



# SWAT 모형을 이용한 최적관리기법 적용에 따른 충주댐 유역의 하천수질 개선연구

## Improvement of Stream Water Quality by Applying Best Management Practices to Chungjudam Watershed using SWAT Model

유영석\* · 박종윤\* · 신형진\*\* · 김삿별\* · 김성준\*\*\*,†

Yu, Yung-Seok · Park, Jong-Yoon · Shin, Hyung-Jin · Kim, Saet-Byul · Kim, Seong-Joon

### ABSTRACT

This study is to assess the reduction of nonpoint source pollution by applying Best Management Practice (BMP) in Chungju-dam watershed (6,585.1 km<sup>2</sup>) using Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The model was calibrated using 3 years (1998-2000) daily streamflow at 3 locations and monthly water quality of sediment (SS), total nitrogen (T-N) and total phosphorus (T-P) data at 2 locations and validated for another 3 years (2001-2003) data. The 5 BMPs of streambank stabilization, porous gully plugs, recharge structures, terrace, and contour farming were applied to stream and area with the specific criteria of previous researches. Through the parameter sensitivity analysis, the farming practice P-factor and Manning's roughness of stream were sensitive. Overall, the NPS reduction effect was high for streambank stabilization, terrace, and contour farming. At the watershed outlet, the SS, T-P, and T-N were reduced by 64.4 %, 62.8 % and 17.6 % respectively.

**Keywords:** SWAT; BMP scenario; Non-point source pollution; Water quality, Chungju-dam watershed

### 1. 서 론

최근 경제·산업발전과 더불어 도시가 발달하고 인구가 증가함에 따라 물 사용량이 급증하는 만큼 그에 따르는 오폐수 역시 증가 추세에 있으며 이로 인해 유사량에 대한 오염, 질소, 인을 비롯한 유기물질 오염이 갈수록 심해지고 있다. 수질오염 또는 부영양화는 단순하게 수질 그 자체만이 악화되는 것이 아니라 외부로부터 과도한 영양염 유입으로 인해 담수조류가 번성하고 내부 유기물질 증가로 수생태계에서 물질순환의 균형이 파괴되는 현상을 의미한다(Wetzel and Likens, 1991).

현재까지 수질개선의 노력은 하수종말처리장 등의 시설설치를 통하여 지속적으로 관리가 이루어 질수 있는 점원 오염을 중심으로 이루어져 왔다. 특정한 지점에서 발생하는 점원 오염(Point Source Pollution)은 오염물질의 발생원과 이동경로가 비교적

명확하여 전체 오염물질 부하량에 대한 정량화가 가능하다. 하지만 이러한 점원 오염의 관리가 체계적으로 이루어지는데 반해 여전히 수질이 개선되지 않는 이유는 관리가 어려운 비점오염원(Non-point Source Pollution, NPS)이 큰 비중을 차지하기 때문이다. 미국에서도 배출경로가 명확한 점원 오염의 관리는 정착되고 있는 반면 비점오염원 물질의 오염기여도와 중요성이 주요 관심사가 되고 있으며, 더 이상 시설 위주의 처리로 해결이 어려운 비점오염원물질과 강우유출수 등에 대한 처리 문제가 앞으로 수환경 관리에서 중요해지고 있는 추세이다(Song, 2008). 현재 우리나라 주요 5대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강) 수계의 전체 오염중 비점오염원의 부하량이 약 30%를 차지하고 있어 그 대책이 시급한 실정이다. 유역에서의 비점오염원의 부하는 강우에 의한 수문순환과정과 함께 발생한다. 농경지에 살포된 비료, 농약 등은 토양에 부착되어 있다가 빗물에 의하여 용해되거나, 토립자에 부착된 상태로 지표유출과 토양침식과정에 의하여 용해되거나, 토립자에 부착된 상태로 지표유출과 토양침식과정에 의하여 경사면을 따라 하류로 이동하여 하천 또는 저수지, 댐, 하구에 유입하여 수질오염을 일으키게 된다. 또한, 농경지로부터 침투수와 함께 지표면 아래로 이동되어 결국 지하수의 오염을 발생시키기도 한다. 그러나 유역에 위치한 농업유역으로부터 배출되는 각종 비점오염원을 효율적으로 규제하기 위한 환경 기초시설이 상대적으로 미흡하다. 그래서 최근들어 비점오

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

2011년 8월 5일 투고  
 2011년 11월 28일 심사완료  
 2011년 12월 19일 게재확정

염원을 효율적으로 규제하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 특히 비점오염원은 주로 강우에 의하여 발생하기 때문에 주기적이 아닌 간헐적으로 발생하며 지표면을 따라 흐르는 강우유출수의 양 및 지속시간에 따라 수질이 크게 영향을 받으며 해당유역에 오염원이 광범위하게 산재되어 있어 점원 오염과 같은 처리 시설의 설치를 통한 해결이 어렵다. 그러므로 비점오염원으로 인한 수질악화 문제는 비점오염원 자체를 줄이기보다 장기적이고 근본적인 방법으로 오염원의 원인을 파악하여 저감대책을 세우고 수행하는 노력이 필요하다.

