



벼짚 피복에 의한 밭 비점원오염 저감효과 분석을 위한 HSPF 모델링

HSPF Modeling for Identifying Runoff Reduction Effect of Nonpoint Source Pollution by Rice Straw Mulching on Upland Crops

정충길* · 박종윤* · 이형진** · 최중대*** · 김성준****,†

Jung, Chung Gil · Park, Jong Yoon · Lee, Hyung Jin · Choi, Joong Dae · Kim, Seong Joon

ABSTRACT

This study is to assess the reduction of non-point source pollution loads for rice straw surface covering of upland crop cultivation at a watershed scale. For Byulmi-cheon watershed (1.21 km²) located in the upstream of Gyeongangcheon, the HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran), a physically based distributed hydrological model was applied. Before evaluation, the model was calibrated and validated using 9 rainfall events. The Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) for streamflow was 0.62~0.78 and the NSE for water quality (Sediment, T-N, and T-P) were 0.68, 0.60, and 0.58 respectively. From the field experiment of 16 rainfall events, the rice straw covering reduced surface runoff average 10 % compared to normal surface condition. By handling infiltration parameter (INFILT) in the model, the value of 16.0 mm/hr was found to reduce about 10 % reduction of surface runoff. For this condition, the reduction effect of Sediment, T-N, and T-P loads were 87.2, 28.5, and 85.1 % respectively. The rice straw surface covering was effective for removing surface runoff dependent loads such as Sediment and T-P.

Keywords: Non-point source pollution; HSPF; Rice straw mulching; BMPs; Infiltration; Surface runoff

1. 서 론

근래 농촌지역에서의 하천 및 저수지의 수질오염에 관하여 관심이 고조되고 있으며 오염원에 대한 파악과 대책을 세우기 위해 관련분야에서 많은 연구가 진행 되고 있다. 특히 축산 및 농지에서 비 정량적으로 발생하는 비점오염원에 관한 연구는 국가적인 차원에서 이루어지고 있다. 더욱이 농촌지역에서의 비점오염은 오염 배출 특성에 대한 파악이 어렵고 매우 불규칙하게 발생하며, 농경지의 토지관리방법, 지역 환경, 조건 등에 의한 영향도 크다. 적용범위가 광범위하고 특정지점에 국한 되지 않기 때문에 수질개선을 위해서는 반드시 비점오염원의 평가 및 관리가 필요하다 (Shin et al., 2001; Kim et al., 2008).

비점오염원의 효율적인 관리를 위해서는 지형, 지질, 기후 및

토양특성, 수문학적 특성, 영농형태 및 토지이용방법 등과 같은 다양한 변화 요인들을 포괄적으로 수용하여 전반적인 관리대책을 세우는 것이 필요하며, 이러한 관리 및 오염물질의 이동 기작 등의 예측은 수학적 모델을 통한 모델링 기법에 의해 농촌지역에서 발생하는 수질오염의 원인과 현황을 정량적으로 구명하고 수질오염을 저감하기 위한 최적관리방안을 마련할 수 있다. 농경지 등에서의 비점오염물질 유출은 주로 강우와 재배형태 (시비, 물관리, 토양관리 등)에 따라 변동하고, 비료의 적용시기에 따라 오염부하 유출특성이 변화하므로 오염물질 정량화 및 저감대책 제시에 어려움이 있다. 현재 우리나라의 하천 및 호소에 유입되는 오염물질 중 약 30 % 이상이 농업활동 등에 의한 비점오염원임에도 불구하고, 기존의 수질관리대책은 대부분 하수처리장 건설 등의 점오염원 처리에 치중하고 있다. 특히, 농업비점오염원에 대한 관리는 기존의 수질관리 기법을 그대로 적용하는 것보다 오염저감을 위한 최적영농관리기술을 개발해서 적용하는 것이 바람직하다. 다양한 형태의 농경지에서 장기모니터링을 통한 비점오염 배출 특성을 확인하고 신뢰성 높은 비점오염 부하 분석을 통하여 농업비점오염원 특성에 적합한 최적관리기법을 개발하여 보급하여야 한다 (Choi, 2010).

