

Research Article

Open Access

골지천 유역의 최적관리기법 적용에 따른 수질개선효과 분석

박윤식,¹ 권재혁^{2*}

¹퍼듀대학교 농공학과, ²강원대학교 환경공학과

Application and Effectiveness Analysis of SWAT Filter Strip in Golji Watershed

Youn Shik Park¹ and Jae Hyouk Kwon^{2*} (¹Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University, West Lafayette in 47907, USA, ²Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Samcheok 245-711, Korea)

Received: 27 January 2014 / Revised: 4 February 2014 / Accepted: 6 February 2014

Copyright © 2014 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: Best management practices are often implemented to control nonpoint source pollutants. Best management practices need to be simulated and analyzed for effective Best management practices implementations. Filter strip is one of effective Best management practices in agricultural areas.

METHODS AND RESULTS: Soil and Water Assessment Tool model was selected to explore the effectiveness of filter strip to control total phosphorous in Golji watershed. Soil and Water Assessment Tool model was calibrated for flow and total phosphorous by Sequential Uncertainty Fitting ver.2 algorithm provided in Soil and Water Assessment Tool-Calibration and Uncertainty Procedures. Three scenarios defined by filter strip width were applied. The filter strip width of 5 m was able to reduce the most amount of total phosphorous. In other words, the total phosphorous reduction by filter strip of 5 m was 28.0%, while the reduction was 17.5% by filter strip of 1 m. However, the reduction per unit filter strip width were 17.4%, 8.0%, and 4.5% for 1 m, 3 m, and 5 m of filter strips, respectively.

CONCLUSION: Best management practices need to be simulated and analyzed so that the BMP scenario can be cost-effective. A large size of BMP might be able to control large amount of pollutants, however it would not be indicated as a cost-effective strategy.

Key words: Best management practice, Filter strip, SWAT, SWAT-CUP

서론

우리나라는 몬순기후의 영향으로 연평균 강수의 70%가 여름철에 집중되어 있어, 수자원 관리에 적지 않은 어려움을 겪고 있다(Kang *et al.*, 2012). 특히 한강유역의 상류 농업지대에는 집약적 토지이용이 급경사 지역에 이루어져 강우에 의한 토양유실에 취약하고, 과도한 비료사용 등으로 인해 강우시 발생하여 하천이나 강으로 유입되는 직접유출수에 의한 수질오염 및 탁수문제가 심각하다. 강우 유출수에 의해 농경지에서 발생하는 비점오염원은 토지이용 및 지형 등에 따라 발생량이 크게 변하기 쉽기 때문에 관리하기 어려운 오염원 중 하나로 여겨진다(Park *et al.*, 2007). 이에 정부에서는 탁수저감대책의 일환으로 소양강댐에 7년간 총 3,839억원의 사업비를 투입하여 범정부적 차원의 종합대책을 마련하였고, 고랭지밭 비점오염저감사업에 6년간 700억원의 사업비를 투입하는 등 고랭지 농업지대에서 발생하는 비점오염원의 저감을

*교신저자(Corresponding author): Jae Hyouk Kwon
Phone: +82-33-570-6577; Fax: +82-33-574-7262;
E-mail: environ4@kangwon.ac.kr

