SWAT 모형을 이용한 두 인접 하천유역간의 비점오염 유출특성 비교연구

Runoff Characteristics Comparison of Nonpoint Source Pollution for Two Adjacent Stream Watersheds using SWAT Model

정충길* · 조형경* · 박종윤* · 김성준**†

Jung, Chung Gil · Joh, Hyung Kyung · Park, Jong Yoon · Kim, Seong Joon

ABSTRACT

This study is to assess the runoff characteristics of nonpoint source pollution loads for Jecheon and Jangpyeong stream watersheds located in the upstream of Chungju lake. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool), a physically based distributed hydrological model was calibrated and verified using 5 years (2006 to 2010) streamflow and water quality data. The Nash-Sutcliffe model efficiency for streamflow was 0.60~0.92 and the determination coefficients for sediment, Total Nitrogen (T-N), and Total Phosphorous (T-P) were 0.53~0.71, 0.51~0.91 and 0.38~0.85 respectively. The results showed that the Sediment, T-N, and T-P of Jangpyeong stream were 40.0~60.9 %, 34.8~64.1 % and 76.5~83.9 % higher than Jecheon stream watershed during wet days. The results evaluated high NPS loads at Jangpyeong stream because the percentage of urban and upland crop cultivation area Jangpyeong stream watershed was higher than Jecheon stream watershed.

Keywords: Non-point source pollution; SWAT; Runoff characteristics; Water quality

1. 서 론

하천이나 호수로 유입되는 오염물질의 발생원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있다. 점오염원은 주로 가정하수와 공장폐수로 구성되고, 일정한 지점에서 일정한 양이 지속적으로 발생되는 강우시나 비강우시 배출량에 큰 변동이 없다는 배출특성을 갖고 있다. 이에 비해 비점오염원은 오염물질이 주로 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로 도시지역의 먼지와 쓰레기, 농지에 살포된 비료 및 농약, 토양침식물, 축사유출물, 자연동식물의 잔여물, 대기오염물질의 강하물 등을 말한다. 비점오염물질은 일반적으로 강우시 유출되기 때문에 일간 및 계절간 배출량 변화가 크고 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건, 지질, 지형 등에 영향을 많이 받는 특성을 지니고 있다 (Choi, 2002).

최근에는 인구 증가와 산업의 고도화에 따른 수환경의 악화되고 있는 상황에서 삶의 질의 향상에 따라 시민들의 수환경 복원

에 대한 요구가 가중되고 있다. 대도시의 경우에는 우천시 발생되는 점오염원의 대부분은 하수처리시설에서 생물학적 처리를 통하여 오염물질의 적정농도로 낮추어져 공공수역으로 방류되고 있으며 대·중규모의 고도처리시설 운행 및 대책시설에 마련으로 점오염원 처리효율이 높아지고 있다. 따라서 점오염원의 처리에 의한 수환경보전효과는 기대되지만 비점오염원 (NPS, Non-Point Source)에 대한 처리대책을 수립하지 않고는 더 이상의 수환경보전을 기대하기 어려운 실정이다. 현재 우리나라에서의 수질오염에 대한 규제는 주로 하수, 공장폐수 등 점오염원을 중심으로 관리되어 왔다. 따라서 수질개선을 위해서는 점오염원의 규제와 병행하여 강우시 발생하는 비점오염원에 대한 관리도 시급한 실정이다 (Gweon, 2006).

도시 및 농경지에서 배출되는 비점오염물질은 단위면적당 오염부하가 다른 토지이용 특성에 비해 고농도이고 유기물과 영양염류뿐만 아니라 각종 중금속 및 유독성물질도 포함하고 있다. 이러한 비점오염원의 발생과 배출에 관한 기작 (Mechanism)은 매우 복잡하여 오염원 파악 및 정량화는 쉽지 않다. 따라서 효율적인 비점오염원의 관리를 위해서는 지형, 지질, 기후 및 토양 특성, 수문학적 특성, 영농형태 및 토지이용방법 등과 같은 다양한 변화 요인들을 포괄적으로 수용하여 오염물질의 이동 기작등을 예측할 수 있는 수학적 모형을 통한 모델링 기법에 의해 이루어져야 한다 (Choi et al., 2002). 유역에 따른 수문순환을 고려

* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과
** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3749
Fax: +82-2-444-0186
E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2012년 3월 16일 투고
2012년 5월 15일 심사완료
2012년 5월 15일 게재확정

하여 비점오염원의 발생거동을 평가할 수 있고 공간적인 변이에 따른 모델링이 가능한 수학적 모형으로는 ANSWERS, AGNPS, SWRRB, SWAT, HSPF 모형 등이 있다. 그 중 가장 많이 사용되고 있는 유역 단위모형 중 대표적인 모형인 SWAT 모형은 유역 내 수문 순환 및 비점오염원의 발생 및 거동을 고려하며, Geographic Information System (GIS) 기반의 모형으로써 수문 및 수질현상의 시간적·공간적 변화를 모의할 수 있다. 모형 구동을 위한 입력자료로 일 기상자료를 이용하여 고랭지 지역과 같은 기상변화가 심한지역의 수문 및 수질 현상 모의가 가능하며, 토양과 토지이용 및 관리 상태에 따라 반응한 대규모 유역의 물과 토사유출 및 농업화학물질 거동에 대한 토지관리 방법의 영향도 예측 가능하다 (Heo et al., 2008).