최적관리기법 (Best Management Practices, BMPs)은 비점원오염 저감을 위한 대책으로 최근 BMPs 적용에 따른 실제 평

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

2012년 2월 8일 투고
 2012년 3월 15일 심사완료
 2012년 3월 16일 게재확정

가가 중요시되고 있다. BMPs를 적용한 유역모델링 평가의 연구 동향을 살펴보면 Narasimhan et al. (2007)은 하천에서의 침식으로 인한 하류 저수지에서 유사 및 영양물질의 발생을 파악하였고 SWAT 모델을 사용하여 상류 하천에서 BMPs를 적용하여 비점원오염물질 저감에 대하여 모의하였으며, Kang (2005)은 강원도 인제군의 여름철 집중호우의 발생시 경작지로부터 다량의 토사가 하천으로 유입되고 있는 내린천 상류지역에 BMPs 적용을 통한 토양유실 저감효과를 분석한 결과, 계단전, 등고선재배, 초생대, 하천정비 등의 BMPs를 유역내에 적용하여 각각 34.3 %, 48.3 %의 저감효과를 보였다. 지금까지의 선행연구는 실제현장에서의 BMPs 적용 후에 효과에 대한 모니터링 없이 모델링에서의 효과로만 BMPs를 평가하는데 그쳤다. 이러한 제한적인 평가를 보완하고 증명하고자 Choi (2011)는 시험포장을 조성하여 경운, 무경운, 비료성분 및 벼짚지표피복에 따른 비구조적 BMPs를 적용하여 실제적인 효과를 증명하였다. 기존에 연구와 달리 BMPs 효과 평가는 현장결과와 수학적인 모델링을 병행하여 그 효과가 증명되어야 한다. 이러한 비점오염원의 관리평가를 위해 농업비점원오염의 발생 및 거동을 평가할 수 있고 공간적인 변이에 따른 모의가 가능한 대표적인 모델로 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모델이 있다. HSPF 모델은 유역에서의 수문해석 (Brun and Band, 2000; Cho and Mostaghimi, 2008)과 토양유실을 포함한 비점원오염물질의 거동해석 및 수질 개선을 위한 다양한 유역차원 오염관리대책에 있어서 널리 이용되고 있는 유역모델이다.

본 연구에서는 기존 이론 및 학술적으로만 평가되던 BMPs를 현장시험에 의한 실제 비점오염원 저감효과와 모델로써의 저감효과를 분석하여 그 효과를 입증하고 한다. 따라서, 현재 시험포장 (Experimental plot)에서 연구 중인 BMPs (Best Management Practices) 시나리오 중 그 효과가 증명된 벼짚지표피복시나리오를 선택하여 유역내 밭에서의 저감효과를 분석하기 위해 HSPF 모델로 농촌 소유역에서의 시나리오를 적용하였으며 실제적으로 분석된 비점오염원 저감효과를 HSPF 모델에서 모의된 결과와 비교분석하여 유역 내에 위치한 밭에서의 시나리오를 적용함에 있어 비점오염원 저감효과를 평가 및 검증하고자 한다.

II. HSPF 모델

HSPF는 복합적인 토지피복특성을 갖는 유역에서 강우에 의해 발생하는 유량과 수질을 모의하기 위하여 미국 환경청 (U.S. EPA)과 미국 지질조사기관 (USGS)이 공동으로 개발한 통합형 모델로 1980년에 최초로 개발되어 지속적인 수정과 확장을 거듭해오고 있다. 적용 모듈로는 투수지역의 수문 및 수질을 모의하는 PERLND, 불투수지역의 수문 및 수질을 모의하는 IMPLND,

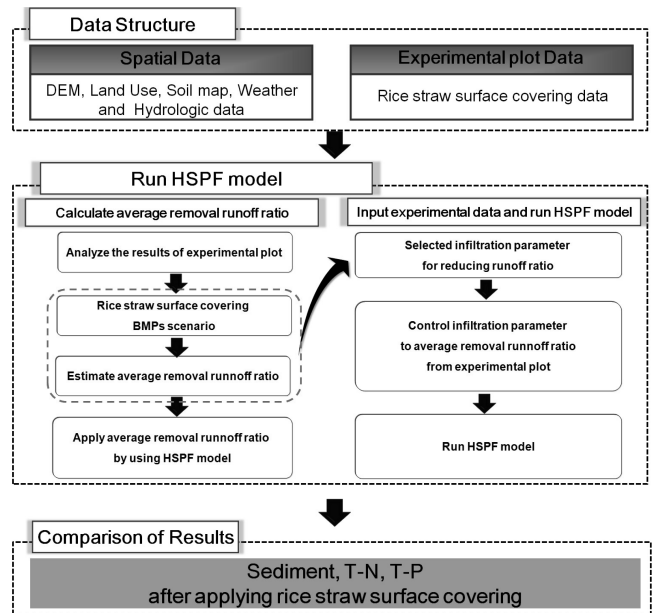


Fig. 1 The flow chart of this study

수체 내의 수리 및 수질을 모의하는 RCHRES로 구성되어 있으며, 각 모듈은 물의 흐름과 관계된 부분, 토사유출 및 영양염류 등 수질과 관계되는 부분으로 구분되어 있다. 수체 내 수리 모의는 흐름을 한 방향으로 보며 한 부분의 유입과 여러 방향의 유출 부분으로 구성되어 있으며, 수체의 깊이에 대한 수표면적과 저류되는 수량과의 관계는 변하지 않는다는 가정을 기초로 하고 있다 (Lee et al., 2010). 부유물질은 ARM과 NPS (Donigan and Crawford, 1976)모델을 기본으로 한 토사생성 및 유실을 고려하여 모의하게 된다. 강우에 의한 토양의 탈착에 대한 관리기법 인자는 USLE 공식의 P값을 기본으로 한다 (Lee et al., 2008). 본 연구에서는 비록 토지이용정보는 중분류로 적용되지만 유출 및 강우시 초기 비점원오염 부하량을 시간당 파악을 위해 시간당 모의가 가능한 HSPF 모델을 선정하였으며 현장 시험포장에서의 적용되는 영농방법 및 시비조절등 비구조적인 BMPs 시나리오를 적용하는데 적절하다고 판단되었다. Fig. 1은 본 연구의 연구흐름도로 시험포장에서의 벼짚지표피복시나리오에 적용 전 후에 평균 유출저감 효과를 바탕으로 HSPF 모델에서의 유출저감 매개변수를 조절하여 동일 유출저감효과에 따른 비점오염원 저감 결과를 실제 저감효과와 비교 분석하였다.

