



축산농가에서 배출되는 비점오염 물질이 소규모 유역에 미치는 영향

Effect of NPS Loadings from Livestock on Small Watersheds

이수인* · 신민환* · 전제홍* · 박병기** · 이지민* · 원철희* · 최종대*[†]

Lee, Su In · Shin, Min Hwan · Jeon, Je Hong · Park, Byeong Ky · Lee, Ji Min · Won, Chul Hee · Choi, Joong Dae

Abstract

The objective of this paper was to quantitatively analyze the effect of concentrated animal feeding operations (CAFO) NPS pollution on a small watershed water quality. Monitoring was conducted from March to October, 2013. Monthly flow rate and selected water quality at each monitoring site were measured during dry days. Rainy day monitoring also was conducted. Modeling was conducted to evaluate the effect of CAFO NPS pollution on the water quality at the watershed outlet. The highest and mean concentration of selected water quality indices during rainy days were higher than those in dry days in general. The highest TN concentration measured at the CAFO pollution discharge point was 237.831 mg/L. The results revealed that the CAFO NPS pollution sources could be equally blamed for the water quality degradation of the stream. However, the effect of the NPS pollution from CAFOs seemed not to be very influential to the watershed water quality at the outlet. SWAT modeling revealed that the TN load was reduced by 18.95 %, 23.39 % and 30.53 % at the watershed outlet if the TN load at the CAFO NPS pollution discharge point reduced by 20 %, 40 % and 60 %, respectively. It was thought that the natural attenuation processes played an important role. The modeling was based only on the assumption of the load reduction and not verified by the monitored data. Therefore, it was suggested that a long term monitoring studies for the evaluation of the impact of CAFO NPS pollution on the watershed water quality be conducted.

Keywords: Livestock; NPS Pollution; Pollution Load; SWAT

1. 서 론

비점오염원관리 업무편람에 따르면 비점오염원은 공장, 하수처리장, 축사 등과 같이 오염물질 배출 지점이 명확한 점오염원을 제외하고 오염물질이 불특정하게 배출되는 도시, 도로, 농지, 산지 등을 말한다 (Ministry of Environment, 2006). 특히 우리나라는 전체 국토의 25 %를 농업지역이 차지하고 있는데, 하천 및 호수에 유입되는 오염물질 중 약 30 % 이상이 농업 활동 등에 의한 농업비점오염원으로 분석되고 있다 (Shin, 2013; Shin et al, 2011; Jung et al., 2012). 이에 따라 농업지역에서 발생하는 비점오염물질을 저감하기 위해 초생대, 녹비작물, 밭두렁, 빗물우회수로, 지표피복, 계단식 논 등의 최적관리 기법들이 제안되어 왔으며, 국내 많은 연구자들에 의해 최적 관리기법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 (Shin et al., 2012; Won et al., 2011). 그러나 그동안의 농업지역 비점오염

물질 저감을 위한 대책은 논과 밭과 같이 농경지에 관한 것이 대부분이었으며, 축산은 관리 기준의 가장 기초라고 할 수 있는 지목분류기준에조차 별도의 기준이 없는 실정이다 (National Institute of Environmental Research, 2008). 축산 시설은 폐수 처리 및 재활용 시설이 운영되고 오염물질 배출 지점이 일정하여 점오염원으로 분류되어 있지만, 부실한 관리로 강우-유출수와 함께 배출되는 축산분뇨 등은 농업지역 비점오염원의 일부분으로 정의하기도 한다. 이러한 축산 폐수는 다른 폐수에 비해 오염부하가 훨씬 높아 하천 수질에 큰 영향을 끼치고 있다 (Lee et al., 2001). 축산농가로부터 발생하는 미처리 배출수는 공공처리시설의 배출수 수질과 비교하여 7~28배의 고농도로 하천에 유입되고 있음에도 불구하고 (Ministry of Environment, 2006), 세분류 토지이용에 대해 토지계 원단위를 새롭게 제정하기 위한 연구에서 축산지역이 제외되어 있으며, 축산비점오염원의 배출특성 규명 및 정량화가 수행되지 않는 실정이다. 축산농가에서 배출되는 오염물질이 특정 지역에 집중되어 새로운 환경오염 문제로 대두되고 있음에도 불구하고 안정적인 육류의 공급과 농촌의 소득향상을 위하여 축산업 장려를 위한 축산진흥정책 지원이 이루어지고 있다 (Jeong et al., 2006). 현재까지 축산 비점오염원은 접근이 어렵고 관리주체가 모호하여 좀처럼 규명 되지 않았으며, 전국적으로 그 영향이 정량화되지 않아 실질적인 관리 및 대책마

* Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

** Han River Environment Research Center

† Corresponding author

Tel.: +82-33-250-6464 Fax: +82-33-251-1518

E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

Received: January 21, 2014

Revised: January 5, 2015

Accepted: February 2, 2015

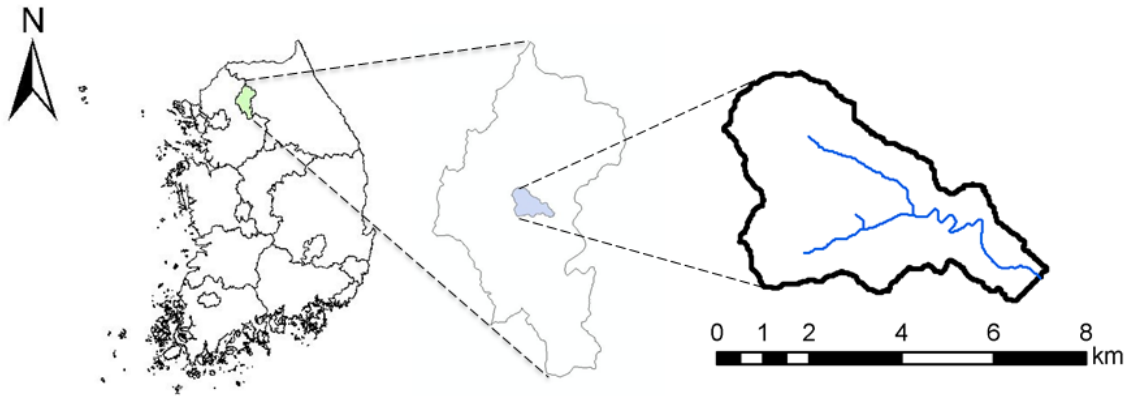


Fig. 1 Location of the study area

련에 어려움이 있다. 따라서 가축분뇨의 발생으로부터 처리, 자원화에 이르기까지 각 관리체계에 있어서 축산비점오염의 배출경로와 수계오염부하, 수질환경 영향을 정밀하게 분석하여 향후 대책마련을 위한 기초자료 확보가 필요하다. 축산비점오염원의 효과적인 관리를 위해서는 축산비점오염원 배출 특성에 대한 종합적인 연구가 밑바탕 되어야 하며, 이러한 연구결과는 여타 분야의 비점오염연구 및 유역·수질관리에 크게 기여할 것으로 기대된다. 따라서, 본 연구에서는 축산농가의 분뇨개별처리시설과 공공처리시설이 포함되어 있는 소규모 유역을 대상으로 배경농도(산림)와 축산 배출수, 그리고 유역의 말단에서 발생하는 비점오염물질을 모니터링하여 정량화 하였으며, 모델링을 이용하여 축산농가에서 발생하는 비점오염물질이 소유역에 미치는 기여도를 분석하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 유역특징

연구대상 유역은 경기도 가평군 두밀리 일대로 두밀천과 달전천이 합류되어 하류로 흐르며 유역 총 면적은 1,839 ha이다(Fig. 1). 이 중 논, 밭, 과수원 등과 같은 농경지가 차지하는 면적은 182 ha로 전체 유역의 약 9.92%를 차지한다. 그리고 산림은 87.94% (활엽수림 668 ha, 침엽수림 849 ha, 혼효림 1.01 ha), 나머지 1.82%는 펜션 등의 시가지 지역으로 구성되어 있다. 수치지형도를 분석한 결과 85~905 m의 표고를 나타내고 있으며, 유역 평균 경사도는 48.47%로 나타났다. 유역 내에는 약 6,300두의 돼지 축산농가와 자원화 시설이 포함되어 있으며, 이 중 약 4,400두에서 배출되는 노는 유역 내 개별 처리시설을 통해 처리한 후 하천으로 방류되고 있다. 나머지 1,900두에 대한 노는 타 지역의 처리 시설로 이송되며, 가평

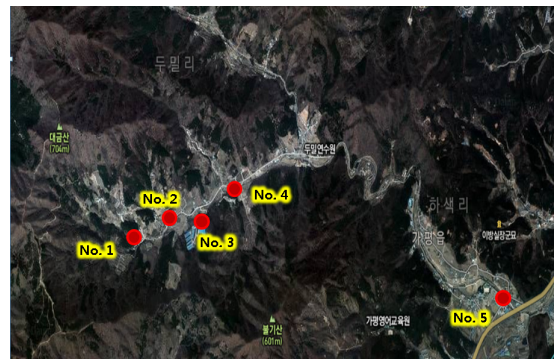


Fig. 2 The monitoring site in the small scale watershed

지역에서 배출되는 대부분의 분은 유역 내 자원화 시설에서 톱밥발효를 통한 퇴비화 처리 후 주변 농가에 배포하고 있다.

2. 모니터링 및 분석

축산농가에서 발생하는 비점오염물질의 유출을 특성 분석을 위해 유역 상류부터 말단까지 5개 지점(두밀천상류(No. 1), 축산상류(No. 2), 축산 배출수(No. 3), 축산하류(No. 4), 유역말단(No. 5))을 선정하여 유출량과 수질 농도를 분석하였다(Fig. 2). 유역의 배경농도를 분석하기 위한 최상류(No. 1)지점과 축산농가에서 배출되는 오염물질이 하천의 유량과 수질 농도에 미치는 영향 분석을 위해 축산에서 배출되는 유출수가 유입되는 지점(No. 3)과 상류(No. 2) 및 하류(No. 4)를 모니터링 지점으로 선정하였다. No. 3 지점은 비강우시에는 산림유출수가 흐르지 않으며, 축산농가에서 개별처리과정을 거치지 못한 오염물질(노)가 하천으로 그대로 유입되는 지점이다. 또한 연구대상 유역에서 발생하는 비점오염물질이 하천에 미치는 영향을 분석하고자 유역에서 발생한 유출수가 북한강 본류와 합쳐지기 전인 지점(No. 5)을 모니터링

Table 1 Monitoring site description

Site	Description
No. 1	Upstream monitoring site of Doomilcheon
No. 2	Upstream of livestock wastewater discharge site
No. 3	Livestock wastewater discharge site
No. 4	Downstream of livestock wastewater discharge site
No. 5	Outlet site of the study watershed

지점으로 선정하였다. 기상 및 강우 자료는 대상유역에 인접한 가평기상 관측소의 관측 자료를 이용하였으며, 모니터링 조사기간은 겨울철을 제외한 2013년 3월부터 10월까지 수행하였다. 선정된 5개의 모니터링 지점은 Table 1과 같으며, 강우시와 비강우시를 비교하여 모니터링을 실시하였다.

No. 1~4 지점의 유출량은 횡단면에서의 흐름 단면적과 평균 유속을 측정하여 산정하였으며, No. 5 지점에서는 초음파 수위계 (Kalesto)를 설치하여 10분 간격으로 수위를 측정하고 수위-유량 관계 곡선식을 이용하여 유량으로 환산하였다.

수질 분석은 SS, COD, BOD, TN, TP 항목을 Standard Methods (APHA et al, 1995)와 수질오염 공정시험방법 (Ministry of Environment, 2009)에 따라 분석하였으며, 탁도는 다항목 수질 측정기 (WQC-22A)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 분석한 유량과 수질농도를 이용하여 각 수질항목별 오염부하를 계산하였으며, 오염부하 계산식은 식 (1)와 같다.

$$\text{Pollutant Load (kg)} = k \cdot \sum_{i=1}^N C_i \cdot q_i \cdot t_i \quad (1)$$

여기서 오염부하 단위는 kg이고, k는 단위 환산계수, qi는 유량 (m³/s), Ci는 i번째 수질 시료의 농도 (mg/L)이다. 또한, N은 각 강우사상마다 분석된 시료의 개수이며, ti는 $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 에 해당하는 i번째 샘플로서 표현되는 시간 구간이다.