국내에서 SWAT 모형을 이용한 비점오염원 및 하천수질 모델링 연구로 Lm et al. (2003)은 HSPF와 SWAT 모형을 이용하여 산림유역의 유출 및 유사량을 추정한 바 있다. Jung et al. (2005)은 주암호 유역내 소유역인 외남천 유역을 선정, 모니터링을 실시하여 수문 및 수질관련 인자를 조사하고 분석하여 얻어진 유량 및 수질 관측치를 이용하여 농촌유역에 적합한 SWAT 모형의 적용성을 검토한 바 있다. Park et al. (2008)은 SWAT을 이용하여 미래 토지이용변화에 따른 유출량, 수질모의를 하여 기후변화 시나리오에 따른 수문 기작을 모의 하였다. SWAT 모형에 대한 국외연구로 Kirsch et al. (2002)은 미국 일리노이주에 있는 록강 유역에서의 SWAT 모형을 통해 침식과 인(Phosphorus) 부하량을 추정한 바 있다. 수질관련 모의는 Ouyang et al. (2010)은 SWAT 모형을 통하여 유기적 질소, 질산염 질소, 유사량 인 및 유기적 인을 모의하고 연구대상유역의 대표적 식생지역에 적용하여, Landscape 패턴이 비점오염원 영양물질에 미치는 영향과 영양물질 부하량을 예측하였다.

본 연구는 SWAT 모형을 이용하여 충주호 유입하천이면서 하천수질 오염이 높은 제천천 및 장평천유역을 대상으로 비점오염원 유출특성에 따른 부하량을 산정하고 그에 대한 소유역별 배출원인 및 배출경로를 파악함으로써 안정적이고 경제적인 최적의 비점오염원 저감시설 설치 기본계획을 수립하고 궁극적으로 수질오염총량 관리계획 및 물관리 기본계획에 대한 효율적 추진의 기초 자료로 활용하기 위한 지표를 얻고자 연구를 진행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상유역 및 입력자료

본 연구의 대상유역은 남한강의 중류부에 위치한 충주호로 유입되는 하천유역으로 제천천과 장평천을 선정하였으며 제천천과 장평천에 합류지점을 유역출구로 지정하여 두 하천을 각각 분리하여 각 하천에서의 발생하는 오염부하량을 산정하였다 (Fig. 1).

제천천은 지방 2급 하천으로써 강원도 원주시 신림면을 기점으로 충청북도 제천시 보양읍을 경계로 흐르며 장평천은 지방 2급 하천으로 충청북도 제천시 자작동에서 시작하여 제천천과 합류한다. 제천천 전체 총 유역면적 320.3 km² 중 시험유역인 제천천과 장평천에 합류지점에서의 제천천유역면적은 153.1 km², 장평천유역면적은 111.1 km²이고 유로연장 45.0 km로서 행정구역상 원주시 (17.4 %), 제천시 (78.9 %), 충주시 (3.7 %)가 포함되어 있으며 토지이용현황은 산림이 대부분 (75.8 %)이며 나머지 밭, 논 순으로 구성되어 있다. 유역의 평균기온은 13.1 °C이며 평균습도는 65 %이고 연평균 강수량은 1400 mm이고 월별 강수량의 시간적 편중이 심하다. 유역의 수문학적 특성으로 유역폭에 비해 하천연장이 길어 하천의 수질관리 측면에서 하천 상류와 하류부의 수질농도 차이가 대체적으로 크게 나타날 수 있다. 제천천 및 장평천 이 두 하천은 제천 시가지의 생활하수 및 유역 내 축산폐수가 정체성 수역인 충주호로 직접 유입됨에 따라 제천천의 수질오염은 충주호의 수질오염과 직결되어 충주호까지 영향을 미치므로 처리 방안이 강구되어야 한다 (Kim, 2001).

기본 지형입력자료 구축을 위하여 NGIS의 1:5,000 수치지도로부터 격자크기 30 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하고 (Fig. 2a), SWAT 모형의 자동경계추출 (Automatic Delineation) 모듈에서 DEM을 입력자료로 하여 지형전처리 과정을 수행하였다. 토지이용도는 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나이다. 토지이용 정보는 증발산, 침투, 지표유출 등의 수문학적 구성 요소들에 영향을 미치며 토지이용의 영향은 유출량의 변화뿐만 아니라 질소와 인으로 대표되는 비점오염원 부하량에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수정보 중에 하나인 토지이용도는 환경정보로부터 1:25,000 중분류 토지이용도 구축하였다 (Fig. 2b).

Fig. 1 The location of study area

Fig. 2 Spatial input data for model setup

SWAT 모형은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 모형이므로 토양통 자료를 구축하는 것이 핵심이다 (Kim et al., 2006). 이를 위해 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 기준으로 분류하였다 (Fig. 2c).