III. 자료 및 방법

1. 발작물 벼짚지표피복 포장시험

밭에서 배출되는 비점오염물질은 작물의 종류뿐만 아니라 영농방법, 토성, 경사도, 강우량과 강우강도, 지표 피복을 등의 영

향인자에 따라 매우 다르게 나타나는 특성이 있다. 비점원오염 부하량을 측정하기 위한 밭을 조성하고 BMPs로 빗짚지표피복의 효과를 검증하였다. 빗짚지표피복 시험이 이루어지고 있는 시험포장(밭)은 행정구역상 강원도 춘천시 서면 방동리에 위치하고 전체면적 1276.6 m², 경사도는 약 3.2 %로 콩 재배가 이루어지고 있다. 시험포장은 농촌지역에서 발생하는 비점원오염 물질을 삭감하기 위해 도입된 BMPs 방법으로 기존에 관행적으로 이루어지고 있는 농경지에서 비구조적 BMPs 효과를 적용 전·후로 구분하여 유출량과 오염 부하량을 구한 후, 동일강우사상 혹은 동일 강우강도 조건에서 오염원부하량을 비교함으로써 진행하였다. 시험포장에 관한 좀 더 자세한 자료 및 결과는 Choi (2011)의 보고서를 참조하여 알 수 있다.

2. HSPF 적용구역 및 자료

본 연구의 대상구역으로 농촌 소유역을 대상으로 농업비점오염저감효과를 분석하기에 적합한 경기도 용인시 처인구 해곡동에 위치하며 경안천 최상류 지류부에 해당하는 별미천 유역을 선정하였다. 별미천 유역의 유역면적은 약 1.21 km²이며, 밭에서의 BMPs를 적용하여 시나리오에 따른 순수 저감효과를 파악하기 위한 목적으로 하천차수가 최상류이며 유역면적이 작고 주변에서의 오염물질의 유입이 제한적인 농촌 소유역을 대상으로 BMPs에 따른 수문수질변화 분석이 가능하기 위한 모니터링 자료가 용이한 곳으로 선정하였다. HSPF 모델의 입력자료로서 수문기상자료와 수질자료의 모니터링 및 세분화된 토지이용도 구축이 용이하여 대상구역으로 선정하였다. 유역출구지점에서 수문

및 수질 검보정 자료를 구축하기 위해 시간단위 간격으로 수문, Sediment, T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorous) 성분 에 대한 모니터링을 실시하였다.

본 연구에서는 공간입력 자료 중 가장 기본이 되는 DEM자료를 NGIS (National Geographic Information System)의 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 2 m의 DEM으로 제작하였다 (Fig. 3(a)). 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 수문학적 토양그룹 (Hydrologic Soil Group) A, B, C, D로 분류하였다 (Fig. 3(b)). 토양층의 개수 및 토양층별 깊이 등은 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였으며 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값을 구분하였다. 토지이용도는 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나이다. 토지이용 정보는 유출량의 변화뿐만 아니라 질소와 인으로 대표되는 비점오염원 부하량에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나인 토지이용도는 위성영상으로부터 1/5,000급의 QuickBird 토지이용도를 제공받아 사용하였다. 본 연구에 사용된 QuickBird 영상은 2006년 5월 1일 영상으로 RPC (Rational Polynomial Coefficients) 정보가 있는 영상을 제공받아 분석에 사용하였다. QuickBird 영상으로부터 토지이용도의 제작은 기존 환경부, 건교부, USGS의 토지피복분류체계 및 현장조사를 통하여 QuickBird 영상으로부터 추출 가능한 정밀농업정보에 대한 항목을 결정하였으며, 정사보정된 QuickBird 영상을 스크린 디지털라이징 (On-Screen Digitizing)을 이용하여 총 21개 토지이용항목의 정밀토지이용도를 구축하였다 (Fig. 3(c)).