3. 오염원 배출부하의 하천기여도 분석

축산농가에서 배출되는 오염물질이 소유역에 미치는 기여도를 평가하기 위해서 SWAT 모델을 이용하였다. 모델의 보정은 SWAT-CUP 이용하였으며, 대상 지역에 SWAT 모델 적용성 평가는 NSE와 R²를 이용하였다.

축산 배출수 모의를 위하여 축산 배출수 모니터링 지점인 No. 3을 Point source로 가정하고 강우시와 비강우시 모니터링을 통해 얻은 유량과 오염부하 자료를 입력자료로 이용하여 모의하였다. 연구대상 유역 내의 축산농가에서 처리시설

을 통하지 않은 배출수는 특정 배출구를 통해 유출되고 있고, 모니터링 또한 이 지점을 통해 이루어졌기 때문에 축산시설을 점오염원 시설로 가정하여, 모니터링 자료를 근거로 한 부하량 저감 시나리오를 적용하였다. 모니터링 결과를 입력자료로 구축한 시나리오A와 축산농가에서 배출되는 축산 배출수의 TN 부하량이 20% 저감되었을 때를 모의한 시나리오B, 40% 저감되었을 때를 모의한 시나리오C, 그리고 60% 저감되었을 때를 모의한 시나리오D 유역 말단에서의 오염부하가 어떻게 변화되는지 비교함으로써 축산농가 배출수가 하천에 미치는 영향에 대하여 평가하고자 하였다.

가. 모델 개요

SWAT 2009 (Rev. 477)모형은 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 유역모델로서, 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하기 위하여 개발되었다 (Neitsch et al., 2005). 기본적으로 SWAT은 수문, 토양유실, 영양물질, 그리고 하도추적 등 4개의 submodel로 구성되어 있으며, 일별 간격으로 유출, 유사, 영양물질, 부하량의 영향을 평가할 수 있도록 개발 되어, 장기 유량 및 수질을 모의할 수 있다 (Arnold and Srinivasan, 1994).

나. 입력자료 구축

SWAT 모형을 이용한 수문 및 수질의 분석을 위해서는 시간적으로 변화하는 기상자료와 공간적으로 다르게 분포하는 토지이용현황과 토양속성, 지형자료 및 영농자료 등이 필요하다 (Arnold 1992; Arnold et al., 1998). 본 연구의 모델 적용 기간은 2008~2013년으로, 일 강수량 (mm), 일 최대-최저기온 (°C), 풍속 (m/sec), 일 수평면 일사량 (MJ/m²), 상대습도 (%) 등은 모니터링 지역과의 인접거리가 각각 약 25 km와 12 km 내외인 춘천과 가평 기상관측소 자료를 이용하였다. 각각의 기상인자에 대한 일별 자료를 dbf 파일 형태로 작성하여 모델의 입력 자료로 구축하였다. 또한 유역구분 및 하천망 구축을 위해 National Spatial Information Clearinghouse (<http://www.ngic.go.kr>)에서 제공하는 수치지형도 (1:25,000)를 GIS 프로그램을 이용하여 30×30 m 격자크기의 DEM을 구축하였으며, Environmental Geographic Information System, (EGIS, <http://egis.me.go.kr>)에서 제공하는 중분류 토지피복도 (2009) 자료를 이용하여 SWAT 모형의 입력 자료를 구축하였다.

다. SWAT-CUP 모델을 이용한 자동보정

SWAT-CUP (ver. 2.1.4)은 SWAT 모델의 매개변수 보정을 위한 보조 프로그램으로 스위스 EAWAG 연구소에서 개

발되었다(Abbaspour, 2007). SWAT-CUP 내부에는 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver. 2), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), Parasol (Parameter Solution), MCMC (Markov Chain Monte Carlo), PSO (Particle Swarm Optimization)의 5가지 통계 알고리즘이 구성되어 있다. 본 연구에서 이용한 SUFI-2 알고리즘은 순차적이고 반복적인 매개변수 산정 프로그램으로 다섯 가지 알고리즘 중 보다 사용이 간편하고 다양한 연구자들 (Abbaspour 등, 2007; Rostamian 등, 2008)에 의하여 적용성을 검증 받았다. 매개변수 추정은 사용자가 임의로 보정에 사용되는 변수를 추출할 수 있으며, 추출된 매개 변수는 사용자가 지정한 횟수만큼 반복적으로 모형 연산을 수행하여 최적 매개변수를 추정한다. 보정기간은 2013년 3월부터 10월까지이며, 모니터링을 통해 얻은 No. 5 지점의 실측 자료를 기준으로 유량과 TN 항목의 매개 변수를 보정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 모니터링 결과

가. 강우 및 유출특성

연구기간 동안 발생한 총 강우량은 1,181.6 mm이며, 장마철인 7~8월 사이에 발생한 강우량은 969.1 mm로 전체 강우 발생량의 82.0 %을 차지하는 것으로 나타났다. 강우사상별 강우량은 7월 11일부터 7월 16일까지 기간 동안 총 485.1 mm로 가장 많았다. Fig. 3은 관측된 일별 강수량과 No. 5 지점의 유출량 자료 및 평시와 강우시 모니터링 시기를 나타내었다. Fig. 3과 같이 평시 8회, 강우시 14회의 모니터링을 실시하였

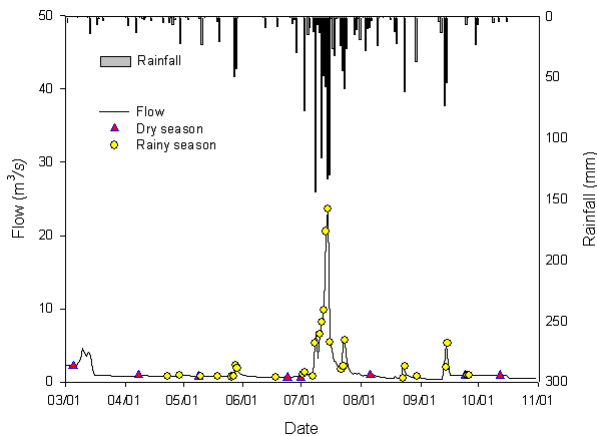


Fig. 3 Characteristics of rainfall and runoff in the small scale watershed (No. 5)

다. No. 5 지점의 유량 산정결과 평시 유량은 0.070~0.970 m³/s를 유지하였으나, 강우시에는 0.643~4.087 m³/s로 강우에 따라 유량이 크게 증가하였다. 또한 강우시 유량은 강우가 집중된 7월에 가장 많은 것으로 나타났다.

