우 경작방식에 의한 중간낙수와 강우시 인위적인 물꼬 낮추기 등에 의한 질소 및 인 등의 비점원 오염물질이 하천수질에 미치는 영향을 충분히 예상할 수 있다. No. 5 유역의 상류에는 경안천 수위표 (No. 6,

Table 4 Average 10-year NPS SS, TN and TP loads distribution in subbasins

Unit subbasin*	Subbasin	SS (kg/ha)	TN (kg/ha)	TP (kg/ha)
Downstream	1	0.588	7.094	0.274
	2	0.428	5.896	0.208
	3	0.768	8.909	0.356
	4	3.971	30.186	2.494
	5	0.149	18.899	0.110
	18	0.111	16.673	0.089
Watermark	6	0.761	10.724	0.410
	8	0.116	17.048	0.107
	9	0.121	16.122	0.087
Gonjiam	17	0.072	11.892	0.060
	7	0.146	18.886	0.108
	10	0.117	17.746	0.086
Midstream	11	0.198	43.755	0.348
	12	0.114	16.803	0.090
Upper stream	13	0.074	11.900	0.061
	14	0.070	13.032	0.060
	15	0.063	12.993	0.062
	16	0.062	12.370	0.062

* : Unit boundary subbasins for the middle network of the Kyongan Stream watershed

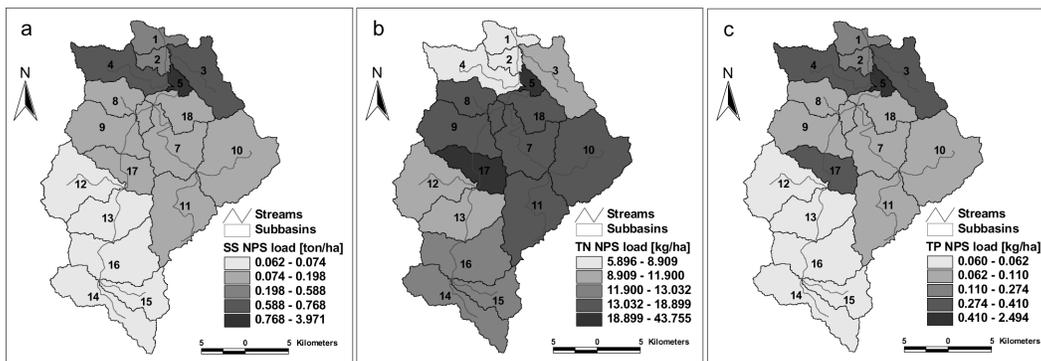


Fig. 6 Average 10-year NPS SS, TN and TP loading distribution in subbasins

Table 5 Land use characteristic by subbasins in the Kyongan Stream watershed

	Residue (%) ^a	Agriculture (%) ^a	Forest (%) ^a	etc. ^b (%) ^a	Total ^c
1	26.2 (1.9)	162.3 (11.7)	962.5 (69.3)	237.1 (17.1)	1,388.2
2	16.5 (1.9)	142.9 (16.6)	512.5 (59.5)	190.0 (22.0)	861.9
3	174.7 (4.7)	377.3 (10.1)	3,006.2 (80.5)	178.1 (4.8)	3,736.3
4	183.3 (5.2)	452.7 (12.9)	2,734.9 (77.8)	145.5 (4.1)	3,516.4
5	4.5 (0.8)	235.8 (40.7)	301.8 (52.1)	36.6 (6.3)	578.8
6	110.4 (19.7)	47.6 (8.5)	345.8 (61.6)	57.6 (10.3)	561.4
7	677.0 (17.9)	572.0 (15.1)	2,317.3 (61.2)	220.9 (5.8)	3,787.2
8	335.4 (16.4)	206.4 (10.1)	1,423.7 (69.5)	82.4 (4.0)	2,047.9
9	575.3 (14.9)	556.8 (14.4)	2,328.9 (60.2)	407.8 (10.5)	3,868.8
10	487.7 (7.1)	1,209.5 (17.7)	4,691.0 (68.7)	436.2 (6.4)	6,824.5
11	375.1 (7.3)	89.3 (19.2)	3,492.6 (67.9)	290.2 (5.6)	5,147.2
12	571.3 (12.5)	587.2 (12.8)	2,826.2 (61.7)	595.4 (13.0)	4,580.1
13	647.2 (16.7)	753.9 (19.4)	2,131.2 (54.9)	347.0 (8.9)	3,879.2
14	160.9 (15.8)	395.7 (15.9)	1,541.3 (63.7)	181.9 (4.6)	2,232.7
15	579.6 (11.4)	1,135.4 (18.2)	2,848.6 (64.2)	141.1 (6.1)	4,876.4
16	489.0 (11.9)	438.2 (23.3)	1,248.6 (58.4)	312.8 (6.4)	90.5
17	618.9 (20.5)	623.4 (18.3)	2,495.8 (52.2)	214.7 (9.0)	3,920.0
18	263.2 (7.2)	419.9 (17.7)	1,478.8 (69.0)	134.8 (6.0)	2,303.0
Total	6,296.3 (11.1)	9,306.5 (16.5)	36,687.6 (64.9)	4,210.0 (7.5)	56,500.4