모델의 입력자료가 되는 기상자료는 수원, 양평, 이천 기상관

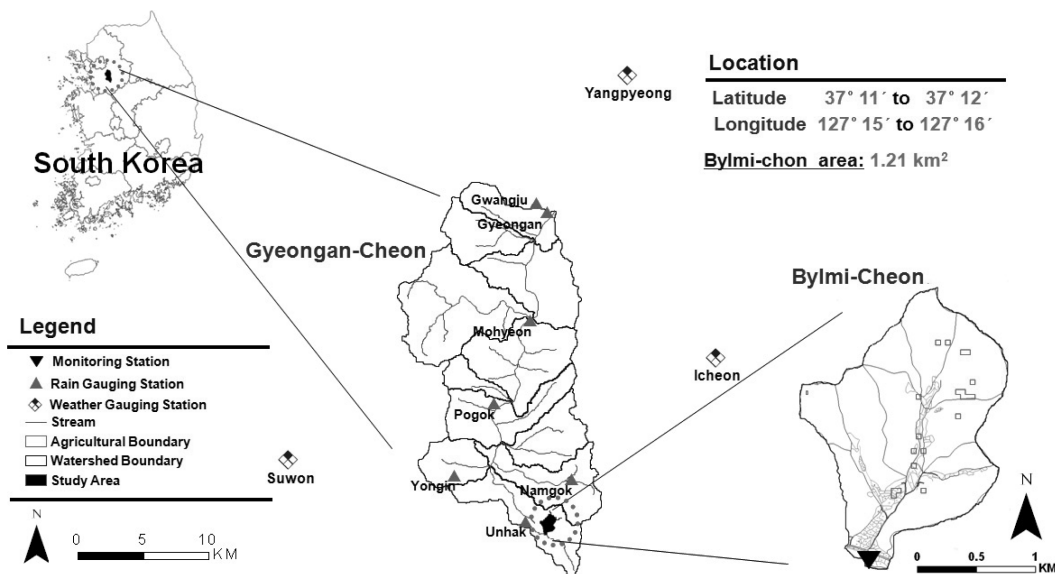


Fig. 2 The location of study area

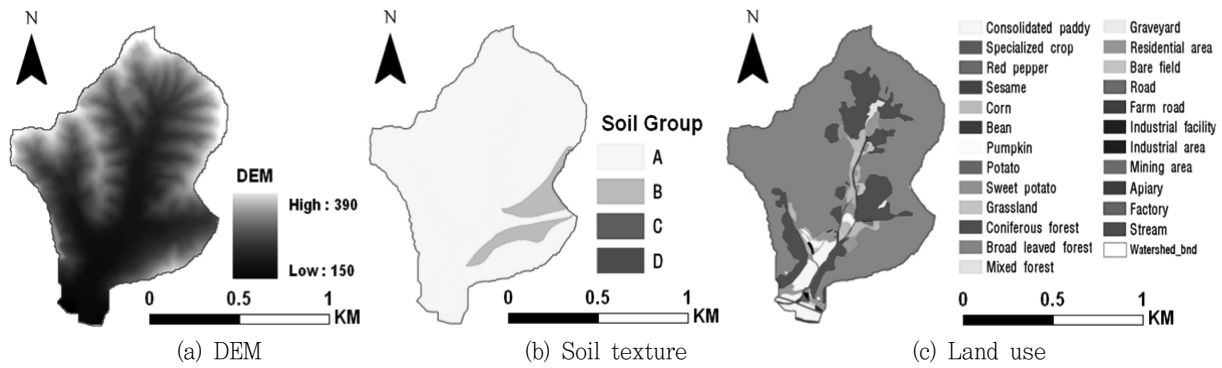


Fig. 3 Spatial input data (Park et al., 2008)

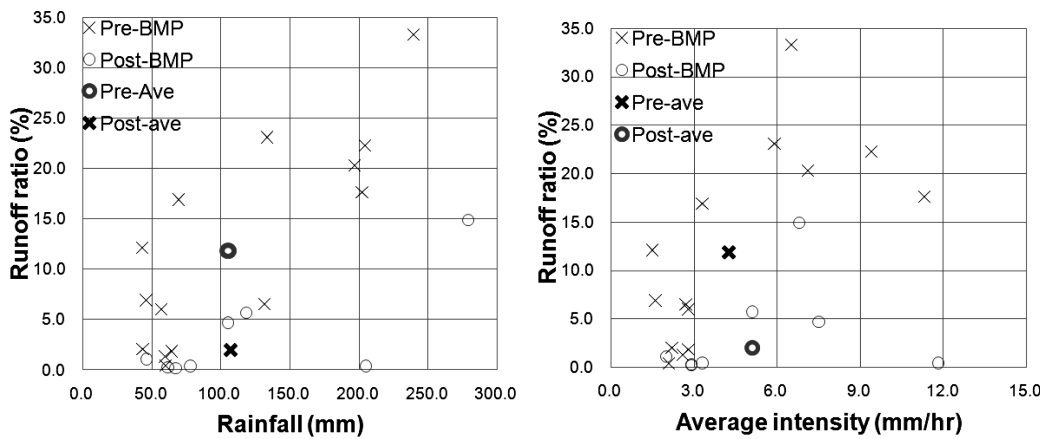


Fig. 4 Comparison of runoff ratio (%) between Pre-BMPs and Post-BMPs from experimental plot

측소의 강수량, 온도, 태양복사량, 풍속, 상대습도 시간당 자료를 활용하였다. 모델의 보정을 위한 실측자료는 별미천 유역 출구 지점부에서 수문성분을 위한 자동수위 및 강우량 측정기, 수질성분을 위한 자동채수기를 설치하여 시간당 수위, 강우량 자료와 강우발생에 따른 수질자료에 대한 실제 모니터링을 실시하였다 (Fig. 2).