위한 다양한 최적관리기법을 제시하였다. 현재 우리나라에서 농경지 비점오염 저감을 위해 적용 및 연구되고 있는 최적관리기법에는 배수로, 우회수로, 인공습지, 침사지 등과 같은 구조적 비점오염 저감기법과 지표피복, 초생대 등의 비구조적 저감기법이 있다. 비구조적 저감기법 중 지표피복은 강우가 발생하였을 때 지표에 대한 강우 타격에너지를 완화하고, 토양으로 침투되는 침투능을 유지 및 증가시키며, 유출수의 유속을 감소시킴으로서 토양입자의 이탈을 감소시키기 때문에 토양의 유실을 방지하고 탁수나 비점오염물질의 발생을 억제하는 것으로 생각된다. 국내에서는 벚길거적 및 벚길매트 등을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 이를 넓게 분포되어 있는 농경지에 단기간에 적용하기에는 인력적, 시간적, 경제적 어려움이 있다(Shin *et al.*, 2011). 구조적 비점오염 저감기법 중 하나인 초생대는 주로 농경지 테두리 및 주변에 설치되며, 농경지에서 발생하는 유출수의 유속을 감소시켜 토양유실을 방지하고 유출수에 포함되어 있는 다양한 비점오염원을 여과시켜 수질개선을 개선하는 역할을 한다. Robinson 등(1996)은 폭 3-4 m의 초생대 적용시 유사저감효과가 70%, 폭 9.1 m의 초생대에서는 85%의 유사저감효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 Jin 등(2002)의 연구에서는 초생대를 적용하였을 때 10%~60%의 토양유실 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, Dillaha 등(1989)은 폭 4.6 m, 9.1 m 초생대 적용에 따라 T-P는 64%, 74% 저감되는 것으로 나타나 토양유실저감에 따른 비점오염원 저감효과가 큰 것으로 판단된다. 그러나 이러한 초생대의 비점오염원 저감효과를 모니터링만으로는 평가하기에는 시간과 비용의 한계점이 있다. 이에 다양한 수리/수문 모형을 이용한 초생대에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Ahn 등(2012)은 VFSMOD(Vegetative Filter Strip Modeling System) 모형을 이용하여 초생대 적용에 따른 경작지의 고형물질 유출 저감효과를 분석하였고, (Park 등(2013)은 초생대 적용에 따른 토양유실 저감효과를 분석할 수 있는 농업 비점오염 저감을 위한 Web-GIS 기반 초생대 평가 시스템을 개발하였다. Lee 등(2011)은 Soil and Water Assessment Tool(SWAT; Srinivasan and Arnold, 1994) 모형을 이용하여 만대천 유역의 초생대 적용에 따른 수질 개선효과를 분석하였고, Parajuli 등(2008)은 초생대 폭 10, 15, 20 m에 따른 abate fecal bacteria와 유사 저감 효과를 SWAT 모형을 통해 분석하였으며, Lee 등(2010)은 SWAT 모형과 인공위성영상상을 이용하여 초생대, 수변림 등의 다양한 최적관리기법 적용에 따른 수질개선효과를 분석하였다. 그러나 국내의 모형을 이용한 연구는 비점오염관리고시지역 등에 대부분 국한되어 있다. 특히 남한강의 발원천으로서, 한강 최상류를 형성하고 있는 광동댐 상류 골지천 유역은 고랭지 농업이 주로 이루어지고 과도한 비료 살포로 최근 수질오염 문제가 꾸준히 제기되고 있으며 정선군은 강릉시, 삼척시와 연계하여 비점오염원 관리지역 지정을 추진하고 있다. 그러나 해당 유역의 비점오염원 저감을 위한 연구는 현재까지도 부족한 것으로 생각되며, 효과적인 수질개선대책 수립을 위해서 최적관리기법 적용 효과 분석이 필요할 것으로 판단된다. 따

라서 본 연구의 목적은 골지천 유역의 SWAT 모형의 적용성 평가와 함께 광동댐 상류 발 지역에 대한 초생대 적용에 따른 수질개선효과를 분석하는데 있다.

재료 및 방법

Soil and Water Assessment Tool 모형의 개요

SWAT은 시공간적 인자들의 고려가 가능한 유역모형이며, Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB; Williams *et al.*, 1985; Arnold *et al.*, 1990)와 Ground Water Loading Effects on Agricultural Management Systems (GLEAMS; Leonard *et al.*, 1987), Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC; Williams *et al.*, 1984) 등의 모형을 연계하면서 개발되었다. SWAT 모형은 유역의 수문 및 비점오염원의 거동을 모의하는 데에 있어서, 유역을 소유역으로 구분하며, 이 소유역내 수리수문학적 반응 단위(Hydrologic Response Units; HRUs)로 구분하여 모의한다. SWAT 모형 내 연산의 기본 단위인 HRU는 토지이용도, 토양도, 그리고 경사에 의해 정의된다. SWAT 모형은 점차 그 이용 범위가 증가하여, 유역의 수리 수문학적 거동뿐만 아니라, 최근에는 유역의 비점오염원 관리를 위한 최적관리기법(Best Management Practices; BMPs)을 비롯하여, 저영향개발기법(Low Impact Development; LID)에 의한 유역의 비점오염원 저감계획 분석 및 평가에도 사용되고 있다. Bracmort 등(2006)은 모형의 하천에 관한 매개변수와 소유역에 관한 매개변수를 이용하여 미국 인디애나 주의 50 km² 면적의 Black Creek 유역에서의 T-S와 T-P에 대해 최적관리기법을 평가한 바 있다. Gitau 등(2004)은 미국 뉴욕 주에 위치한 Town Brook 유역에 대해, Contour strip cropping, Nutrient management plan, Riparian forest buffers의 최적관리기법을 연간 단위면적당 비용과 함께 유전자 알고리즘으로 최적화한 바 있다. Gitau 등(2008)은 미국 뉴욕 주에 위치한 1,180 km² 면적의 Cannosville Reservoir 유역에 대해서, Nutrient management plans처럼 모형에서 제공하는 최적관리기법들을 비롯하여, 모형의 매개변수의 수정을 통한 간접적인 방법으로 총 6개의 최적관리기법에 의한 인의 저감효과를 분석한 바 있다. Bulter과 Srivastava (2007)은 SWAT 모형을 이용하여, 미국 앨라배마 주의 농경지에 대해 다양한 최적관리기법 방안들은 제안한 바 있다.