^a : % of area, ^b : pasture, barren, wetland, water, ^c : unit of area (ha)

8, 9, 17)와 곤지암 유역 (No. 7, 10, 11)이 위치하며, 특히 곤지암 유역의 경우 No. 7 소유역을 제외하고는 주거지 비율 (7.1~17.9%)은 다소 낮으며 영농활동 (15.1~19.2 %)이 비교적 활발히 이루어지고 있기 때문에 이로 인한 비점원 오염물질의 배출이 하류 유역에 영향을 줄 수 있다. No. 17 소유역의 경우 농경지 비중이 크고 하천과 근접하여 농경지가 집중적으로 분포하고 있으며, 공장 등의 산업시설이 분포가 타 지역에 비해 많이 분포하고 있기 때문에 평상시와 강우시에 충분히 비점오염원으로서 역할을 할 것으로 판단된다. No. 17 소유역의 상류에 위치한 No. 13~16 소유역은 주거지와 농경지 비중이 비교적 높아 하류에 위치한 No. 17 소유역에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

4. 유역 수질관리방안 검토

경안천 유역의 비점원 오염을 제어하기 위해서는 우선 강우 초기에 발생하는 지표 유출수에 대한 적절한 대책 없이는 공공수역의 획기적인 수질개선은 기대하기 어렵다. 일반적으로 SS, 질소, 인 등의 비점원 오염물질은 초기강우로 인해 다양한 토지이용과 경로를 통하여 하천으로 유입된다. SS는 복잡·다양한 토지이용의 부적절한 식물피복으로부터 침식과 유실 등으로

쉽게 발생되며, 특히 질소와 인은 주로 농업활동으로부터 발생하는데 경작지내 비료 및 퇴비의 과다 사용이 가장 큰 문제이며 토양침식에 따른 시비의 세탈과 용탈, 축사폐수 등이 주원인으로 작용한다 (Shin, 2004).

SS와 영양물질 제어를 위한 첫 번째 대책은 농경지로부터 발생하는 영양물질원을 근본적으로 감소하기 위한 과학적 시비 (표준시비 저감)가 필요하다. 두 번째 대책으로 토사유출이나 산사태 등의 위험이 있는 경사지 상에 위치한 논과 밭을 초지나 산지로 변경하거나, 셋째 하천을 따라 수변원충지 및 침강지 등을 조성하고, 넷째 계단전 및 등고선재배 등의 경작형태는 토사나 영양물질의 유실을 저감할 수 있는 적절한 대책이 될 수 있다. 인의 경우에는 유출수의 토사입자에 흡착하여 각 유역 말단으로 이동된다. 비록 산림이 토양유실과 질소형태의 오염물질 유출방지를 위한 중요한 기능을 지니고 있지만 부분적으로는 인의 발생원이 될 수 있다. Shrestha and Kazama (2007)에 의해 보고된 바와 같이 인 함량은 산지로부터 부식되는 유기물과 명확한 상호관계가 있다. 따라서 다섯째는 하천변을 따라 초생대 조성, 산림의 가장자리에 초지 조성 등을 통해 산림으로부터의 인 유출을 저감할 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 농경지 및 산림의 토사유실 방지를 위한 식물피복 및 구조적 방안 등은 영양물질 저감에 효과적이며, 시비억제 등의 최적영농관리방안은 농업생산성을 최대화하고, 농업생태계의 지속성을 보전하며, 농촌비점원 오염의 제어를 위한 권장된 수단으로 자리잡아왔다.