나. 지점별 수질농도

평시와 강우시를 구분하여 수질농도를 분석하였다 (Table 2). 수질농도 분석 결과 대상유역의 배경농도로 볼 수 있는 No. 1 지점의 평시 BOD 농도는 0.8~5.52 mg/L, COD 농도는 1.6~21.6 mg/L, TN 농도는 1.225~4.810 mg/L, TP 농도는 0.012~0.425 mg/L, SS는 0.3~0.9 mg/L 그리고 탁도는 0.0~4.0 NTU 값을 나타냈으며, No. 1 지점의 강우시 BOD 농도는 0.4~5.2 mg/L, COD 농도는 1.2~33.8 mg/L, TN 농도는 1.256~9.825 mg/L, TP 농도는 0.019~0.774 mg/L, SS는 0.4~575.0 mg/L 그리고 탁도는 0.0~4.0 NTU 값을 나타내었다. 축산 상류 지점인 No. 2 지점의 평시 BOD 농도는 0.8~5.5 mg/L, COD 농도는 1.8~37.4 mg/L, TN 농도는 2.115~12.202 mg/L, TP 농도는 0.014~0.434 mg/L, SS는 0.667~13 mg/L 그리고 탁도는 1.0~55.0 NTU 값을 나타냈으며, 강우시 No. 2 지점의 BOD 농도는 0.2~5.5 mg/L, COD 농도는 1.8~49.9 mg/L, TN 농도는 2.214~14.053 mg/L, TP 농도는 0.0~0.613 mg/L, SS는 0.5~1026.9 mg/L 그리고 탁도는 0.0~958.0 NTU 값을 나타내었다. 분석 결과 BOD를 제외한 모든 수질 항목에서 강우시에 높은 값으로 나타났지만 그 차이가 크게 나타나지 않았다. BOD의 경우 평시 수질농도가 강우시의 수질농도가 더 크게 나타났으나, BOD 또한 강우의 유무로 대소 구분을 명확히 판정하기엔 그 차이가 크게 나타나지는 않았다. 이는 No. 1 지점과 No. 2 지점 모두 유역의 상류 지점으로 하류 지점과 비교하여 오염원이 적고, 강우에 따른 고농도의 오염물질이 하천으로 유입되지 않기 때문에 강우시와 비강우시의 농도 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. No. 3 지점의 경우 강우시와 비강우시 모두 SS와 탁도를 제외한 모든 수질항목에서 가장 높은 농도값을 보였다. No. 3 지점은 축산 농가에서 배출되는 오염물질을 모니터링 하는 지점으로 산림이나 농경지와 다르게 강우에 의한 입자성 부유물질 등의 증가는 없기 때문인 것으로 보인다. 이는 축산 배출수가 하천을 오염시키는 오염원이지만 강우시 하천의 탁수를 유발함에 있어 축산 배출수보다는 산림이나, 주변 농경지로부터 발생하는 입자성 부유물질, 토사 등의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. No. 3 지점 수질 분석결과 BOD, TN, TP 평균농도 비교결과 강우시에 비강우시보다 높게 나타났으나, COD는 비강우시에 더 높게 나타났다. 이는 축산 배출수가 상시 배출되지 않고 간헐적으로 발생하며, 배출량이 일정하지 않기 때문에 농도의 최고값과 최대

Table 2 Water quality of monitoring site during the rainy and dry season, respectively

Site	Monitoring season	Value	Item					
			BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)
NO. 1	Rainy	Range	0.4~5.2	1.2~33.8	1,256~9,825	0.019~0.774	0.4~575.0	0.0~383.5
		Average	2.3	10.2	4,877	0.140	47.1	43.0
	Dry	Range	0.8~5.22	1.6~21.6	1,225~4,810	0.012~0.425	0.3~9.0	0.0~4.0
		Average	2.6	5.9	2,940	0.124	2.6	1.2
NO. 2	Rainy	Range	0.2~5.5	1.8~49.9	2,124~14,053	0.0~0.643	0.5~1026.9	0.0~958.0
		Average	2.3	15.1	5,478	0.145	87.6	94.3
	Dry	Range	0.8~5.5	1.8~37.4	2,115~12,202	0.014~0.434	0.667~17	1~55
		Average	3.6	16.4	4,149	0.103	6.93	8
NO. 3	Rainy	Range	0.3~105.0	4.2~223.2	3,225~237,831	0.014~1.075	0.3~220.0	0.0~70.0
		Average	10.2	42.5	44,509	0.218	25.7	14.1
	Dry	Range	0~30.3	0~577.2	0~262,167	0~0.85	0~433.5	0~255
		Average	4.6	80.9	31,184	0.212	57.907	27.2
NO. 4	Rainy	Range	0.2~163.0	1.6~121.0	3,126~12,390	0.0~0.804	0.1~689.7	0.0~895.0
		Average	8.5	28.2	6,889	0.141	83.1	115.3
	Dry	Range	0.75~5.48	1.9~35.6	2,935~9,032	0.0~0.450	0.333~7.333	0.0~32
		Average	2.9	11.8	4,993	0.122	2.803	6.667
NO. 5	Rainy	Range	0.6~6.1	0.8~112.8	2,115~7,801	0.0~0.628	0.8~892.0	0.0~900.0
		Average	2.8	20.2	5,116	0.123	56.6	57.6
	Dry	Range	0.21~3.34	1.9~32.8	1,818~5,965	1.0~4.667	0.0~7.0	0.0~7
		Average	2.0	17.7	3,086	0.097	2.585	2.9