Soil and Water Assessment Tool모형의 입력자료 구축

SWAT 모형은 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도와 같은 시간적 자료와 수치표고모형(Digital Elevation Model: DEM), 토지이용도(Landuse), 토양도(Soil Map)와 같은 공간적 자료를 필요로 한다. 본 연구에서는 태백, 삼척, 정선의 골지천 유역을 대상으로 하였으며(Fig. 1), 골지천 유역의 유역면적은 961.8 km², 유역평균경사는 41.1%, 유역평균고도는 783.2 m이며, 산림이 전체 유역 면적의 84.4%, 농경지가 9.08%로, 산림이 유역의 대부분을 차지하고 있다. 기상자료

는 태백, 대관령, 강릉, 동해, 정선 기상관측소의 2005년에서 2012년까지의 관측 자료를 이용하여 구축하였으며, 정선 기상관측소의 경우 2010년 8월부터 운영되어 이전 관측 자료는 가장 가까운 영월관측소의 관측 자료를 활용하였다. (Table 1)에 보이는 바와 같이 5개 관측소마다 최대 연 800 mm 이상의 강우량 차이를 보였으며, 연평균 최소 1279.19 mm 에서 최대 1515.44 mm 까지 다양하게 분포하는 것으로 나타났다.

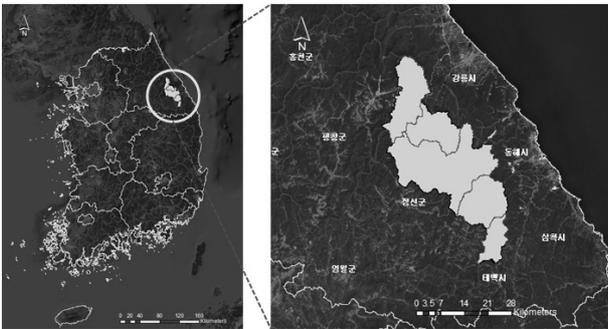


Fig. 1. Location of Golji watershed in Gangwon province.

Table 1. Annual precipitation from weather station (mm)

	Daegwanryeong	Gangneung	Donghae	Jeongseon	Taebaek
2005	1881.10	1653.40	1432.80	1252.10	1226.30
2006	2112.90	1852.70	1967.10	1304.20	1796.80
2007	1401.10	1441.60	1514.50	1714.90	1498.80
2008	1128.60	1342.70	978.50	876.60	959.50
2009	1331.70	1183.00	940.90	1027.00	1140.00
2010	1217.30	1102.80	1049.10	1332.20	1120.30
2011	1762.10	1810.50	1765.70	1761.40	1973.00
2012	1288.70	1321.40	1123.30	965.10	1523.40

유역의 지형정보를 나타내는 DEM은 국립지리원에서 제공하는 수치지도(격자크기 30 m)를 이용하여 구축하였으며, 토지이용도는 환경지리정보서비스에서(Environmental Geographic Information System: EGIS) 제공하는 중분류 토지이용자료를 이용하였다. 그리고 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도를 사용하였다.

SWAT-CUP을 이용한 매개변수 보정

SWAT 모형은 다양한 매개변수를 이용하여 수문 및 수질을 예측하기 때문에 대상 유역에 대해 매개변수를 보정한 후 수문 및 수질 모의에 이용하여야 한다. 본 연구에서는 대상유역에 대한 SWAT 모형을 보정하기 위하여, 5개의 알고리즘 (SUFI-2, PARASOL, MCMC, PSO, GLUE)을 이용할 수 있도록 하는 SWAT-CUP을 이용하였다(Fig. 2)(Abbaspour, 2007). SUFI-2(Sequential Uncertainty Fittin ver.2)는 순차적으로 매개변수를 추정하는 방법이며, Generalized Likelihood Uncertainty Estimation(GLUE) 알고리즘은 일반화 가능성의 불확실성에 의한 추정으로 매개변수를 추정한다. GLUE

알고리즘은 사후 확률 함수 도출을 위해 다른 매개변수와 관련된 가능성을 추정하고 출력 변수를 예측 하는 것을 기반으로 한다.Romanowicz 등(1994)은 통계적인 접근으로 더 공식적인 GLUE 알고리즘을 개발하였고, PARASOL은 SCE-UA(Shuffled complex evolution method developed at The University of Arizona)알고리즘을 응용하여 여러 목적함수를 전역 최적화 기준(Global optimization criterion: GOC)으로 최소화하는 다중목적 최적화 방법이다. Ryu 등 (2012)은 SWAT-CUP을 소양강댐 유역에 적용하였을 때 SUFI-2 알고리즘이 SWAT모형의 매개변수에 가장 적합하다고 하였다. 따라서 본 연구에서도 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 골지천 유역의 최적매개변수 산정에 이용하였다.