모형의 입력자료가 되는 기상자료는 제천시 인근의 문정, 영월, 영주, 원주, 제천, 충주 기상관측소에서 2004년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 관측된 일별 강수량, 온도, 태양복사량, 풍속, 상대습도 자료를 구축하였다. 모형의 보정은 제천천 및 장평천 유역출구에 관측지점이 존재하지 않아 충주호 유입부에 해당하고 제천시 행정구역도 접해 있는 제천A지점에서 검보정을 실시하였다 (Fig. 1). 실측자료는 국립환경과학원에서 제공하는 유역 출구 지점부에 위치해 있는 오염총량제 (TMDL) 제천A 관측소에서의 유량자료 (2006~2010년)를 사용하였으며 수질자료 수문관측소와 동일 지점인 제천A에서의 8일 간격 Sediment, Total Nitrogen (T-N), Total Phosphorus (T-P) 농도자료를 구축하여 오염 부하량으로 환산하였다 (Fig. 1).

2. 제천천 하천수질 현황

제천천은 환경부 수질측정망에서 지속적으로 수질을 측정하고 있는 지점으로 제천천 주요 지류와 본류에 총 5지점이 있으며 또한 총량관리제 계획수립 및 단위유역 수질평가를 위하여 한강물환경연구소에서 측정하는 지점이 제천천과 장평천 합류후 충주호 유입지점에 위치하고 있다. 환경부에서 수질측정망 지점에 대해 모니터링을 시작한 2004년 8월부터 2009년 12월까지의 수질 및 유량 측정 자료를 조사하여 월별, 연도별 주요 수질을 분석한 결과 BOD의 경우 봄과 여름에 강우에 따른 일시적인 수질악화현상을 보이고 있고, T-N은 강우시 수질이 좋아지고 저수기, 갈수기에 악화되는 현상을 보이고 있는 것으로 나타났다. 제천천의 경우 BOD는 과거 (2000~2011년) 평균농도는 0.9 mg/L 현행 수질환경기준 Ia 등급인 “매우좋음”에 해당하였으며 T-N

및 T-P는 과거 (2000~2011년) 평균농도는 각각 3.0 mg/L 및 0.028 mg/L로 측정되었다. 또한 장평천에서의 BOD는 과거 (2000~2011년) 평균농도는 4.2 mg/L 현행 수질환경기준 III 등급인 “보통”에 해당되고 T-N 및 T-P는 과거 (2000~2011년) 평균농도는 각각 9.1 mg/L 및 0.580 mg/L로 측정되었다.

3. SWAT 모형 개요

본 연구에서는 수문·수질모의를 위한 모형으로 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 장기-강우 유출 모형 (continuous rainfall-runoff model)으로 장기간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량 및 미세측유역의 비점원오염을 추정하기 위해 미국 농무성 농업연구소 (USDA, ARS)에 의해 개발된 유역모델이다. SWAT 모형은 전체유역을 대유역 (Basin)과 소유역 (Subbasin)으로 구획한 뒤에 다시 균질한 (Homogeneous) 최소 물질 이송 영역을 수문반응단위 (Hydrology Response Unit, HRU)로 분할하며 모의가 된다. SWAT 모형의 토양침식과 유사량은 수정범용토양침식공식 (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)에 의해 추정되는데, USLE가 침식에너지의 지표로서 강우를 사용하는 반면에 MUSLE는 침식과 유사량을 모의하기 위해 총 유출량을 사용한다. 영양물질은 주 하천에 유입되고 지표 유출 및 측방 지하 유출에 의하여 하류로 운송되어 유역에서 질소와 인의 여러 형태로 나타나는 전이와 이동을 추적한다 (Neitsch et al., 2000).

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 적용성 평가

매개변수 추정을 위하여 SWAT의 입력유형별 매개변수를 정리하여, 총 유출량 및 침투유량과 감수곡선 형태에 영향을 미치

Table 1 The calibrated SWAT model parameters

Parameter		Definition	LB	UB	Sensitivity	Adjusted Value
Q	ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0	1	High	0.8
	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	Medium	0.55
	GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0	500	High	150
	GW_REVAP	Groundwater “revap” coefficient	0.02	0.2	Medium	0.2
	CH_N2	Manning's “n” value for the main channel	0.01	0.3	Medium	0.09
SN	SFTMP	Mean air temperature at which precipitation is equally likely to be rain as snow/freezing rain (°C)	-5	5	Medium	1
	SMTMP	Threshold temperature for snow melt (°C)	-5	5	Medium	0
	SMFMX	Melt factor on June 21 (mm H ₂ O/day-°C)	0	10	Medium	2
	SMFMN	Melt factor on December 21 (mm H ₂ O/day-°C)	0	10	Medium	1
	TIMP	Snow pack temperature lag factor	0	1	Medium	0.05
	SNOCVMX	Threshold depth of snow, above which there is 100 % cover	0	500	Medium	500
	SNO50COV	Fraction of SNOCVMX that provides 50 % cover	0	1	Medium	0.1
SD	CH_COV	Channel cover factor	0	1	Medium	0.55
	PRF	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	0	2	High	0.1
	CH_EROD	Channel erodibility factor (cm/hr/Pa)	0	0.6	High	0.55
	USLE_P	USLE equation support practice factor	0	1	High	0.002
T-N	CH_ONCO	Organic nitrogen concentration in channel	0	100	Medium	0.15
	ERORGN	Organic nitrogen enrichment ratio	0	5	High	0.2
T-P	CN_OPCO	Organic Phosphorus concentration in channel	0	100	Medium	0.01
	GWSOLP	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to streamflow from subbasin	0	1000	High	0.2