값의 차이가 크게 나타났기 때문에 판단된다. 그러나 최대 농도 값은 SS와 탁도를 제외한 모든 수질 항목에서 비강우시에 측정되었다. 이는 강우시에는 축산배출수가 산림으로부터 발생하는 강우유출수와 함께 희석되어 하천으로 유입되었으며, 평시에는 축산농가에서 개별처리과정을 거치지 못한 오염물질(노)가 하천으로 그대로 유입되었기 때문에 판단된다. 반면, 유역말단(No. 5) 지점의 농도를 비교한 결과 말단에서의 평균 수질농도는 평시에는 BOD는 0.21~3.34 mg/L, COD는 1.9~32.8 mg/L, TN은 1.818~5.965 mg/L, TP는 1.0~0.097 mg/L, SS는 0.0~7.0 mg/L, 탁도는 0~7 NTU로 나타났다. 이는 유역의 배경농도와와의 차이가 크게 나타나지 않는 결과이다. 축사로부터 배출된 오염물질이 하류로 유하하면서 산림 유출수에 의한 희석과 생화학적 분해 작용을 통한 자연정화 작용이 이루어져 수질이 정화되어 하천의 배경농도와 크게 차이가 나타나지 않는 것으로 판단된다. 강우시 유역말단(No.5) 지점의 수질 농도 또한 배경농도와 큰 차이가 발생하지 않았다. 이는 축산 배출수의 경우 고농도로 하천으로 유입되지만, 그 양이 매우 적고 강우시 늘어난 유량으로 인하여 오염물질이 희석되어 그영향이 매우 적게 미친 것으로 판단된다.

다. 그러나, 축산농가와 농경지에서 배출되는 오염물질이 하천에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 유달울과 같은 기준이 마련되어야 더욱 정량적인 평가가 이루어질 것으로 판단된다. 따라서 지속적인 모니터링을 통한 다양한 방법의 정량화 연구가 필요한 것으로 보여진다.

다. 오염부하

Table 3은 축산 배출수 모니터링 지점(No. 3)에서 강우시 발생한 오염부하이다. 분석결과 No.3 오염부하는 BOD 0.9~5,714.0 kg/day, COD 3.5~9,628.7 kg/day, SS 0.5~2,944.2 kg/day, TN 0.7~3,554.9 kg/day, TP 0.0~146.4 kg/day의 범위로 산정되었다. 축산농가 배출수(No. 3)는 4월에서 6월 사이에 고농도로 하천에 유입되었지만, 강우시 산림으로부터 발생하는 유출수와 함께 유출되어 강우가 집중된 7월에 오염부하량이 높게 나타났다. Table 4는 강우시 유역 말단 지점(No. 5)에서의 오염부하이다. Table 4와 같이 BOD 71.1~11,984.9 kg/day, COD 234.0~63,758.9 kg/day, SS 83.4~1,550,132.2 kg/day, TN 95.5~13,198.3 kg/day, TP 0.0~1,093.9 kg/day의 범위로 산정되었으며, 7월에 오염부하가 가장 크게

Table 3 Pollutant loads of monitoring site No. 3 during rainy day

Date	Rainfall (mm)	BOD	COD	SS	TN	TP
		(kg/day)				
2013-04-23	5.0	5.3	82.1	13.7	12.1	0.1
2013-04-29	22.0	2.5	101.3	6.0	42.8	0.1
2013-05-09	1.5	1.6	27.8	22.5	97.3	0.1
2013-05-19	20.5	23.7	31.4	7.6	177.4	0.1
2013-05-28	42.5	17.5	24.1	0.5	33.8	0.2
2013-05-29	1.0	11.1	22.5	19.0	28.0	0.1
2013-07-01	0.0	1.0	11.4	4.0	0.7	0.0
2013-07-02	77.0	15.2	94.5	36.2	208.9	1.3
2013-07-11	115.5	11.0	479.7	298.1	340.5	3.8
2013-07-12	48.0	14.4	538.3	42.0	302.6	0.5
2013-07-13	57.5	9.5	439.4	140.2	116.1	3.8
2013-07-14	133.0	131.1	479.6	561.3	147.7	4.0
2013-07-15	130.0	5,714.0	7,109.8	2,944.2	3,554.9	146.4
2013-07-16	1.5	1,359.8	9,628.7	485.3	1,510.9	22.5
2013-08-05	9.0	0.9	3.5	2.0	5.1	0.0
2013-08-29	36.5	1.9	22.5	42.8	18.6	0.1
2013-09-13	73.0	3.4	278.3	71.8	81.2	0.5

Table 4 Pollutant loads of monitoring site No. 5 during rainy day

Date	Rainfall (mm)	BOD	COD	SS	TN	TP
		(kg/day)				
2013-04-23	5.0	202.3	274.0	114.2	449.4	1.6
2013-04-29	22.0	156.1	234.9	1,464.7	492.9	4.4
2013-05-09	1.5	178.5	397.3	195.2	245.9	5.6
2013-05-19	20.5	247.3	655.8	444.0	315.2	2.9
2013-05-28	42.5	1,162.5	1,465.6	1,008.2	1,309.7	35.9
2013-05-29	1.0	651.6	1,978.6	770.5	1,204.9	18.5
2013-07-01	0.0	175.4	1,313.1	94.5	95.5	6.8
2013-07-02	77.0	178.2	1,526.8	3,493.2	381.7	21.3
2013-07-11	115.5	723.5	63,758.9	20,913.8	3,065.2	66.2
2013-07-12	48.0	637.4	60,843.0	3,823.4	3,705.4	50.2
2013-07-13	57.5	1,840.1	44,429.7	45,508.2	5,724.4	78.7
2013-07-14	133.0	2,675.7	52,881.7	1,550,132.2	13,198.3	1,093.9
2013-07-15	130.0	11,984.9	57,521.2	258,281.2	12,073.8	747.4
2013-07-16	1.5	2,453.8	11,861.1	29,579.3	2,638.6	63.4
2013-08-05	9.0	147.7	2,586.1	83.4	323.7	0.0
2013-08-29	36.5	71.1	576.5	449.1	310.9	10.2
2013-09-13	73.0	179.9	5,929.6	13,785.0	744.0	5.7

Table 5 Direct comparison of Site No. 3 NPS load to Site No. 5 loads
(Unit: %)