최적관리기법 (Best Management Practices, BMP)은 비점오염원 저감대책으로 영농방법의 개선, 오염원의 발생 및 비점오염원에 의해 초래되는 유출수에서의 오염물질 관리등을 위한 가장 효율적인 방법을 뜻한다 (Park et al., 2009). BMP 적용에 의한 비점오염원 저감 모델링 평가의 최근 연구동향을 살펴보면, 미국과 일본, 영국을 중심으로 초기에는 주로 비점오염원의 상대적 중요성을 특징짓는데 초점을 맞추었으나, 점차 농업 및 도시지역에서의 BMP 수행으로 그 초점이 바뀌었다 (Choi et al., 2002). 국외 연구 사례로 Tuppad et al. (2010)는 SWAT 모형을 사용하여 Bosque (4,282 km<sup>2</sup>)강 전체에 BMPs를 적용, 유사 및 영양물질에 대한 저감효과를 산정하였다. 그리고 Narasimhan et al. (2007)은 하천에서의 침식으로 인한 하류저수지에서 유사 및 영양물질의 발생을 파악하였고, SWAT 모형을 사용하여 상류 하천에서부터 BMPs를 적용하여 비점오염원물질 저감에 대하여 모의하였다. 국내 연구 사례로는 Lee (2008)은 SWAT모형을 이용, 미래기후 및 토지이용에 따른 비점오염원의 거동을 분석하였다.

본 연구에서는 충주댐유역을 대상으로 유역 특성에 따른 BMP 시나리오의 적용과 저감 효과를 비교분석하여 현실적인 비점오염원 저감대책을 제시하고자 하였다. 본 연구를 수행하기 위하여 비점오염원에 대한 수질모의가 가능한 SWAT모형을 선정하여 유사량 (Sediment), 총질소 (Total Nitrogen, TN) 및 총인 (Total Phosphorus, TP)의 수질항목에 대하여 적용성을 평가하고 충주댐 유역의 수질현황을 파악한 후 각 소유역의 비점오염원 부하특성에 따른 BMP시나리오를 적용하여 저감 효과를 비교 분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상유역 및 자료구축

본 연구의 대상인 충주댐 유역의 면적은 6,585.1 km<sup>2</sup>이며 유역평균표고는 609.1 m 유역평균경사는 36.9 %로 국내 북동부 산악지역에 위치해 있으며 산림면적은 5,573.1 km<sup>2</sup>으로 유역면

적의 84.6 %에 이른다 (Fig. 1). 상류의 평창강과 남한강이 합류하여 충주호로 흘러들며, 다목적댐인 충주댐은 생활용수, 공업용수, 관개용수, 하천유지용수를 위해 연간 3,380백만톤의 용수를 공급하고 있다.

기상자료는 6년 (1998년~2003년) 동안의 대관령, 태백, 영월, 원주, 제천, 충주 등 총 6개의 기상 관측소 자료를 수집하였으며, 유량자료는 충주댐 (Chungju Dam, CD) 지점 및 남한강과 동강의 합류지점인 영월1 (YW #1) 지점, 남한강 상류의 영월2 (YW #2) 지점에 대하여 국가수자원관리종합정보시스템 (Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 일별 유량자료를 사용하였으며, 수질자료는 환경부가 관리하는 동강 (DR) 지점, 평창강 (PR #3) 지점에 대하여 채수일자를 포함한 월 1회 측정된 부유사 (suspended solid), 총질소 (T-N), 총인 (T-P)의 농도자료를 이용하여 부하량 자료를 구축하였다. 1998-2003의 검보정기간동안 72개의 수질자료를 사용하여 모형의 보정 및 검증은 가능하나 측정횟수와 측정시기의 불연속성 문제로 인하여 강우유출이 높은 시기에는 실측자료가 없는 경우가 많아, 모형의 검증에대한 신뢰성이 떨어지는 경향을 보였다. 이러한 결과로 모형의 신뢰성을 높일 수 있는 연속적이고, 정확한 자료가 필요하다고 사료된다.

유출과 수질 검보정 지점은 Fig. 1에 표시하였으며 Fig. 1에서는 17개 소유역, 기상관측소, 검보정 지점 그리고 충주댐유역의 출구점 등을 설명하고 있다. Fig. 2는 충주댐유역의 주하천망과 하천차수, Digital Elevation Model (DEM), 수문학적 토양군, Landsat 토지이용도를 보여주고 있으며, Table 1은 토지이용별 면적을 정리한 것이다.