Q: Streamflow, SN: Snow parameter, SD: Sediment, T-N: Total Nitrogen, T-P: Total Phosphorus, LB: Lower bound, UB: Upper bound

Table 2 The SWAT results of streamflow during calibration and validation periods

Period		PCP (mm)	Streamflow (mm)		Runoff ratio (%)		R ²	NSE
			Obs.	Sim.	Obs.	Sim.		
Calibration	2006	1,719.8	1071.8	1,147.8	62.3	66.7	0.79	0.60
	2007	2,067.3	1303.5	1,291.2	63.1	62.5	0.85	0.70
Validation	2008	885.8	505.8	537.9	57.1	60.7	0.68	0.71
	2009	1,277.4	737.3	758.9	57.7	59.4	0.92	0.92
	2010	1,545.2	958.8	952.4	62.0	61.6	0.71	0.61
Mean		1499.1	915.4	937.6	60.4	62.2	0.79	0.71

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, PCP : Precipitation

Table 3 Summary of statistics for annual NPS pollution loads for the SWAT calibration and validation periods

Year	PCP (mm)	No. of data	Sediment (ton)			T-N (kg)			T-P (kg)		
			Obs.	Sim.	R ²	Obs.	Sim.	R ²	Obs.	Sim.	R ²
2006	1,719.8	35	152.4	123.4	0.53	91296.9	70964.7	0.51	3729.8	3977.1	0.52
2007	2,067.3	44	158.5	151.1	0.62	154674.5	99622.7	0.57	6472.2	4980.5	0.85
2008	885.8	44	94.06	59.4	0.48	62559.5	62828.2	0.87	3312.8	4163.6	0.38
2009	1,277.4	45	133.9	71.5	0.71	102937.6	76405.7	0.91	2084.9	4947.1	0.39
2010	1,545.2	42	106.2	94.6	0.53	114251.4	84673.3	0.78	2083.5	4812.9	0.57
Mean	1499.1	42	129.0	100.0	0.57	105143.9	78898.9	0.73	3536.6	4576.2	0.54

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, PCP : Precipitation

Fig. 3 Comparison of observed and simulated daily (a) Streamflow, (b) Sediment, (c) T-N (d) T-P

는 매개변수와 Sediment, T-N 및 T-P 보정을 위한 매개변수를 선정하여 유역별 불확실성을 분석하고 민감도 분석에 따른 최적의 매개변수를 선정하였다 (Table 1). 지표수흐름관련 매개변수로는 ALPHA_BF, CH_N2 순으로 민감하게 반응하였고 지하수 흐름은 GW_DELAY, GW_REVAP 순으로 나타났다. Sediment 매개변수로는 PRF, CH_EROD와 USLE_P가 가장 민감하였다. T-N 매개변수로는 SOL_NO3와 T-P 매개변수로는 GWSOLP가 가장 민감하게 반응하였다.

모델에 대한 검보정은 총 5개년도 (2006~2010)동안 모의를 실시하였으며 3개년 (2006~2008)동안 제천천과 장평천의 합류후 충주호 유입지점인 제천A 지점에서 총 유출량을 보정하였으며, 2개년 (2009~2010)간의 자료를 대상으로 검증을 실시하였다. 결과의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 결정계수 (R^2)와 모델의 효율성 검증은 Nash와 Sutcliffe (1970)가 제안

한 모델 효율성계수 (NSE)를 사용하였다. Table 2는 유출 보정 및 검정 결과와 유출율을 나타낸 것으로, R^2 는 0.68~0.92, ME는 0.60~0.92로 모의치와 실측치의 유출량은 유의성이 있는 것으로 분석되었다. 유출량 보정 후, 수질항목에 대해 보정을 실시하였다. SWAT 모형에서 T-N, T-P는 Sediment의 이동과 유출에 의해 영향을 받기 때문에 T-N, T-P에 대한 보정에 앞서 Sediment에 대한 보정 및 검정을 실시하였다. Table 3은 제천A 지점에서 Sediment 및 T-N, T-P 검·보정 결과를 정리한 것으로 실측치와 모의치의 Sediment 및 T-N, T-P를 비교한 것으로 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영한 것으로 분석되었으며 Sediment의 R^2 는 0.53~0.71, T-N 및 T-P는 각각 0.51~0.91, 0.38~0.85로 분석되었다. Fig. 3은 검·보정기간동안의 실측치와 모의치의 수문곡선, Sediment, T-N 및 T-P 그래프를 비교한 것이다.