북한강 및 남한강의 고령지 농업과 달리 경안천 유역의 대부분의 농업지역은 하천을 따라 좁은 충적평야로 이루어져 있어 집중 강우시 일부 오염물질이 지표로 흡수되거나 농경지나 산지로부터 식생수로 등의 자연 배수로나 인공방수로 등을 통해 직접 유출된다. 주거지역 및 도로와 같은 불투수지역의 경우 하천과 인접하여 발달하고 있어 강우유출수량의 증가로 직접적인 하천수질저하가 우려되지만 하천양안에는 홍수방지용 제방이 하천을 다양한 토지이용으로부터 격리시켜 놓고 있기 때문에 경안천 유역의 산지, 농경지 및 불투수 지역 등으로부터 발생된 강우유출수는 기존에 인위적으로 설치된 방수로를 통하여 일부 하수처리장으로 유입되거나 대부분이 하천으로 용 되고 있음을 알 수 있다. 따라서 강우시 방수로를 통해 유출되는 초기 유출수의 관리가 매우 중요하다. 이를 위해 유역의 강우특성 및 배수체계에 대한 이해가 선행되어야 하며, 방수로 말단에 하천과 인접하여 습지 및 저류지 등의 체류시설을 적절히 연계하여 운영한다면 경안천 유역의 비점원 오염물질을 효과적으로 제어할 수 있을 것이다.

최근에는 경안천 유역 농촌지역의 강우유출수 배출특성 (Lee et al, 2008), 경안천의 오염현황 (Yi and Park, 2004), 경안

천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사 (Kim et al, 2002) 등의 기초 연구가 수행되었고, 환경부에서는 비점오염원 유출저감을 위하여 자연형과 장치형 시설 등으로 처리형태를 구분하여 기술적으로 다양한 시설을 제시하고 있으며, 시설별 설치 및 관리 운영 매뉴얼을 작성하였다 (MOE, 2008). Han and Park (2004)는 경안천 유역의 적정규모의 수변구역 결정에 관한 방법을 제시하였고, Jang et al. (2009b)은 모델을 이용하여 수변구역의 녹지대 조성, 시비저감 및 유사저감 등의 농업관리, 수변구역 및 배수로 말단의 체류시설 조성 등의 최적관리방안을 적용한 결과, 비교적 높은 수질개선 효과가 있음을 보고하였다. 한강수계의 경우 현재 수질오염총량관리제의 임의 제를 실시하고 있으나 2009년부터 점차 의무제로의 전환을 계획하고 있어, 수질을 유지하고 관리하기 위한 체계적인 시스템의 구축이 요구되고 있다. 따라서 경안천 유역의 최적관리방안을 마련하기 위해서는 먼저 토지이용 및 하천 특성에 관한 선행연구는 물론, 모델을 이용한 수질개선효과 등의 등 관련연구가 지속적이고 체계적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 BASINS 기반의 SWAT 모델을 이용하여 SS와 TN, TP의 소유역별 비점원 오염부하를 할당하고, 유역 내의 주요 오염지역을 규명하여 유역환경의 최적관리를 위한 기초자료로서 비점원 오염을 효과적으로 제어할 수 있는 방안을 제안하고자 수행하였다.