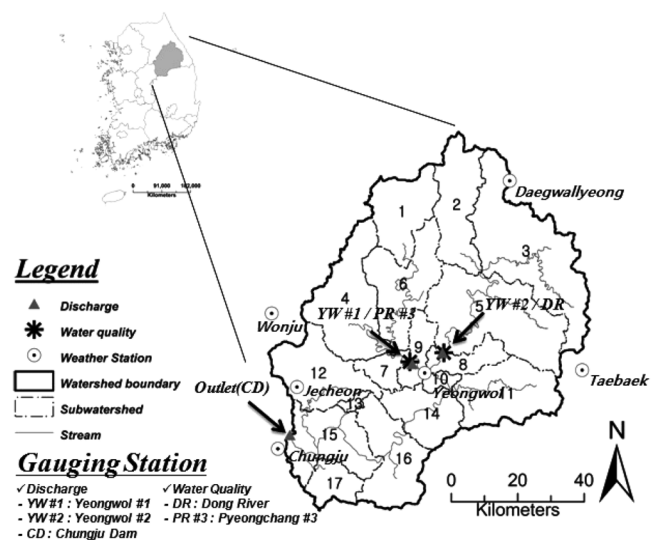


Fig. 1 Study watershed and gauging stations

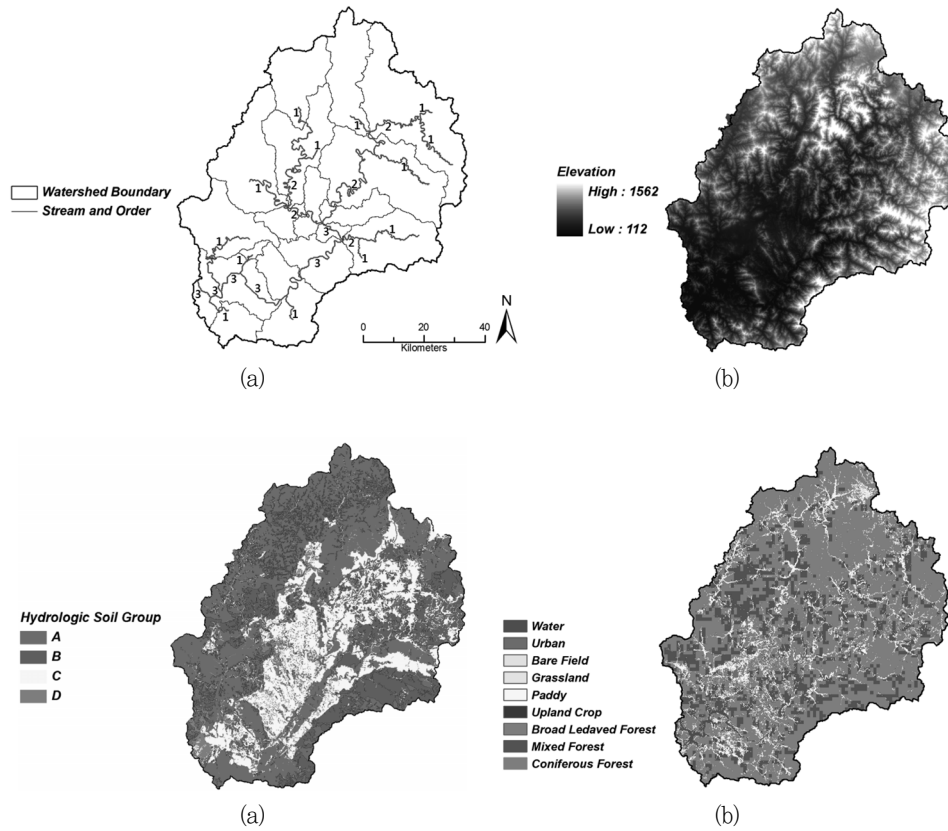


Fig. 2 Spatial input data for model setup: (a) stream and order, (b) DEM, (c) hydrologic soil group, and (d) land use