Table 4 Summary of statistics for annual nonpoint source pollution loads between Jecheon stream and Jangpyeong stream

Year	PCP (mm)	Sediment		T-N		T-P	
		Jecheon stream	Jangpyeong stream	Jecheon stream	Jangpyeong stream	Jecheon stream	Jangpyeong stream
		ton/km ² /day	ton/km ² /day	kg/km ² /day	kg/km ² /day	kg/km ² /day	kg/km ² /day
2006	1,719.8	1.2	4.2	1,086.6	3,587.8	54.4	394.0
2007	2,067.3	1.1	4.3	1,358.6	4,508.1	57.0	367.7
2008	885.8	0.4	1.5	516.8	2,858.1	31.2	191.1
2009	1,277.4	0.7	2.4	825.1	2,873.6	33.9	313.7
2010	1,545.2	0.9	2.8	1,022.1	3,686.3	45.8	328.5
Mean	1499.1	0.9	3.0	961.8	3502.8	44.5	319.0

Table 5 Statistical summary for annual Sediment (ton), T-N (kg) and T-P (kg) loads during wet day and dry day

Component		Jecheon stream						Jangpyeong stream					
		Wet day			Dry day			Wet day			Dry day		
		Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min
2006	Sediment	0.9	19.8	0.01	0.2	7.5	0.01	2.3	68.3	0.13	0.8	44.5	0.14
	T-N	878.1	11044.2	22.6	272.9	4572.9	21.1	1347.1	7411.2	235.1	932.9	7586.0	459.8
	T-P	37.5	455.7	4.2	16.4	411.0	5.1	208.1	2688.0	13.5	64.7	2245.0	14.5
2007	Sediment	0.9	16.2	0.01	0.3	2.9	0.01	2.3	51.2	0.12	0.7	14.1	0.14
	T-N	917.8	8090.0	35.0	387.9	3207.3	33.1	1604.4	9022.3	252.0	1175.8	6955.3	454.7
	T-P	37.0	322.5	5.0	17.0	70.4	5.7	188.6	2519.2	14.5	66.9	835.3	14.5
2008	Sediment	0.3	7.2	0.01	0.1	6.9	0.01	0.5	5.5	0.14	0.4	10.6	0.14
	T-N	302.1	3836.6	26.8	179.0	3770.5	25.1	842.3	4996.0	166.2	830.7	6164.5	450.2
	T-P	17.0	192.3	4.9	11.3	113.3	4.9	72.3	678.1	14.5	49.1	776.1	14.4
2009	Sediment	0.5	10.3	0.01	0.2	4.0	0.01	1.0	27.6	0.09	0.6	38.6	0.11
	T-N	527.7	11030.6	2.6	249.1	4273.5	1.5	1039.4	9690.5	257.2	860.9	7300.0	389.7
	T-P	23.3	347.9	3.0	10.5	98.3	3.2	145.2	3050.0	14.5	56.0	656.0	14.5
2010	Sediment	0.5	13.2	0.01	0.3	7.5	0.01	0.9	11.4	0.10	0.8	21.1	0.12
	T-N	564.3	5658.6	4.1	327.4	4131.5	1.8	1069.2	5472.3	190.3	1039.8	4409.1	514.6
	T-P	24.2	270.0	4.1	15.8	173.9	2.5	116.6	1041.7	14.5	66.5	744.2	14.4

Ave.: Average data, Max: Maximum data, Min: Minimum data

2. 비점오염유출특성 분석

가. 강우-유출 모의에 따른 비점오염 부하량 산정

비점오염원 부하특성을 분석하기 위하여, 다른 유역에서의 오염원발생을 배제한 제천천과 장평천 합류지점에서의 각각의 유역에서 시기별 원단위 비점오염원부하량을 분석하였다 (Table 4). 분석 결과 제천천에 비해 장평천에 하천수질오염정도가 평균적으로 Sediment, T-N 및 T-P가 오염정도가 높게 산정되었다.

일반적으로 강우량 증가에 따라 비점오염원부하량이 증가하게 되는데 장평천에서는 연 강우량이 1000 mm 보다 작게 내리는 가뭄해에도 비점오염원부하량이 상당한 것으로 나타나므로 주변지역에서의 강우에 의해 유입되는 오염원뿐만 아니라 하천에서의 점오염원에 의해 발생하는 오염원부하량이 크다고 볼 수 있다.