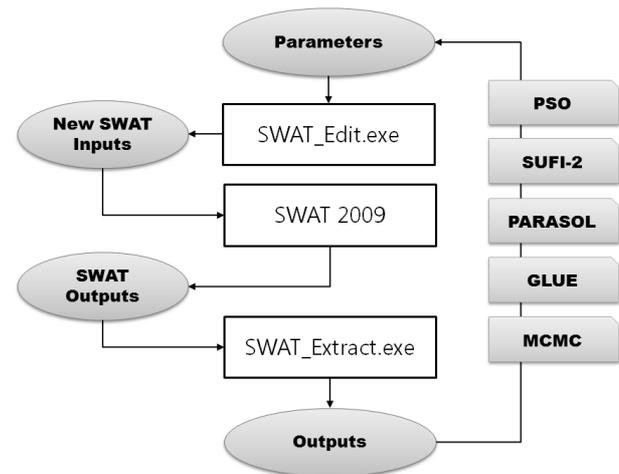


Fig. 2. Overview of SWAT-CUP(Abbaspour, 2007).

SWAT-CUP을 이용한 SWAT모형의 매개변수 보정을 위해 수질총량측정망 골지A 지점의 2011년~2012년 유량 및 수질 측정 자료를 구축하였으며, 8일 간격 유량자료(m3/s)와 수질자료(mg/L)를 일 부하량 자료로 치환하여 사용하였다 (식. 1). 또한 광동댐 지점에 대해 수자원공사에서 측정하는 광동댐 2011년~2012년 방류량/유입량 자료를 사용하여 다중 지점을 대상으로 모형을 보정하였다(Fig. 3). 보정 작업은 유량에 관련된 매개변수를 우선 보정한 후 산정된 유량 관련 최적 매개변수를 SWAT모형에 적용하고 다시 수질에 관한 매개변수를 보정하였다. 유량 보정에는 총 18개의 매개변수를 이용하였으며, 댐 제원 정보(Table 2)에 근거하여 광동댐의 방류량/유입량 기준으로 댐 제원에 관한 매개변수도 보정을 실시하였다.

SWAT-CUP에서 매개변수를 변화시키는 방법은 매개변수 값을 주어진 범위 내에서 직접 바꿔주는 방법(Replace by value), 주어진 범위 내에서 매개변수를 가감하는 방법(Add to value), 그리고 매개변수의 기본값에 주어진 범위 내에서 비율을 곱한 뒤 곱한 값을 기본 값에 가감하는 방법(Multiply by value)의 세 가지 방법이 있으며, 각 매개변수마다 다른 방법이 적용되었다. 모형을 보정한 후, 초생대 적용에 따른 수질개선 효과를 분석하였다. SWAT모형에서 초생대의 저감

효과 분석은 유사 저감효율을 기반으로 하며 저감효율 산정 방법은 (식. 2)와 같다. 광동댐 상류 소유역을 적용 대상 소유역으로 하였으며, 다양한 토지이용 중 밭에 해당하는 HRU에 대해서 초생대 설치 폭(1 m, 3 m, 5 m)에 따른 수질개선효과를 분석하였다.

일부하량(kg/day):

$$Load = Flow \times Conc. \times 86.4 \quad (1)$$

$Load =$ 일부하량(kg/day)
 $Flow =$ 유량자료(m^3/sec)
 $Conc. =$ 수질농도(mg/L)

유사저감효율(fraction):

$$trap_{ef} = 0.367 \times (width_{filtrstrip})^{0.2967} \quad (2)$$

$trap_{ef} =$ 유사저감 효율(fraction)
 $width_{filtrstrip} =$ 초생대폭(m)

Table 2. Information of Gwangdong Dam

Location	Hajang-myeon, Gwangdong-ri
Dam Height (m)	39.50
Dam Length (m)	292.00
Dam Volume ($10^3 m^3$)	616.00
Elevation (m)	678.50
Waterhsed Area (km^2)	125.00
Reservoir Area (km^2)	1.00
Total reservoir capacity($10^6 m^3$)	13.00
Effective storage capacity($10^6 m^3$)	8.00
Normal pool level(m)	672.00