BASINS 기반으로 SWAT 모델을 보다 손쉽게 구축하였고, 모델보정을 통해 모델의 적용성을 확인하였는데, 유출량의 경우 실측값에 대한 모의경향이 잘 반영 되었으며, 수질의 경우 유역이라는 광범위하고 복잡한 특성과 수질기작 등을 고려할 때 실측값을 적절하게 모의한 것으로 나타났다.

10년 평균 비점원 오염부하량을 산정한 결과, SS, TN, TP가 총량 대비 30.0%, 60.1%, 35.4%의 비율로 각각 산정되었다. 강우량 변화에 따른 유출량의 증감은 비점원 오염부하량 변화와 높은 상관성을 보이며, 비점오염원에 의한 부하량은 강우가 집중적으로 내리는 6월~9월 (풍수기)에 크게 증가하여 강우유출량에 직접적인 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 희석유량이 감소하는 겨울철 (저수기)에는 용인시와 광주시에 위치한 환경기초시설에 의한 점오염원의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 하천유량 조건에 따라 수질에 영향을 야기하는 요인들의 상대적인 중요성은 다르게 나타나며, 이에 따라 하절기 비점원 오염뿐만 아니라 갈수기의 수질악화에 대한 관리 모두 절실히 필요할 것으로 판단된다.

SS, TN, TP에 대한 비점원 오염부하를 각각의 소유역별로 산정하여 할당한 결과, No. 5와 17 소유역이 비점오염원에 영향을 가장 크게 받는 증점관리 대상 소유역으로 나타났다. No. 5와 17 소유역은 하천주변에 농경지가 집중적으로 분포하며, 공장 등의 산업시설이 다소 산발적으로 분포하고 있기 때문에 평상시와 강우시에 충분히 비점오염원으로써 작용했을 것으로 판단되며, 이들 소유역에 대한 상류지역 특성도 반드시 고려해야 한다. 곤지암 유역 (No. 7)의 경우 주거인구가 비교적 많고 영농활동이 활발히 이루어지고 있기 때문에 이로 인한 비점원 오염의 증가를 예상할 수 있었다.

경안천 유역 중 비점오염원의 영향이 지배적인 증점관리 대상 소유역의 수질개선을 위해서는 강우초기에 발생하는 지표 유출수에 대한 적절한 대책이 반드시 필요하며, 경안천 유역에 대한 강우특성 및 배수체계의 이해가 수반되어야만 최적관리방안을 마련할 수 있다. 본 연구에서 제안한 최적관리방안으로는 표준시비 저감, 농경지의 토지이용변경 (녹지대 조성), 수변완충지 및 침강지 조성, 작부체계 개선 (계단전, 등고선재배), 배수로 말단의 체류시설 조성 (습지, 연못) 등이 있으며, 다양한 수질관리방안을 증점관리 대상 소유역 등 경안천 유역에 적절히 적용한다면 비점원 오염에 대한 하천 수질악화를 최소화할 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Arnold, J. G., R. S. Muttiah, R. Srinivasan, and P. M. Allen, 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology* 227: 21-40.
2. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling. *American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
3. 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.
4. Bryant, R. B., W. J. Gburek, and T. L. Veith, 2006. Perspectives on the potential for hydrogeology to improve watershed modeling of phosphorus loss. *Geoderma* 131: 299-307.
5. Choi, J. H., J. H. Ha and S. S. Park, 2008. Estimation of the Effect of Water Quality Management Policy in Paldang Lake. *Korean Society of Environmental Engineers* 30(12): 1225-1230 (in Korean).