IV. 결과 및 고찰

1. 포장시험 결과 및 분석

지표피복후 각 강우사상별 유출량 및 비점원오염부하량을 산정하였으며 이를 2008~2009년의 유출량과 비점원오염부하량과 비교하였다. Fig. 4는 벼짚지표피복 적용 전 (pre)과 후 (post)의 강우사상 (event)에 따른 각각의 유출율 및 적용 전 평균 유출율 (Pre-ave)과 적용 후 평균 유출율 (Post-ave)을 나타낸 것이다. 시험포장에서는 총 16개의 유사한 event에 대해 유출율과 벼짚지표피복에 따른 유출 저감율을 산정하였다. 지표피복 적용에 따른 유출 저감율은 12.3~98.0%까지 나타났으며 평균적

으로 76.6% 유출 저감율이 나타난다. 또한, 지표피복전 평균 유출율은 11.8%이고 지표피복후 평균 유출율은 2.0%로 약 9.8% 유출을 저감을 나타냈다. 유출저감에 따른 비점원오염부하량을 비교 할 때 벼짚지표피복은 비점오염 저감효과가 뛰어난 것으로 조사되었다. 유기물은 68.1~82.7%까지 저감이 되었으며 영양염류인 T-N과 T-P는 각각 32.4%와 43.2%가 저감된 것으로 나타났다. 특히 Sediment는 95.9%가 저감된 것으로 나타났다.

2. HSPF 모형 검토

매개변수 추정을 위하여 HSPF Technical note 매뉴얼을 이용하여 Input Type별 매개변수를 정리하여, 총유출량 및 침투유량과 감수곡선 (recession) 형태에 영향을 미치는 매개변수를 선정하고, 각각의 모듈에서 수문 모의를 하기위한 10개의 매개변수에 대하여 민감도 분석 및 검토정을 실시하였다. 10개의 매개변수중 IRC, INFIT, AGWERN으로 유출에 가장 민감하게 반응하였다. 본 연구에서는 2009~2010년을 모형의 안정화 기간으로 설정하였다. 검토정기간은 실측자료가 측정된 시점 2011년

Table 1 Summary of runoff simulated result for 9 events with AMC conditions

Date of event	Rainfall				Runoff				NSE	AMC
	Duration (hr)	Amount (mm)	Intensity (mm/hr)		Volume (mm)		Ratio (%)			
			Max.	Ave.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.		
22 June	65	210.0	17.0	3.2	80.2	121.1	38.2	57.7	0.61	I
29 June	19	130.0	25.0	6.8	120.9	116.4	93.0	89.5	0.70	III
03 July	19	141.0	17.0	7.4	111.7	105.6	79.2	74.9	0.60	III
26 July	27	311.0	58.0	11.5	226.6	227.1	72.9	73.0	0.60	I
31 July	8	71.0	14.0	8.9	38.1	38.3	53.7	53.9	0.60	III
03 August	6	75.0	17.0	12.5	42.6	45.7	56.8	60.9	0.61	III
07 August	15	74.0	23.0	4.9	50.5	53.2	68.2	71.9	0.68	II
12 August	15	82.0	13.0	5.5	69.2	67.5	84.4	82.3	0.46	III
16 August	26	188.0	34.0	7.2	127.7	143.4	67.9	76.3	0.78	III
Ave.	22	142.4	24.2	7.6	96.4	102.0	68.3	71.2	0.63	

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, NSE : Nash and Sutcliffe model Efficiency, Max.: Maximum data, Ave.: Average data