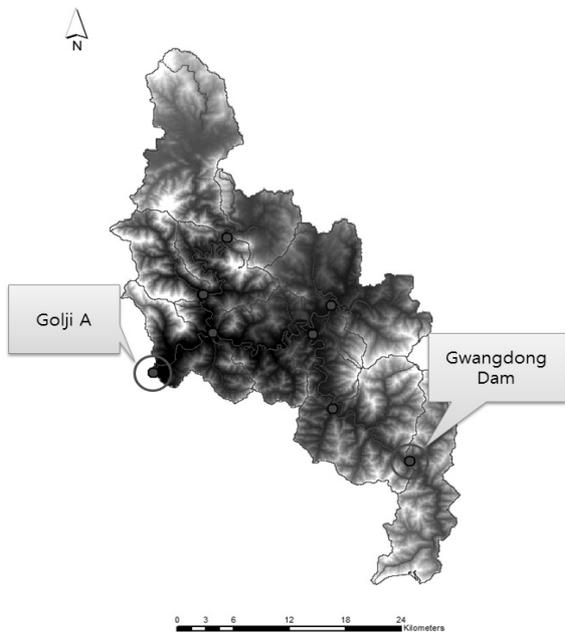


Fig. 3. Location of monitoring site in Golji watershed, Gangwon province.

결과 및 고찰

Soil and Water Assessment Tool Mdoel의 유량 및 수질 보정 결과

실측치에 대한 SWAT모형의 적용성 평가를 위해 유량은 Nash and Stucilffe Efficiency(NSE)(Nash and Stucilffe Efficiency,1970)(식. 3)와 수질은 % difference(ASCE, 1993)(식. 4)를 이용하였다.

Nash-Stucliff Efficiency:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

%difference:

$$\%difference = \left| \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right| \times 100 \quad (4)$$

$n =$ 데이터의 갯수
 $O_i =$ 시간*i*에서의실측치
 $P_i =$ 시간*i*에서의 예측치
 $\bar{O} =$ 실측치의 평균

NSE는 실측치과 예측치의 유사성을 나타내며, 1 에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 반영하는 것을 의미하며, 0보다 작을 경우 모델의 예측결과가 실측치와 연관성이 없음을 의미한다(Kang and Park, 2003). Donigian Report (2000)가 제시한 일반적인 모형의 효율 범위와 신뢰 구간은 (Table 3)과 같다.

Table 3. Criteria for evaluation model performance of flow

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
NSE for Flow	< 0.6	0.60~0.70	0.70~0.80	> 0.80

%difference는 실측치와 예측치를 수학적으로 비교하기 위한 통계치로서 동일한 결과가 예상되는 반복되는 측정에 대한 신뢰성을 나타내는 양적 지표로 사용되며, %difference 가 0 에 가까울수록 모든 실측치와 모의치의 차이가 작다는 것을 의미한다. Donigian Report (2000)가 제시한 일반적인 모형의 효율 범위와 신뢰 구간은 (Table 4)와 같다.

Table 4. Criteria for evaluation model performance of nutrients

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
%difference for Nutrients	-	25~35	15~25	< 15

NSE를 이용하여 유량을 보정 한 결과 골지A지점에 대한 예측치의 NSE는 0.8, R2는 0.8 (Fig. 4), 광동댐 지점 유입량에 대한 예측치의 NSE는 0.7, R2는 0.7 (Fig. 5), 광동댐 지점 방류량에 대한 예측치의 NSE는 0.6, R2는 0.6(Fig.

6)으로 모형이 대상 지점들에 대한 수문학적 거동을 잘 반영한 것으로 판단된다. 골지천 유역의 유량에 대해 보정된 매개변수를 적용하면서, 총인(Total Phosphorous, T-P)에 대한 매개변수를 보정하였으며, 골지A지점에 대한 예측치의 NSE는 0.39, R2는 0.42였으며 % difference 는 19% 나타났다(Fig. 7).

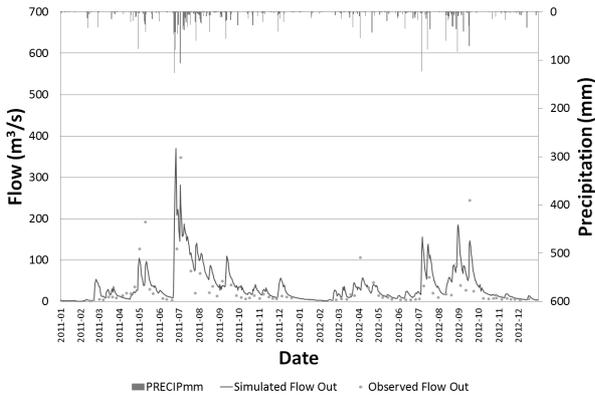


Fig. 4. Result of calibration for flow estimation at Golji A.