Date	BOD	COD	SS	TN	TP
2013-04-23	2.6	30.0	12.0	2.7	6.0
2013-04-29	1.6	43.1	0.4	8.7	2.0
2013-05-09	0.9	7.0	11.5	39.6	1.0
2013-05-19	9.6	4.8	1.7	56.3	2.7
2013-05-28	1.5	1.6	0.1	2.6	0.6
2013-05-29	1.7	1.1	2.5	2.3	0.5
2013-07-01	0.6	0.9	4.2	0.8	0.5
2013-07-02	8.5	6.2	1.0	54.7	6.3
2013-07-11	1.5	0.8	1.4	11.1	5.8
2013-07-12	2.3	0.9	1.1	8.2	1.0
2013-07-13	0.5	1.0	0.3	2.0	4.8
2013-07-14	4.9	0.9	0.0	1.1	0.4
2013-07-15	47.7	12.4	1.1	29.4	19.6
2013-07-16	55.4	81.2	1.6	57.3	35.5
2013-08-05	0.6	0.1	2.4	1.6	N,D
2013-08-29	2.7	3.9	9.5	6.0	1.2
2013-09-13	1.9	4.7	0.5	10.9	9.4
Average	8.5	11.8	3.0	17.4	5.7

나타났다. 연구결과와 같이 강우량 증가에 따라 유역말단의 오염부하가 크게 증가하였으며, 이는 Lee et al. (2012)의 선행연구에서 강우량과 유출량 상관관계 분석결과가 높다고 한 연구결과와 같이 강우량에 따라 유출량이 크게 증가하였기 때문으로 보여진다.

라. 축산 배출오염부하 기여율 평가

Table 5는 축산 배출수 지점 (No. 3)의 배출오염부하가 유역 말단 지점 (No. 5)에 미치는 오염부하 기여율을 나타내었다. 이는 부하량의 크기 비교 결과로 축산시설 오염물질이 하류로 유하하면서 외부의 오염물질이 없이 모두 하천 출구까지 이동한다고 가정한 결과이다. 유역 말단에서의 오염부하와 축산시설에서 하천으로 유입되는 배출부하 비교 결과 축산 배출수의 오염부하 기여율이 BOD는 0.5~55.4 %, COD는 0.1~81.2 %, TN은 1.1~57.3 %, TP는 0.4~35.5 %, SS는 0.0~11 %의 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 평균적으로 BOD는 8.5 %, COD는 11.8 %, TN은 17.37 %, TP는 5.41 %, SS는 3.02 %의 비율을 차지하였다. 축산시설에서 배출되는 COD 배출부하의 기여율의 변동이 가장 크게 나타났으며, TN의 기여율이 가장 높은 것으로 나타났다. 반대로 SS 오염 부하는 유역 말단에 미치는 기여율이 가장 낮았으며, 기여율

Table 6 Best parameters of auto-calibration for flow and water quality estimation

Parameter	Value	Variation Method
ALPHA_BF	0.991000	Replace by value
BLAI	0.289000	Replace by value
CANMX	5.230000	Replace by value
CH_K2	104.550003	Replace by value
CH_N2	0.375000	Replace by value
CN2	-5.250000	Multiply by value (%)
GW_DELAY	-1.220000	Add to value
GWQMN	1062.50000	Add to value
SOL_AWC	23.950001	Multiply by value (%)
SOL_K	-19.450001	Multiply by value (%)
SURLAG	0.17000	Replace by value
NPERCO	0.501000	Replace by value
SOL_NO3	0.495000	Replace by value
SOL_ORGN	0.495000	Replace by value

의 변동도 크게 나타나지 않았다.

2. 모델링 결과

가. 유량 및 TN 자동보정 결과

본 연구에서는 SWAT-CUP를 이용하여 SWAT 모형으로 모의된 유량과 수질을 보정하였다. 보정에는 2013년 3월부터 10월까지 실측된 일 유량을 자료와 실측을 통해 산정한 TN 오염부하를 사용하였으며, 유량에 민감한 매개 변수와 TN 보정에 대한 매개변수로 자동보정 하였다. 실측된 대상유역 말단에서 연구기간동안 측정된 유량 범위는 0.33~23.68 m³/s의 범위로 나타났으며, 평균 유량은 1.46 m³/s로 조사되었다. TN 부하량은 93.704~13,659.395 kg/day 범위 값을 보이며, 평균 93.704 kg/day의 부하량이 발생하는 것으로 나타났다. SWAT-CUP을 이용해 보정한 결과 최적 매개변수(Best parameters)는 Table 6과 같다.

대상유역의 SWAT 모형 적용성 평가에는 유효지수(Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient: NSE)와 결정계수(R²)를 이용하였다. NSE와 R²는 1에 가까울수록 모형의 예측치가 실측치를 잘 모의하는 것을 의미하며, NSE 산정 공식은 식 (2)과 같다.

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

Table 7 Criteria for evaluating model performance (Moriassi et al., 2007)

Performance Rating	Unsatisfactory	Satisfactory	Good	Very good
Range	$NSE \leq 0.50$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.75 < NSE \leq 1.00$

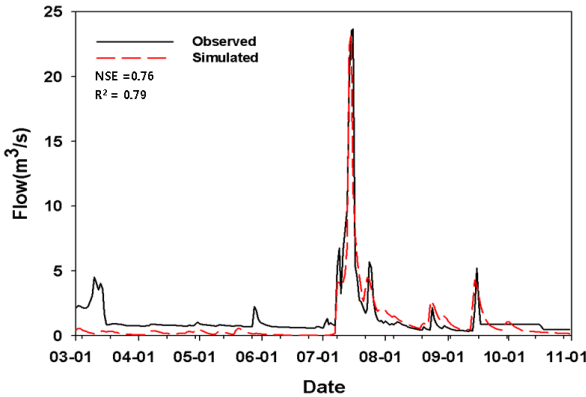


Fig. 4 Observed and simulated hydrography in SWAT modeling

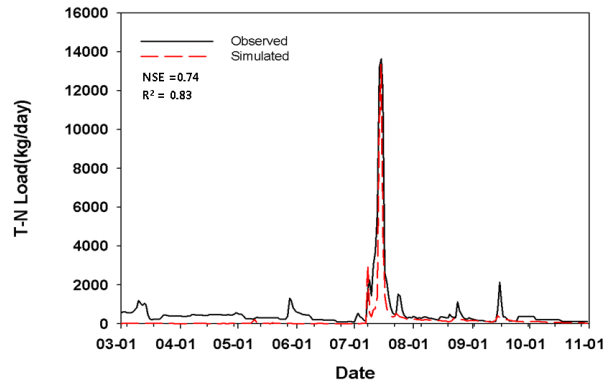


Fig. 5 Observed and simulated TN in SWAT modeling

Table 8 Simulated reduction of pollutant loads

TN pollutant load reduction rate in No. 3	Measured Value	20% Reduction	40% Reduction	60% Reduction
TN pollutant load in No. 5 (kg)	8,899	7,213	5,525	3,838
Redudction rate (%)	-	18.95	23.39	30.53