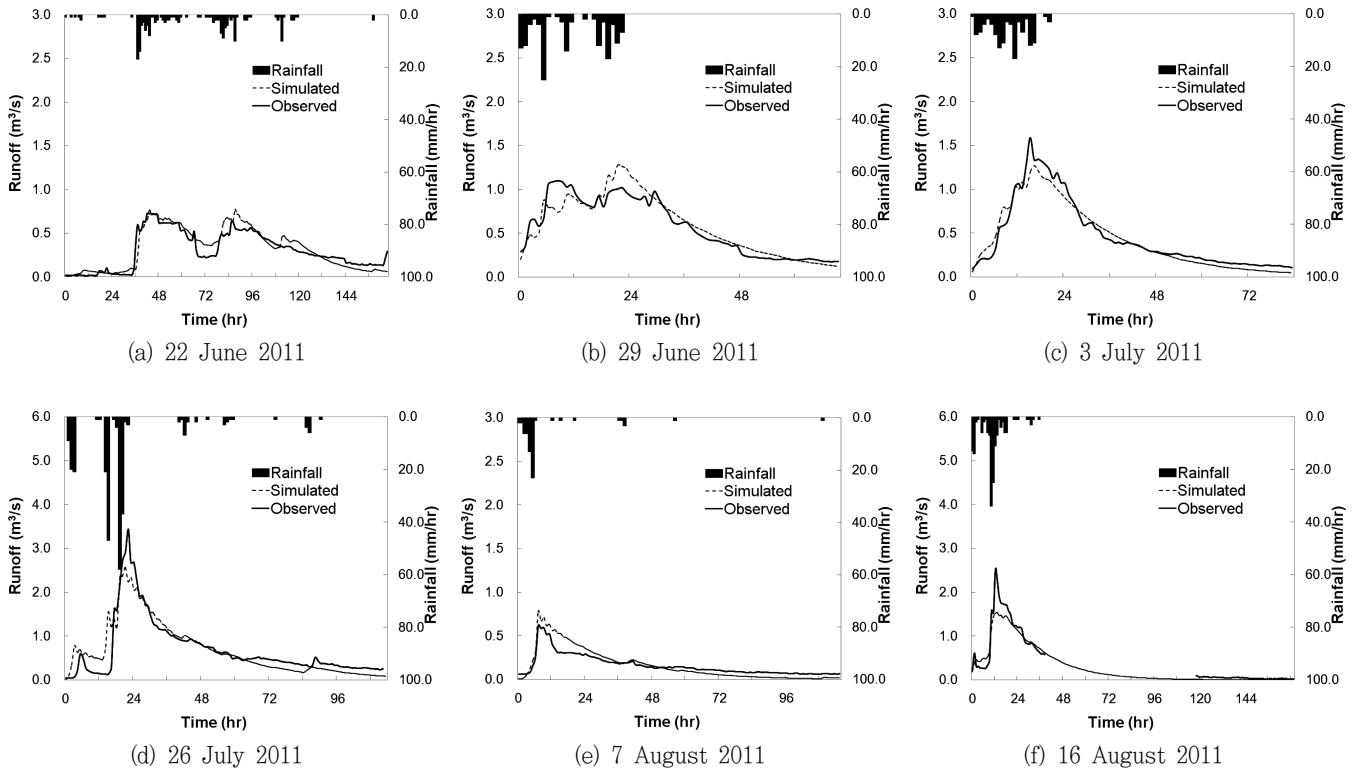


Fig. 5 Hydrograph comparison between simulated and observed runoff

6월부터 10월까지 유출 및 수질요소를 모의하여 검보정 실시하였다. 보정은 수문곡선 및 유출률을 고려하여 실측자료가 비교적 양호하다고 판단되는 2011년 6월, 7월, 8월을 선정하였고, 검정은 9월, 10월 자료를 사용하였다. 각각 월별 통계에 따른 적용성 분석으로 RMSE (Root Mean Square Error)는 1.15~1.76 (mm/day), R^2 (determination coefficient)는 0.62~0.78, NSE (Nash-Sutcliffe model Efficiency)는 0.62~0.76으로 모의치

와 실측치의 유출량은 유의성이 있는 것으로 나타났다. 다음단계로 총 모의기간 중 강우 event가 발생한 15개의 event를 선정하였고 그 중에서 강우량 60 mm 이상인 9개의 주요한 event의 검보정 결과와 유역전체에서의 유출율 및 수문특성을 산정하였다 (Table 1). Fig. 5는 9개의 event중 첨두유출량이 0.5 m³/s 이상인 6개의 event에 대하여 실측값과 비교한 그래프이다.

유역내 지표유출과 관련하여 피복에 따른 Manning's 조도계수

는 유효한 범위 안에서 각 토지피복별 밭, 논 그리고 산림에서 각각 0.2, 0.05 그리고 0.2의 적절한 계수값을 적용하였다. 지표 피복 적용전 실측값과의 검보정을 위한 매개변수로 Sediment는 JSER, KSER, KRER, JGER과 T-N 및 T-P는 CVBO, CVBPC, CVBPN, BRNIT, MON-GRAND-CONC등의 매개변수를 보정하여 2011년 6월 8일부터 10월 31일까지 시간위 영양물질을 검보정 실시하였다. Sediment, T-N, T-P의 R²는 각각 0.72, 0.62, 0.63, NSE는 0.68, 0.60, 0.58로 어느 정도 경향성을 반영한다고 나타 낼 수 있다.

3. 포장시험결과의 시험유역적용

시험포장 밭에서의 피복전 평균 유출율은 11.8 %에서 지표피복후 평균 유출율은 2 %로 평균 9.8 % 유출율이 감소하였다. 지표피복에 의한 침투량을 증가시켜 지표유출을 감소시키는 밭에서의 침투매개변수 INFILT를 조절하여 지표피복전 유출율과 비교하여 평균 약 10 % 유출율을 감소시키는 적정 값을 산정하였다. Table 2는 INFILT 값에 따른 밭에서의 유출율을 나타냈으며 이중 평균 유출율 10 %를 감소시킬 때 침투매개변수 INFILT의 값은 16.0 mm/hr로 나타났다.

강원대에서의 시험포장과 별미친 대상유역의 평균 밭에서의 경사도 각각 3 %와 22 %로 지형적인 차이로 인해 유출율에 동일한 저감율에 대해서만 추정하기에는 제한적이고 경사도 높음에 따라 유출저감이 시험포장에서의 결과보다 작게 나타날 것으로 판단되어 각각 유출저감이 약 2.5 %, 5 %, 10 %에 해당되는 INFILT value 8.0 mm/hr (Low), INFILT value 12.0 mm/hr (Medium), INFILT value 16.0 mm/hr (High) 값을 선정하여 비점원오염 저감효과를 분석하였다.