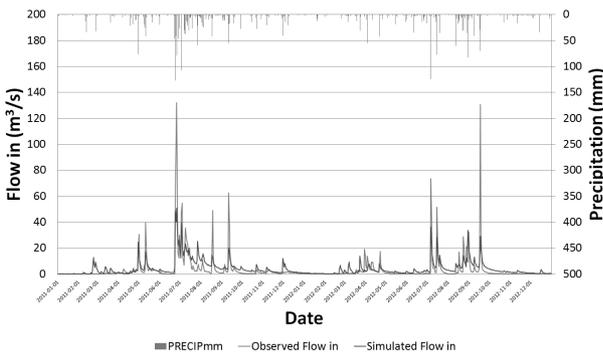


Fig. 5. Result of calibration for inflow estimation at Gwangdong Dam.

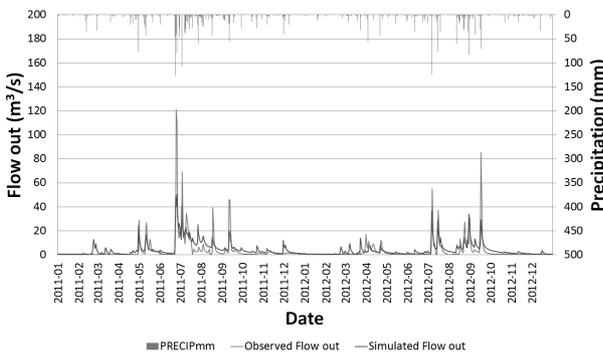


Fig. 6. Result of calibration for outflow estimation at Gwangdong Dam.

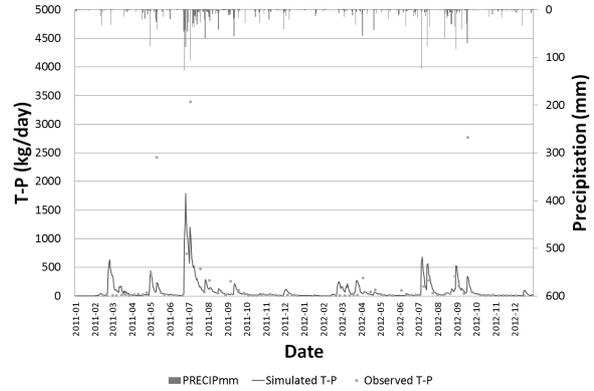


Fig. 7. Result of calibration for T-P at Golji A.

초생대 적용에 따른 수질 개선 효과

본 연구에서 보정된 SWAT 모형은 유량에 대해서는 실측치에 가까운 예측치를 모의한 반면, T-P에 대해서는 비교적 작은 NSE와 R2를 보였다. Donigian Report (2000)에 의해 % difference 가 15 - 35% 일 경우 “Very good”(< 15%)에 이어 “Good”으로 제안된 바 있으며, 따라서 본 연구에서 보정된 SWAT 모형의 T-P에 관한 모의는 가능한 것으로 판단된다. 하지만 NSE와 R2가 비교적 작은 값을 보였기 때문에 T-P의 거동이나 계절적 변화에 대한 분석은 합리적이지 못한 것으로 판단되었다. 이에 본 연구에서 초생대에 의한 T-P 저감 효과는 실측치와 예측치의 총합만으로 비교 및 분석하였다.

본 연구에서는 광동댐 상류지역 발에 3개의 초생대 시나리오를 적용하여 초생대에 의한 T-P 저감효율을 평가하였다. 저감효율 분석기간은 보정기간인 2011년~2012년을 대상으로 하였으며, 광동댐 유역 내의 토지이용 중 밭 7.6%에 초생대 적용 전과 폭 1, 3, 5 m의 초생대 적용 후의 T-P 저감효율은 비교하였다. 폭 1 m 초생대 적용시 초생대 적용 전에 비해 17.4%, 폭 3 m 초생대 적용시 24.1%, 폭 5 m 초생대 적용시 28%의 T-P 저감효율을 보였다(Table 5). 초생대 폭 증가에 따라 T-P의 저감효율이 커지는 것으로 나타나고 있지만, 폭 증가는 밭 면적의 감소를 의미하고 이는 생산량 감소로 이어져 경제적 손실이 발생할 수 있으며, 이에 경제성과 효율성을 고려한 적정 초생대 폭 선정 연구가 필요할 것이다. 또한 초생대의 단위 폭에 대한 T-P 저감효율(Efficiency, %)을 볼 때, 1 m 초생대의 경우 17.4%, 3 m 초생대의 경우 8.0%, 5 m 초생대의 경우 4.5%로 나타났기 때문에, 초생대 폭이 증가함에 따라 저감량과 저감율은 증가하지만, 효율성은 감소하는 것으로 나타났다.