강우 유출에 따른 비점오염원부하량을 분석하기 위해 연도별 건기 (Dry day)와 우기 (Wet day)로 나누어서 비점오염원부하량을 산정하였다 (Table 5). 여기서, 우기는 강우에 의한 지표유

Fig. 4 The monthly distribution of nonpoint source pollution loads from 2006 to 2010 year

출이 발생한 기간을 의미한다. 그 결과, 두 유역 모두 강우유출에 따라 비점오염원부하량은 비례함을 나타냈다. Table 5에서 Wet day일 때 평균 부하량의 차 (장평천-제천천)가 Sediment 연평균 0.2~1.4 ton, T-N 및 T-P는 각각 469.0~686.6 kg 및 55.3~170.6 kg로 장평천이 제천천에 비해 비점오염원 부하량이 높게 나타났다. 장평천이 제천천에 비해 강우시 Sediment, T-N 및 T-P 부하량이 평균 51.2, 47.6, 80.4 % 많다는 것을 알 수 있다. 반면, Dry day동안에 평균 부하량의 차 (장평천-제천천)는 Sediment 0.3~0.6 ton, T-N은 611.8~787.9 kg, T-P는 37.8~50.7 kg로 장평천이 제천천 보다 높게 나타났으며 연평균 Sediment, T-N 및 T-P는 각각 67.3, 71.2 및 76.7 % 높게 산정되었다.

특정기간 유출 및 강우에 따른 비점오염원부하량을 파악하기 위해 월별 및 Spring (3월~5월), Summer (6월~8월), Autumn (9월~11월) 그리고 Winter (12월~2월)로 계절별 비점오염원 부하량을 산정하였다 (Fig. 5). 그 결과 두 유역 모두 Sediment, T-N 및 T-P의 비점오염원부하량의 분포가 7월과 8월에 집중됨을 나타내고 있다. 반면에 제천천 T-P의 경우는 3월~10월까지 고르게 분포하고 있음을 알 수 있다. 계절별 분석결과 Summer와 Autumn에 유역에 비점오염원부하량이 높았으며 특히 비점오염원부하량이 높은 장평천에서의 계절별 연평균 비점오염원부하

량은 Sediment 경우 Spring에서는 227.6 ton, Summer 1866.9 ton, Autumn 307.6 ton, Winter 178.5 ton이며 T-N은 Spring에서는 2803.4 kg, Summer 3214.5 kg, Autumn 1604.2 kg, Winter 2761.8 kg으로 유역내에 비점오염원부하량이 상당한 것으로 나타났다.

나. 비점오염원 발생부하량 분석

비점오염원 부하특성을 분석하기 위한 방법으로 소유역별 비점오염원 발생부하량을 분석하였다. 소유역별 하천으로 유입되는 비점오염원부하량과 동일기간에 하류 소유역으로 유출되는 비점오염원부하량의 차이로부터 비점오염원 발생부하량을 산정하였다. Fig. 5는 제천천과 장평천에 연평균 소유역별 비점오염원 발생부하량을 그림으로 분포시켜 나타낸 것이다. 이 결과로부터 상류단일하천에서의 비점오염원 발생부하량은 작게 나타났고 상류하천이 합류되어 흐르는 소유역과 분기율이 높은 소유역에서는 비점오염원 발생부하량 분포가 크게 나타났다. Fig. 5와 같은 비점오염원 발생부하량 분포를 분석하기 위해 제천천 및 장평천에 소유역별 토지이용면적 및 점유율 (%)을 Table 6에서 나타냈다. 장평천과 비교해 오염정도가 낮은 제천천에서의 Sediment와 T-P 발생부하량이 가장 큰 유역은 1번 소유역이며 유역출구지점으로 산림면적과 논, 밭 및 도시지역이 모두 분포되어 있는 유역으로

Table 6 The landuse area for each subbasin of Jecheon stream (153.1 km²) and Jangpyeong stream watershed (111.1 km²)

Sub basin	No	Area (km ²)						Area (%)					
		Upland crop	Paddy	Forest	Urban	Grass land	Total	Upland crop	Paddy	Forest	Urban	Grass land	Total
Jecheon stream	1	0.8	1.0	2.4	0.6	0.0	4.8	17.4	21.2	49.6	11.8	0.0	100.0
	2	0.4	0.2	0.7	0.0	0.1	1.4	28.6	14.3	50.0	0.0	7.1	100.0
	3	2.1	2.2	28.0	0.0	0.0	32.3	6.6	6.7	86.7	0.0	0.0	100.0
	4	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0
	5	0.6	0.2	2.2	0.0	0.0	3.0	20.0	6.7	73.3	0.0	0.0	100.0
	6	0.7	0.0	10.6	0.0	0.0	11.3	6.0	0.0	94.0	0.0	0.0	100.0
	7	1.8	0.8	11.5	0.0	0.0	14.1	12.8	5.7	81.5	0.0	0.0	100.0
	8	1.4	0.0	14.2	0.0	0.0	15.6	9.0	0.0	91.0	0.0	0.0	100.0
	9	0.8	0.7	5.5	0.0	0.0	7.0	11.4	10.0	78.6	0.0	0.0	100.0
	10	1.7	0.0	16.6	0.0	0.0	18.3	9.3	0.0	90.7	0.0	0.0	100.0
	11	2.0	0.0	33.9	0.0	0.0	35.9	5.6	0.0	94.4	0.0	0.0	100.0
Total		12.3	5.1	135.0	0.6	0.1	153.1	8.0	3.3	88.2	0.4	0.1	100.0
Jangpyeong stream	1	1.8	1.6	10.0	0.9	0.0	14.3	12.8	11.0	69.9	6.3	0.0	100.0
	2	2.9	2.1	6.3	0.9	0.0	12.2	23.8	17.2	51.6	7.4	0.0	100.0
	3	1.5	0.7	4.3	4.5	0.0	11.0	13.6	6.4	39.1	40.9	0.0	100.0
	4	3.5	3.7	11.6	0.7	0.0	19.5	17.9	19.0	59.5	3.6	0.0	100.0
	5	2.1	2.4	6.0	1.1	0.0	11.6	18.1	20.7	51.7	9.5	0.0	100.0
	6	3.2	2.8	4.6	6.2	0.0	16.8	19.0	16.7	27.4	36.9	0.0	100.0
	7	5.1	3.8	15.4	1.4	0.0	25.7	19.8	14.8	60.0	5.4	0.0	100.0
Total		20.1	17.1	58.2	15.7	0.0	111.1	18.1	15.4	52.4	14.1	0.0	100.0