전체 12개의 event기간 동안의 선정된 INFILT 값에 따른 Sediment, T-N, T-P의 저감효과를 분석하였으며 평균적으로 유출저감이 10 % 나타나는 INFILT High일 때 Sediment, T-N, T-P 각각의 평균 저감율은 87.2 %, 28.5 %, 85.1 %로 나타났으며 이는 유역내 밭에서의 저감효과를 살펴보았을 때 강원대 시험포장에서의 실제 평균 비점오염 저감율 89.7 %~99.4 %과 유사함을 알 수 있다. Table 3은 전체 12개의 event중에서 강우량 60 mm 이상의 9개의 주요한 event에서의 INFILT High, Medium, Low에서의 유출저감에 따른 영양물질의 저감율을 나타냈다. 그 결과 Low에서의 Sediment, T-N, T-P의 평균 오염원 저감율은 각각 63.2 %, 16.2 %, 71.6 %으로 나타났으며 Medium에서는 각각 71.8 %, 24.1 %, 74.3 %, High에서는 86.1 %, 27.9 %, 75.6 %로 나타났다 (Table 3).

Table 2 The runoff ratio (%) from upland crop by applying HSPF model

Event	Rainfall	Baseline	Low	Medium	High
		INFILT 1.0 mm/hr	INFILT 8.0 mm/hr	INFILT 12.0 mm/hr	INFILT 16.0 mm/hr
22 June	210.0	28.7	22.1	18.1	14.4
29 June	130.0	36.1	32.1	27.9	24.2
03 July	141.0	34.3	31.0	26.9	23.5
26 July	311.0	28.1	26.7	25.9	24.0
31 July	71.0	34.3	31.5	28.6	25.5
03 August	75.0	32.3	31.7	24.2	20.4
07 August	74.0	33.6	31.4	25.7	21.5
12 August	82.0	34.0	31.3	28.8	23.8
16 August	188.0	35.8	33.1	31.0	27.6
Ave.	142.4	33.0	30.1	26.3	22.8

Ave. : Average data

Table 3 Removal efficiency of non-point sources pollution by Rice Straw Surface Covering from Byulm-chon watershed by applying HSPF model

Event	Rainfall Amount (mm)	Baseline loads (kg)	Low			Medium			High		
			Removal efficiency (%)			Removal efficiency (%)			Removal efficiency (%)		
			Sediment	T-N	T-P	Sediment	T-N	T-P	Sediment	T-N	T-P
22 June	210.0	39.0	63.1	26.7	78.4	71.8	38.0	81.6	90.5	43.0	83.0
29 June	130.0	29.5	63.4	20.8	74.9	71.9	30.2	77.8	86.4	34.5	79.1
03 July	141.0	25.7	63.0	17.7	73.0	72.0	26.4	75.8	86.0	30.6	77.1
26 July	311.0	53.0	63.2	13.4	71.5	71.9	20.3	73.8	84.2	23.7	75.0
31 July	71.0	9.8	63.3	13.7	63.4	71.4	20.8	66.5	85.7	24.4	68.1
03 August	75.0	10.7	62.6	13.4	61.4	72.0	20.5	64.7	84.1	24.1	66.3
07 August	74.0	13.4	63.4	13.5	74.1	71.6	20.5	76.3	86.6	24.0	77.4
12 August	82.0	17.5	63.4	13.6	71.4	72.0	20.7	73.8	86.9	24.2	75.0
16 August	188.0	33.2	63.3	12.9	76.1	72.0	19.6	78.0	84.9	23.0	79.0
Ave.	142.4	25.8	63.2	16.2	71.6	71.8	24.1	74.3	86.1	27.9	75.6

Ave. : Average data

V. 결 론

본 연구는 농촌 소유역 발에서의 유출특성과 BMPs 적용에 따른 비점원오염부하량의 저감효과를 모델링을 통하여 분석하고자 경안천 상류의 별미천 유역 (1.21 km²)을 대상으로 고해상도 위성영상 및 실제 수문 수질 모니터링을 실시하여 강원대 시험포장에서 행해지고 있는 벗짚지표피복 BMPs를 적용하여 비점오염원 저감효과를 살펴보았다. 실제 모니터링으로 측정된 자료를 바탕으로 수위-유량곡선 산정 및 오염부하곡선을 선정, 2011년 6월 8일부터 10월 31일 분석기간을 선정하여 HSPF 모델링을 실시하였으며 모의결과 실측치와 모의치의 유출량은 각각 179.7 mm, 707.3 mm, 190.1 mm로 유출률은 각각 50.1 %, 82.3 % 그리고 약 54.0 %로 나타났으며 월별 통계에 따른 적용성 분석으로 RMSE는 1.15~1.76 (mm/day), R²는 0.62~0.78, NSE는 0.62~0.76로 모의치는 실측치와 유의성이 있는 것으로 분석되었다. 또한, Sediment, T-N, T-P의 R²는 각각 0.72, 0.62, 0.63으로 상관성을 보이는 것으로 분석되었다. 다음 단계로 event별 벗짚지표피복시나리오를 적용하기 위해 강원대 시험포장으로부터 얻어진 실측자료로부터 발에서의 평균 유출 약 10 % 유출을 감소 조건에 맞추어 별미천 유역을 대상으로 HSPF 모델에서의 INFILT 침투매개변수값을 선정하였다. 발에서의 평균 유출을 10 % 감소 조건에 해당되는 INFILT 16.0 mm/hr의 값과 5 %, 2.5 % 유출 감소조건에서의 INFILT 12.0 mm/hr, INFILT 8.0 mm/hr에 오염부하량을 산정한 결과 평균적으로 유출저감이 약 10 % 나타나는 INFILT High 일 때 총 12개의 event에서 발에서의 Sediment, T-N, T-P의 평균 저감율은 각각 87.2 %, 28.5 %, 85.1 %로 나타났으며 이는 강원대 시험포장에서의 실제 평균 비점오염 저감효과 89.7 %~99.4 %에 근접함을 알 수 있었다. 침투매개변수인 INFILT에 따른 지표피복효과는 Sediment, T-P에서 저감효율이 80 % 이상으로 높았으며 반면 T-N은 약 30 %로 낮은 저감율을 보임으로써 저감효과가 크지 않음을 나타냈다. 하지만, INFILT 값에 따라 High, Medium, Low로 구분한 결과 T-P의 저감변화는 거의 이루어지지 않았으며 Sediment와 T-N 저감변화가 크게 나타남을 알 수 있었다.