여기서 O_i 는 강우사상별 실측 값, P_i 는 모의된 강우사상별 예측 값, \bar{O}_i 는 모의기간동안의 강우사상별 실측값의 평균값을 의미한다. Ramanarayanan et al. (1997)는 적용성 평가에서 R^2 가 0.5이상이고, NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제시하였으며, Moriassi et al. (2007)는 Table 7과 같이 모형의 효율 범위와 신뢰구간을 나타냈으며, 일 유량 비교의 경우 NSE는 0.5이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제시하였다.

SWAT모형의 보정 결과 실측 유량에 대한 NSE는 0.76, R^2 는 0.79로 나타났으며 (Fig. 4), TN 실측치와 예측치 보정 결과 NSE는 0.74, R^2 는 0.83으로 나타나 (Fig. 5), Ramanarayanan et al. (1997)과 Moriassi et al. (2007)이 제시한 모델 적용시 신뢰구간을 잘 만족하여 SWAT 모형이 실제 자연현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 하지만 저유량에서 모형 예측값이 실측값에 비해 과소 평가되는 것으로 나타났으며, 이에 따라 연간 총 유량 비교 결과에서 차이가 있는 것으로 나타났다. Ryu et al. (2012)의 선행연구에서 SWAT-CUP을 이용한 모형의 검·보정 시 전체적인 유량의 예측은 비교적 잘 이루어지지만 저유량 기간의 모의에는 정확한 예측을 할 수 없는 한계가 있다 지적한 바 있으며, 이는 본 연구의 결과와 일치한다. Kim et al. (2013)의 선행연구에서 SUFI-2 알고리즘에서 NSE

산정에 강우시 발생하는 침투유량이 모형의 보정 효율을 평가하는데 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타난 바 있다. 그러나 연구대상지역의 유량 및 수질 모니터링 결과에서 보듯이 저유량 때의 배출 부하량은 고유량 때의 배출 부하량에 비해 매우 미비하기 때문에 본 연구의 목적인 축산농가의 배출부하량의 하천 기여율 분석에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

나. 축산 배출부하의 하천 기여도

SWAT 모델을 이용하여 축산시설에서 발생하는 오염물질이 하천에 미치는 기여도를 평가 및 분석하고자 하였다. 유역 내 축산시설에서 배출되는 축산 배출수의 배출 부하량을 저감한다고 가정하였을 때 유역의 말단에서의 오염부하가 어떻게 변하는지 삭감량을 모의하였다. Table 8과 같이 모의된 연구기간동안 말단에서의 TN 부하량은 8,898 kg 으로 나타났다. 이와 비교하여 축산시설에서 배출되는 오염물질의 부하량을 20%와 40% 그리고 60% 저감된다고 가정하고 모의한 결과 유역의 말단에서 TN 부하량은 7,212 kg와 5,525 kg 그리고 3,838 kg으로 각각 18.95%, 23.39%, 그리고 30.53%가 저감되는 것으로 모의되었다. 모의결과와 같이 축산시설에서의 배출부하 저감효율이 커질수록 말단에서도 부하량의

저감 효율이 커지는 것으로 나타났으나, 오염물질의 저감률에 비해하여 말단에서의 오염물질 저감율이 증가하지는 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 유역에서 축산농가에서 배출되는 오염물질을 모의하기 위해 SWAT 모델을 적용하였으며, 축산에서 배출되는 오염부하가 하천에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 그러나 본 연구결과는 모델을 이용한 단순 가정에 의한 결과이기 때문에 추가적인 모니터링을 통해 축산 비점오염물질 배출에 대한 정량적인 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 분뇨개별 처리시설과 자원화 시설이 있는 소규모 유역을 대상으로 배경농도(산림)와 축산 배출수에서 발생하는 비점오염물질을 모니터링하고, 모니터링 결과를 바탕으로 모델을 적용하여 축산에서 발생하는 비점오염물질이 하천에 미치는 기여도를 평가하고자 하였다.

모니터링 분석결과 강우시와 비강우시 BOD와 COD, TN 그리고 TP의 수질 농도는 축산에서 발생하는 배출수에서 가장 높게 측정되었으나, SS와 탁도 분석결과 평시에는 축산농가가 고농도의 오염물질을 배출하는 오염원이었지만, 강우시에는 다른 지점에서 더 높은 값을 나타내었다. 이는 축산농가가 하천의 수질을 악화에 영향을 미치는 오염물질을 배출하는 오염원임을 나타내는 결과이지만, 강우시 하천의 탁수를 유발함에 있어 축산 배출수보다는 산림이나, 주변 농경지로부터 발생하는 입자성 부유물질, 토사 등의 영향이 더 큰 것으로 보여진다. 반면, 평시와 강우시 유역 말단(No. 5)과 상류 지점인 배경농도(No. 1)의 수질 농도는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 오염물질이 하류로 유하하면서 산지로부터 유출되는 유출수와 함께 희석되어 수질 농도가 낮아질 뿐만 아니라 하천에서의 자정작용으로 오염물질이 정화되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 축산 배출수가 하천에 미치는 기여도를 평가하기 위해 SWAT 모형을 적용한 결과 유량의 NSE는 0.76, R^2 는 0.79, TN 항목의 NSE는 0.74, R^2 는 0.83으로 자연현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 TN 배출부하 값을 20%와 40% 그리고 60%를 저감한다고 가정하였을 경우 유역 말단의 오염부하를 18.95%와 23.39% 그리고 30.53%를 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구와 같이 축산농가에서 배출되는 오염물질의 배출 특성에 대한 분석 결과는 축산비점오염원이 하천에 미치는 영향에 대한 평가와 비점오염저감 대책 수립에 필요한 기초 자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 짧은 연구기간동안의 모니터링 결과를 바탕으로 모델링이 이루어졌으며, 이는 축산 비점오염 물질 정량화를 평가하기에 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 지속적인 모니터링 분석을 통한 자료의 축적과 다양한 모델을 이용한 적용 및 분석을 통한 비점오염물질의 정량적인 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한, 축산농가에 국한적인 모델 분석이 아닌 논, 밭, 과수원 등 다양한 농업 비점오염원에서 배출되는 오염물질이 하천에 미치는 영향에 대한 평가도 함께 이루어져야 할 것으로 보여진다.