Table 5. Effects of vegetative filter strip on T-P trapping efficiency

	FW = 0 m	FW = 1 m	FW = 3 m	FW = 5 m
T-P(kg/day)	8.65	7.15	6.57	6.23
Reduction(%)		17.4	24.1	28.0
Efficiency (%)		17.4	8.0	4.5

T-P: Total Phosphorous; FW: Vegetative Filter Strip Width

결론

본 연구에서는 최근 비점오염 문제에 따라 비점관리고지지역 지정을 추진하고 있는 골지천 유역을 대상으로 SWAT 모형의 적용성 평가 및 최적관리기법 적용에 따른 수질개선효과를 분석하였다. SWAT-CUP을 이용하여 유역 내 여러 지점의 실측자료에 대하여 모형을 보정하였으며, 골지A 지점의 유량에 대해서는 NSE는 0.8, 광동담 지점 방류량에 대해서는 NSE는 0.6, 유입량에 대해서는 NSE는 0.7로 나타나 골지천 유역에 대한 SWAT모형의 예측치가 실측치와 높은 유사성을 보였다. 반면에 T-P에 대한 모형의 예측치의 NSE와 R2는 0.39와 0.42로 예측치와 실측치가 연관이 없다고 보기는 힘들다. 예측치가 실측치의 경향을 반영한다고 보기는 힘들다. 하지만 실측치와 모의치 각각의 합에 있어서는 % difference의 경우 19%의 값을 보였다. 본 연구에서 보정된 모형의 경우 시간에 따른 비점오염원의 거동 등의 분석은 힘든 것으로 판단되었으나 각각의 총합의 경우 실측치와 모의치가 % difference에 근거하여 유의 수준 안에 있기 때문에, 본 연구에서는 비점오염원에 대한 분석이 총합으로 이루어졌다.

총 3가지의 초생대의 시나리오별 T-P 저감효율을 분석한 결과 초생대를 적용한 소구역 내에서 폭 1 m 초생대 적용시 17.4%, 폭 3 m 초생대 적용시 24.1%, 폭 5 m 초생대 적용시 28.0%의 저감효과를 보였다. 최적관리기법에 대한 모의 및 분석은 최적관리기법 대상이(본 연구의 경우 초생대) 해당 비점오염원에 대해 요구되는 만큼의 저감을 시킬 수 있는지 뿐만 아니라, 이에 따른 비용 등도 함께 고려되어야 한다. 초생대의 경우 지표 면적을 차지하기 때문에 초생대 폭의 증가는 높은 비용을 의미한다. 본 연구 결과에 의하면, 초생대 폭의 증가는 점차 낮은 효율성을 보였으며, 그러므로 초생대의 폭을 증가시키므로써 T-P를 저감시키기 보다는 농경지에서의 지표피복 등과 같은 다른 기법을 적용하는 것이 효율적일 것으로 생각된다. 예를 들어 유역에서 발생하는 T-P에 대해 25%의 저감이 요구된다면, 5 m 초생대를 적용하기 보다는 3 m 초생대를 적용하고 1.9%를 더 저감시키기 위해 다른 최적관리기법을 적용하는 것이 효율적일 수가 있다. 본 연구와 같이, 최적관리기법은 현장에 적용되기 전에 이를 모의할 수 있는 모형에 의해 분석이 선행되어야 하며, 또한 이 과정에서 대상 최적관리기법이 요구되는 비점오염원의 양을 저감시킬 수 있는지와 함께 그 효율성이 함께 분석이 이루어져야 한다.

Acknowledgement

This study was partly supported by Kangwon Green Environment Center (13-01-30-33), Korea Environmental Industry & Technology Institute GAIA Project (No: 2012000540017). The authors acknowledge their generous support.