이 결과로부터 발에서의 벗짚지표피복시나리오를 적용한 후에 유역내 발에서의 저감효과는 크게 나타났지만 유역전체면적 1.21 km²중 발이 차지하는 면적이 0.08 km²로 면적비율이 낮게 나타나 유역차원에서의 효과는 미비할 것으로 판단되지만 호우시 발생되는 대부분의 농업비점원오염 중에서 높은 비중을 차지하는 발에서의 비점원오염물질을 줄일 수 있는 비구조적 차원에서는 효과가 크다고 볼 수 있다.

발에서의 벗짚지표피복에 의한 침투율을 높여 지표유출에 대한 감소효과를 나타내는 지표피복 시나리오 원리에 따라 모델에

서도 그 특성을 그대로 적용하여 실제 적용효과와 유사한 효과를 나타내는 적정 매개변수 값을 선정하였다. 그러나 모델에서의 효과는 총강우량이 50 mm~250 mm에 범위에서 효과가 이루어지며 총강우량 300 mm에 평균 강우강도 9 mm/hr 이상일 때 유출저감효과를 나타 낼 수 없었다. 추 후 연구로 농촌 소유역의 토지이용별 비점원오염 배출 부하량의 비교 분석에 따른 발지역의 하류하천 수질에 미치는 영향을 강우 event별로 분석하여 하류하천 및 전체 유역에 미치는 영향을 파악하고 이를 농촌유역의 BMPs 시나리오로 활용될 수 있는 기초자료로 활용이 가능할 것으로 간주된다.

본 연구는 환경부에서 시행한 환경기초조사사업의 세부과제 “BMPs 효과모의 모델링과 Web 기반의 비점오염 저감기술 정보제공 지원시스템 개발” 재원으로 한강물환경연구소의 지원을 받아 수행된 기초연구사업에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Brun, S. E. and L. E. Band, 2000. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems* 24: 5-22.
2. Cho, J. P. and S. Mostaghimi, 2009. Dynamic agricultural non-point source assessment tool (DANST) Model application. *Biosystems Engineering* 120(4): 500-515.
3. Choi, J. D., 2010. A quantification study on the reduction effect of agricultural non-point source pollution in rural areas(1). National Institute of Environmental Research (in Korean).
4. Choi, J. D., 2011. A quantification study on the reduction effect of agricultural non-point source pollution in rural areas(2). National Institute of Environmental Research (in Korean).
5. Donigian, A. S. Jr. and N. H. Crawford, 1976. Modeling nonpoint pollution from the land surface. EPA-600/3-76-083. EPA Technological Service, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
6. Kang, D. K., 2005. Analysis of the reduction of sediment yield by selected BMP in the Naerincheon watershed of Soygang-dam using SWAT. Master's. D. thesis, Konkuk University (in Korean).
7. Kim, J. H., K. H. Han, and J. S. Lee, 2008.

- Characteristics of agricultural non-point source pollutants by rainfall events in rural watersheds. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(1): 69-77 (in Korean).
8. Lee, H. S., J. K. Kim, and S. U. Lee, 2008. Development of turbid water prediction model for the Imha dam watershed using HSPF. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers* 30(8): 760-767 (in Korean).
 9. Lee, W. B., Y. K. Son, S. B. Lee, and C. G. Yoon, 2010. Simulation of turbid water concentration in Soyang-dam watershed using BASINS/WinHSPF. *Konkuk Journal of Life & Environment* 32(1): 59-68 (in Korean).
 10. Narasimhan, B., P. M. Allen, R. Srinivasan, S. T. Bednarz, J. Arnold, and J. A. Dunbar, 2007. Streambank erosion and best management practice simulation using SWAT. In: Proceedings of 4th conference on 'Watershed management to meet water quality standards and TMDLs', San Antonio ASABE publication #701P207, 10-14 March 2007.
 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. Shin, E. S., J. Y. Choi, and D. H. Lee, 2001. Characteristics of non-point source pollutants in surface runoff from rural area. *Journal of Korean Society on Water Quality* 17(3): 299-311 (in Korean).