Sediment와 T-P에 오염정도가 다른 소유역에 비해 높으며 이는 논과 밭에서의 비료와 같은 오염가능물질의 영향과 도시지역에서의 유출증가와 도시생활하수와 축산단지 폐수 등의 영향을 모두 받은 것으로 보인다. 제천천 소유역중 T-N 발생부하량이 가장 높은 7번 소유역으로 소유역 면적 중 논 및 밭이 차지하는 비율이 높게 나타나 질소와 인에 농도가 높게 나타나는 양상을 보였다. 비점오염원부하량 뿐만 아니라 비점오염원 발생부하량

도 높게 나타나는 장평천 유역에서는 모든 소유역에서 비점오염원 발생부하량이 높게 나타났으며 특히 유역출구지점과 그에 인접한 1번 및 3번 소유역에서 각각 T-N 및 Sediment, T-P가 높게 산정되었다. 이는, 1번 및 2번 소유역에서는 산림에 대한 면적 비율이 높아 일반적으로 안정되어 있으나, 단기적으로 집중호우에 의해서 장기적으로 토양침식물 및 영양물질 등의 발생부하량이 높다고 간주되며 3번 소유역 및 6번 소유역은 도시지역

Fig. 5 The mapping of annually mean residual NPS loads from 2006 to 2010 year

에 면적비율이 높아 단위면적당 비점오염원 발생량이 높게 나타났다.

IV. 결 론

본 연구는 충주호에 유입되는 제천천과 장평천에서의 비점오염원 유출특성 분석을 위해 SWAT 모형을 이용하여 각 대상하천에서의 시공간적 비점오염원부하량과 소유역별 비점오염원 발생부하량을 산정하여 비교분석하였으며 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

제천천과 장평천에 시공간적 비점오염원부하량 유출특성을 분석한 결과 제천천에 비해 장평천에 하천수질오염정도가 평균적으로 Sediment, T-N 및 T-P가 약 70.0 %, 72.5 % 및 86.1 % 오염정도가 높게 산정되었다. 장평천에서는 연 강우량이 1000 mm 보다 작게 내리는 가뭄해에도 비점오염원부하량이 상당한 것으로 나타나므로 주변지역에서의 강우에 의해 유입되는 오염원뿐만 아니라 점오염원에 의해 하천에서의 차지하는 오염원부하량이 크다고 볼 수 있다.

강우 유출에 따른 비점오염원부하량을 분석하기 위해 연도별 Dry day와 Wet day로 나누어서 오염원부하량을 산정하였다. 장평천이 Wet day일 때 제천천에 비해 Sediment, T-N 및 T-P 오염원부하량이 평균 51.2, 47.6, 80.4 % 많다는 것을 알 수 있다. 반면 Dry day일 때 하천에서의 오염원부하량은 장평천이 제천천 보다 연평균 Sediment, T-N 및 T-P는 각각 67.3, 71.2 및 76.7 % 높게 산정되었다.

소유역별 비점오염원 발생부하량을 분포시킨 결과 상류단일하천에서의 비점오염원 발생부하량은 작게 나타났고 상류하천이 합류되어 흐르는 소유역과 분기율이 높은 소유역에서는 비점오염원 부하량의 분포가 크게 나타났으며 Spring (3월~5월), Summer (6월~8월), Autumn (9월~11월) 그리고 Winter (12월~2월)로 계절별 비점오염원부하량을 산정한 결과 두 유역모두 여름과 가을에 유역에 비점오염원부하량이 높게 나타났다.