References

- Abbaspour, K.C., 2007. *User Manual for SWAT-CUP*, pp. 1-33, Swiss federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Deubendorf, Switzerland.
- Ahn, J.H., Yun, S.L., Kim, S.K., Park, Y.S., Lim, K.J., 2012. Analysis of Suspended Solids Reduction by Vegetative Filter Strip for Cultivated Area Using Web GIS-Based VFSMOD, *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 34, 792-800.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D., Sammons, N.B., 1990. *SWRRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*. 1-210, Texas A&M University Press, Texas, USA.
- ASCE, 1993. ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models, Criteria for Evaluation of Watershed Models, *J. Irrig. Drain Eng.* 119, 429-442.
- Bracmort, K.S., Arabi, M., Frankenberger, J.R., Engel, B.A., Arnold, J.G., 2006. Modeling Long-term Water Quality Impact of Structural BMPs, *Trans. ASABE* 49, 367-374.
- Bulter, G.B., Srivastava, P., 2007. An Alabama BMP Database for Evaluating Water Quality Impacts of Alternative Management Practices, *Applied Eng. Agric.* 23, 727-736.
- Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Lee, M.D., 1989. Vegetative filter strips for agricultural non-point sources pollutant control, *Trans. ASABE* 32, 513-519.
- Gitau, M.W., Veith, T.L., Gburek, W.J., 2004. Farm-level Optimization of BMP Placement for Cost-effective Pollution Reduction, *Trans. ASABE* 47, 1923-1931.
- Gitau, M.W., Gburek, W.J., Bishop, P.L., 2008. Use of the SWAT Model to Quantify Water Quality Effects of Agricultural BMPs at the Farm-scale Level, *Trans. ASABE* 51(6), 1925-1936.
- Kang, H.W., Ryu, J.C., Kang, H.S., Choi, J.W., Moon, J.P., Choi, J.D., Lim, K.J., 2012. Enhancement and Application of SWAT Auto-Calibration using Korean Ministry of Environment 8-Day Interval Flow, Water Quality data, *J. Korean Soc. Water Quality* 28, 247-254.
- Kang, M.S., Park, S.W., 2003. Development and Application of Total Maximum Daily Loads Simulation System Using Nonpoint Source Pollution Model, *J. Korean Water Resour. Assoc.* 36, 117-128.
- Jin, C.X., Dabney, S.M., Römkens, M.J.M., 2002. Trapped mulch increases sediment removal by vegetative filter strips: A flume study, *Transactions of the ASAE*, 45, 929-939.

- Lee, J.W., Eom, J.S., Kim, B.C., Jang, W.S., Ryu, J.C., Kang, H.W., Kim, K.S., Lim, K.J., 2011. Water Quality Prediction at Mandae Watershed using SWAT and Water Quality Improvement with Vegetated Filter Strip, *J. Korean Soc. Agri. Eng.* 53, 37-45.
- Lee, M.S., Park, G., Park, M.J., Park, J.Y., Lee, J.W., Kim, S.J., 2010. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying Best Management Practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery, *J. Environ. Sci.* 22, 826-833.
- Leonard, R.A., Knisel, W.G., Still, D.A., 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems, *Trans. ASABE* 30, 1403-1428.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.E., 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I-A Discussion of Principles, *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- Parajulia, P.B., Mankinb, K.R., Barnesb, P.L., 2008. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT, *Agric. Water Manage.* 95, 1189-1200.
- Park, Y.S., Kim, J., Park, J., Jeon, J.H., Choi, D.H., Kim, T., Choi, J., Ahn, J., Kim, K., Lim, K.J., 2007. Evaluation of SWAT applicability to simulation of sediment behaviors at the Imha-dam watershed, *J. Korean Soc. Water Quality* 23, 467-473.
- Park, Y.S., Engel, B.A., Shin, Y.C., Choi, J.D., Kim, N.W., Kim, S.J., Kong, D.S., Lim, K.J., 2013. Development of Web GIS-based VFSMOD System with Three Modules for Effective Vegetative Filter Strip Design, *Water* 5, 1194-1210.
- Robinson, C.A., Ghaffarzadah, M., Cruse, R.M., 1996. Vegetative filter strip effects on sediment concentration in cropland runoff, *Journal of Soil & Water Conservation* 51, 227-230.
- Romanowicz, R.J., Beven, K.J., Tawn, J., 1994. Evaluation of predictive uncertainty in nonlinear hydrological models using a Bayesian approach, in: Barnett, V., Turkman, K.F.(Eds), *Statistics for the Environment 2: Water Related Issues*, Wiley, England, pp. 297-315.
- Ryu, J.C., Kang, H.W., Choi, J.W., Kong, D.S., Kum, D.H., Jang, C.H., Lim, K.J., 2012. Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration at Soyang-gang Dam Watershed, *J. Korean Soc. Water Enviorn.* 28, 347-358.
- Shin, M.H., Won, C.H., Park, W.J., Choi, Y.H., Jang, J.R., Lim, K.J., Choi, J.D., 2011. Analysis of the Reduction Effect on NPS Pollution Loads by Surface Cover Application, *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 53, 29-37.
- Srinivasan, R., Arnold, J.G., 1994. Integration of a basin-scale water quality model with GIS, *J. American Water Resources Assoc.* 30(3), 453-462.
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASABE.* 27, 129-144.
- Williams, J.R., Nicks, A.D., Arnold, J.G., 1985. Simulator for water resources in rural basins, *J. Hydraul. Eng.* 111, 970-986.