어졌으며, 이는 축산 비점오염 물질 정량화를 평가하기에 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 지속적인 모니터링 분석을 통한 자료의 축적과 다양한 모델을 이용한 적용 및 분석을 통한 비점오염물질의 정량적인 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한, 축산농가에 국한적인 모델 분석이 아닌 논, 밭, 과수원 등 다양한 농업 비점오염원에서 배출되는 오염물질이 하천에 미치는 영향에 대한 평가도 함께 이루어져야 할 것으로 보여진다.

사 사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 (산간지역의 농업(경종·축산)비점오염 발생 배출 오염부하 특성 모니터링)의 지원을 받아 연구되었음(No. 312029-03-HD020).

REFERENCES

1. Abbaspour, K. C., 2007. User Manual for SWAT-CUP. SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Program, Swiss federal Institute of Aquatic Science and Technology. *Eawag*, Deubendorf, Switzerland. pp. 1-33.
2. APHA, AWWA, WEF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th, pp. 5,12-5,16.
3. Arnold, J. G., 1992. Spatial scale variability in model development and parameterization. Ph.D. diss., West Lafayette, Ind.: Purdue University.
4. Arnold, J. G., and R. Srinivasan, 1994. Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS. *Water*.
5. 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), pp. 73-89.
6. Jeong, I. H., S. C. Choi, C. H. Won, B. S. Chang and J. M. Rim, 2006. Runoff Characteristics of Nonpoint Source Pollution with Land Application of Animal Waste. *Korean Society on Water Environment, Korean Society of Water & Wastewater*, pp. 959-967 (in Korean).
7. Jung, C. G., J. Y. Park, H. J. Lee, J. D. Choi and S. J. Kim, 2012. HSPF Modeling for Identifying Runoff Reduction Effect of Nonpoint Source Pollution by Rice StrqW Mulching on Upland Crops. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(4), pp. 1-8 (in Korean).
8. Kim, M. H., T. Y. Heo and S. W. Chung, 2013. Uncertainty Analysis on the Simulations of Runoff and Sediment Using SWAT-CUP. *Journal of Korean Society on Water Environment*.

- 29(5), pp. 681-690 (in Korean).
9. Lee, J. W., Y. J. Lee, H. G. Kwon, J. S. Yoon, C. S. Lee and S. U. Cheon, 2012. Estimation of Runoff Characteristics of Non-point Pollutant Source by Land Cover Characteristics. *Journal of the Environmental Sciences*, 21(8): 977-988 (in Korean).
 10. Lee, N. H., K. S. Yoon, S. J. Kim and S. G. Hong, 2001. Hydrologic and Water Quality Monitoring from a Small-Scale Livestock Watershed. *Rural Planning*, 7(2): 13-25 (in Korean).
 11. Ministry of Environment, 2006. *Manual Management of Non-point Pollutant Source*.
 12. Ministry of Environment, 2009. *Annotation process water pollution test methods*.
 13. Ministry of Environment, EGIS, 2009. <http://egis.me.go.kr>. Accessed Oct. 2013.
 14. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, R. L. Binger, R. D. Binger and T. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3), pp. 885-900.
 15. National Institute of Environmental Research, 2008. Technical Guidelines of Total Water Pollution Load Management System.
 16. National Spatial Information Clearinghouse, <http://www.ngic.go.kr>. Accessed Oct. 2013.
 17. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005. USDA, ARS, Temple, Texas. Resources Bulletin. *American Water Resources Association*. pp. 453~462.
 18. Ramanarayanan, T. S., J. R. Williams, W. A. Duga, L. M. Hauck, and A. M. S. McFarland, 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. *ASAE International Meeting*, Paper 97-2209. pp. 1-7.
 19. Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyuni, S. F. Mousavi, M. Heidarpour, A. Jalalian, and K. C. Abbaspour, 2008. Application of a SWAT Model for Estimating Runoff and Sediment in Two Mountainous Basins in Central Iran. *Journal of Hydrological Sciences*, 53(5), pp. 977-988.
 20. Ryu, J. C., H. W. Kang, J. W. Choi, D. S. Kong, D. H. Gum, C. H. Jang and K. J. Lim, 2012. Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration at Soyang-gang Dam Watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment* 28(3), pp. 347-358 (in Korean).
 21. Shin, M. H., 2013. Study on the reduction of non-point source pollution loads and greenhouse gas emission from upland crop area by climate change impact. PhD thesis, *Kangwon National University* (in Korean).
 22. Shin, M. H., C. H. Won, W. J. Park, Y. H. Choi, J. R. Jang, K. J. Lim and J. D. Choi, 2011. Analysis of the Reduction Effect on NPS Pollution Loads by Surface Cover Application. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4), pp. 29-37.
 23. Shin, M. H., J. R. Jang, C. H. Won, Y. H. Choi, J. Y. Shin, K. J. Lim and J. D. Choi, 2012. Effect of Surface Cover on the Reduction of NPS Pollution at a Vegetable Field. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(3): 436-443 (in Korean).
 24. Shin, M. H., J. W. Choi, Y. H. Choi, W. J. Park, C. H. Won, D. S. Shin, K. J. Lim and J. D. Choi, 2011. Runoff Characteristics of Non-point Source Pollutant Loads Generated on Golf Course. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 27(6): 784-793 (in Korean).
 25. Won, C. H., M. H. Shin, Y. H. Choi, J. Y. Shin, W. J. Park and J. D. Choi, 2011. Application of Surface Cover Materials for Reduction of Soil Erosion. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 27(5): 848-854 (in Korean).