6. 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.
7. Han, H. J. and S. S. Park, 2004. A study on determination of an optimum riparian buffer zone based on analytical hierarchy process. *Korean Society on Water Quality* 20(6): 555-562 (in Korean).
8. Han River Basin Environmental Office, 2007. Water environmental management plans for the middle network of the Kyongan Stream (2008-2012) (in Korean).
9. Jang, J. H., C. G. Yoon, K. W. Jung, and S. B. Lee, 2009a. Characteristics of pollution loading from Kyongan stream watershed by BASINS/SWAT. *Korean Society of Limnology* 42(2): 200-211 (in Korea).
10. Jang, J. H., C. G. Yoon, K. W. Jung, and H. C. Kim, 2009b. Evaluation of the Impacts of Water Quality Management in Kyongan Stream Watershed with SWAT. *Korean Society on Water Quality* (in Korean), (under examination).
11. Jang, J. H., H. C. Kim, S. B. Lee, S. J. Lee, and A. H. S, 2007. Estimation by Assessing the Load Reduction Scenarios in Kyungan Stream Basin. *Autumn Conference of combined Korean Society on Water Quality and Korean Society of Water and Wastewater in 2007*, 737-744 (in Korean).
12. Kardis, M., L. Ignatiades, and N. Moschopoulou, 1983. An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 16: 339-334.
13. Kim, H. S., S. W. Lee, D. H. Rhew, and D. S. Kong, 2009. The effect of discharge loading at sewage treatment plants on water quality in Kyongan stream. *Korean Society on Water Quality* 25(3): 452-458 (in Korean).
14. Kim, S. S., J. S. Kim, K. Y. Bang, E. M. Gwon, and W. J. Chung, 2002. The Estimation of the unit load and characteristics of non-point source discharge according to rainfall in Kyongan watershed. *Korean Society of Environmental Engineers* 24(11): 2019-2027 (in Korean).
15. Lee, B. S., Y. J. Jung, M. J. Park, and K. I. Gil, 2008. A study on the discharge characteristics of non-point pollutant source in the agricultural area of the Kyongan watershed. *Korean Society on Water Quality* 24(2): 169-173 (in Korean).
16. Meybeck, M., G. Friedrich, R. Thomas, and D. Chapman, 1992. *Rivers. Water Quality Assessments*, Chapman, D. (ed), Chapman and Hall, London.
17. Miller, S. N., D. J. Semmens, and D. C. Goodrich, 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. *Environmental Modeling Software*, 22: 365-377.
18. MOE, 2008. Construction, Operation, and Maintenance Manual for Non-point Source Control Facility (in Korean).
19. MOE, 2003. Water environmental management plans, 「Pollution load classified by network and pollution source」 (in Korean).
20. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. Riverflow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
21. NAAS, 2000. 1:25,000 detailed soil map. [Http://asis.rda.go.kr](http://asis.rda.go.kr) Accessed 3 Jan. 2009 (in Korean).
22. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, and J. R. Williams, 2002. Soil and Water Assessment Tool User Manual (Version 2000). [Http://www.brcc.tamus.edu/swat](http://www.brcc.tamus.edu/swat). Accessed 25 Jun. 2009.
23. Ouyang, W., F. H. Hao, and X. L. Wang, 2008. Regional Non point Source Organic Pollution Modeling and Critical Area Identification for Watershed Best Environmental Management. *Water Air Soil Pollutan* 187: 251-261.
24. Rim, C. S., J. K. Shin and K. J. Cho, 2000. The trend and assessment of water pollution from midstream to downstream of the Kum River. *Korean Society of Limnology* 33(1): 51-60 (in Korean).
25. Santhi, C., R. Srinivasan, J. G. Arnold, and J. R. Williams, 2006. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. *Environmental Modelling & Software* 21: 1141-1157.

26. Shin, Y. K., 2004. Comparison of water quality between forested and agricultural subcatchments in Daewallyong area. *Korean Geographical Society* 39(4): 544-561 (in Korean).
27. Shrestha, S. and F. Kazama, 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental modelling Software* 22: 464-475.
28. Yang, H. M. and H. Kim, 2001. Calculation of pollutant loadings from stream watershed using digital elevation model and pollutant load unit factors. *Korean Institute of Landscape Architecture* 29(1): 22-31 (in Korean).
29. Yi, D. S. and K. S. Park, 2004. Status of water pollution of Gyeongan River, Korea. *Korean Society on Water Quality* 20(6): 698-702 (in Korean).