제천천에서의 Sediment와 T-P 비점오염원 발생부하량이 가장 큰 유역은 1번 소유역이며 유역출구지점으로 산림면적과 논, 밭 및 도시지역이 모두 분포되어 있는 유역으로 Sediment와 T-P 등에 오염정도가 다른 소유역에 비해 높았으며 이는 논과 밭에서의 비료와 같은 오염가능물질의 영향과 도시생활하수와 축산단지 폐수 등의 영향을 모두 받은 것으로 보인다. 장평천 유역에서는 모든 소유역에서 비점오염원 발생부하량이 높게 나타났다. 1번 및 2번 소유역에서는 산림에 대한 면적 비율이 높아 일반적으로 안정되어 있으나, 단기적으로 집중호우에 의해서 장기적으로 토양침식 및 영양물질 등의 발생부하량이 높다고 간주되며 3번 소유역 및 6번 소유역은 도시지역에 면적비율이 높아 주거,

상업 및 공업 활동에 의해 발생하는 고농도의 물질로 단위면적당 부하가 다른 토지이용에 비해 크게 나타나며 비점오염원 발생부하량 역시 1번 소유역에서 많은 물질의 양이 저류되고 있음을 알 수 있다. 그 결과, 강우시 총 비점오염원부하량은 비강우시 비점오염원부하량에 비해 Sediment, T-N, T-P 모두 크게 나타나고 강우시 오염비율이 높게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과에 요인으로 장평천은 주거시설, 상업시설 및 도로 시설 등이 밀집되어 있는 지역으로 각 소유역에서 주거, 상업 및 도로 시설등에서 발생하는 비점오염물질이 제천천 유역에 비해 장평천 유역에서 차지하는 불투수층 면적이 넓어 강우시 초기우수유출수가 다량의 오염부하를 발생시키는 것으로 예상되어 강우시 초기우수유출수에 따른 다량의 오염부하를 발생시켜 높은 부하량을 나타낸 것으로 판단되며 토지계에 따른 비점오염부하량 산출시 장평천은 축산 및 매립시설에서의 발생부하량이 제천천에 비해 높은 발생부하량을 나타내고 있다고 간주된다.

본 연구는 제천천과 장평천에서의 소유역별 비점오염원 유출특성에 대해 연구하였다. 소유역별 비점오염원 발생부하량 산정과 시공간적 비점오염원부하량의 산정은 유역관리 및 오염총량제 등의 필요자료로 유용하게 이용될 것으로 판단되지만 추 후 연구로 소유역별 토지피복에 따른 비점오염원 발생부하량을 산정하여 각 소유역별 토지피복특성에 적합한 오염부하 저감 대책을 수립하기 위한 연구가 진행되어야 할 것이다. 본 연구에 기대 효과 및 활용방안으로 충주호 유입하천 유역에 대한 유역관리 및 오염총량제 등의 제제를 위한 의사결정에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며 각 주요 지천 오염원의 발생 및 배출 특성 파악, 대표 소유역별 실측 비점오염원부하량의 산정, 비점오염원의 저감시설 관리방안 수립, 비점오염원 최적관리 기본계획 수립에 지표로서 활용될 것으로 기대된다.

이 논문은 2011년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0029851).

REFERENCES

1. Choi, J. Y., 2002. Management of nonpoint pollution by reducing storm runoff, RE03. Korea Environment Institute (in Korean).
2. Gweon, Y. D., 2006. Runoff characteristic of nonpoint pollution source with generation source in urban area for Chuncheon city. Master's D. thesis, Kangwon University (in Korean).

3. Heo, S. G., D. S. Yoo, K. S. Kim, H. H. Ahn, Y. S. Park, J. G. Kim, W. S. Jang, and H. J. Lim, 2008. Evaluation of nonpoint source pollution at Highland watershed using the SWAT. *Journal of the KCID* 15(2): 36-49 (in Korean).
4. Jung, J. W., K. S. Yoon, K. H. Han, W. Y. Choi, J. B. Lee, and H. G. Choi, 2009. Evaluation of SWAT model for nutrient load from small watershed in Juam lake. *Journal of the Environmental Sciences* 18(9): 1027-1033 (in Korean).
5. Kim, G. Y., 2001. A study on the water quality management for stream and lake. Master's D. thesis, Yonsei University (in Korean).
6. Kim, N. W., I. M. Chung, and Y. S. Won, 2006. An integrated surface water-groundwater modeling by using fully combined SWAT-MODFLOW model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 26(5B): 481-488 (in Korean).
7. Kirsch, K. L., A. Kirsch, and J. G. Arnold. 2002. Predicting sediment and phosphorus loads in the Rock river basin using SWAT. *Transaction of the ASAE* 45(6): 1757-1769.
8. Lm, S. J., K. M. Brannan, S. Mostaghimi, and J. P. Cho, 2003. Predicting runoff and sediment yield on a forest dominated watershed using HSPF and SWAT models. *Journal of the Korean Society of Rural Palnning* 9(4): 59-64 (in Korean).
9. Nash, J. E., J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
10. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams. 2001. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000: Draft-April 2001. Temple, TX, USA: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Texas.
11. Park, J. Y., M. S. Lee, Y. J. Lee, and S. J. Kim, 2008. The analysis of future land use change impact on hydrology and water quality using SWAT model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(2B): 187-197 (in Korean).
12. Ouyang, W., A. K. Skidmore, A. G. Toxopeeus, and F. Hao, 2010. Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin. *Journal of Hydrology* 389: 373-380.