Table 1 Land use of 17 subwatersheds

Sub-watershed	Land use area, km <sup>2</sup> (%)							
	Water	Urban	Bare-Field	Grassland	Paddy	Upland-Crop	Forest	Total
1	0.1 (0.001)	0.4 (0.006)	2.7 (0.041)	1.5 (0.022)	34.5 (0.524)	0.5 (0.008)	347.9 (5.3)	387.5 (5.9)
2	0.1 (0.001)	0.4 (0.006)	1.4 (0.022)	1.9 (0.029)	45.2 (0.686)	0.8 (0.012)	398.0 (6.0)	447.7 (6.8)
3	2.1 (0.031)	1.1 (0.016)	12.3 (0.186)	13.9 (0.211)	95.6 (1.451)	5.3 (0.080)	822.0 (12.5)	952.0 (14.5)
4	1.6 (0.024)	1.3 (0.019)	3.5 (0.053)	6.4 (0.097)	73.5 (1.116)	6.2 (0.095)	503.0 (7.6)	595.5 (9.0)
5	2.9 (0.044)	2.7 (0.041)	3.7 (0.057)	21.9 (0.332)	86.0 (1.305)	7.5 (0.114)	733.4 (11.1)	858.0 (13.0)
6	2.6 (0.040)	0.9 (0.013)	3.0 (0.046)	4.4 (0.067)	45.4 (0.690)	2.9 (0.045)	434.8 (6.6)	494.1 (7.5)
7	1.2 (0.018)	3.0 (0.045)	0.8 (0.011)	6.5 (0.099)	27.8 (0.422)	2.5 (0.037)	78.3 (1.2)	120.0 (1.8)
8	0.5 (0.008)	3.2 (0.048)	0.7 (0.010)	4.9 (0.074)	26.4 (0.401)	1.8 (0.028)	124.9 (1.9)	162.4 (2.5)
9	1.1 (0.017)	0.9 (0.014)	0.2(0.003)	2.1 (0.032)	17.6 (0.268)	3.0 (0.045)	132.0 (2.0)	157.0 (2.4)
10	0.4 (0.005)	0.2 (0.003)	0.1 (0.002)	0.2 (0.004)	4.5 (0.069)	0.4 (0.006)	46.6 (0.7)	52.6 (0.8)
11	0.0 (0.000)	0.4 (0.007)	0.7 (0.011)	0.7 (0.011)	15.6 (0.237)	1.3 (0.019)	469.6 (7.1)	488.4 (7.4)
12	0.2 (0.003)	10.4 (0.157)	2.8 (0.042)	6.0 (0.091)	73.4 (1.114)	6.3 (0.096)	362.4 (5.5)	461.4 (7.0)
13	0.0 (0.000)	0.3 (0.004)	0.2 (0.003)	0.5 (0.008)	8.4 (0.128)	1.2 (0.018)	19.1 (0.3)	29.8 (0.5)
14	0.9 (0.013)	0.4 (0.006)	2.8 (0.042)	3.4 (0.51)	29.8 (0.453)	2.4 (0.037)	278.0 (4.2)	317.6 (4.8)
15	48.2 (0.731)	0.9 (0.014)	1.4 (0.021)	7.8 (0.118)	66.1 (1.004)	4.5 (0.069)	312.4 (4.7)	441.3 (6.7)
16	2.3 (0.035)	8.2 (0.124)	6.0 (0.090)	5.5 (0.083)	55.4 (0.841)	6.6 (0.100)	367.4 (5.6)	451.2 (6.9)
17	0.3 (0.005)	0.3 (0.004)	0.2 (0.002)	1.3 (0.019)	22.9 (0.341)	0.4 (0.006)	143.2 (2.2)	168.6 (2.6)
Total	64.4 (1.0)	34.8 (0.5)	42.3 (0.6)	88.8 (1.3)	728.0 (11.1)	53.7 (0.8)	5573.0 (82.2)	6,585.1 (100)

## 2. SWAT 모형의 개요

SWAT모형은 1990년대 초에 미국 농무성 농업연구소 (USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역모형으로서, 유역내 다양한 물리적 과정을 모의할 수 있고, 유역을 소유역으로 구분하여 대규모의 복잡한 유역에서의 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측할 수 있는 장점이 있다 (Neitsch et al., 2001). 이 모형은 일단위 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기강우유출 모형으로서 4가지 부모형 (수문, 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형)으로 구성되어있다. 침식과 유사량은 수점범용토양침식공식 (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)에 의해 추정되는데, USLE가 침식에너지의 지표로서 강우를 사용하는 반면에 MUSLE는 침식과 유사량을 모의하기 위해 총 유출량을 사용한다.

## 3. 매개변수 민감도 분석

일반적으로 최적관리기법의 저감효과를 파악하기 위하여, 모형의 주요 매개변수들을 대상으로 각 매개변수별로 순차적으로 조절하여 저감효과를 평가하는데, 본 연구에서는 식 (1)의 민감도지수 (Sensitivity Index, SI) (Cullen and Frey, 1999)를 사용하여 여러 가지 최적관리기법 매개변수 값에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

$$SI = \frac{(Y_2 - Y_1)}{Y_{preBMP}} \quad (1)$$

여기서,  $Y_2$ ,  $Y_1$ 은 각각 BMP의 매개변수 범위에서 최대, 최소 값에 상응하는 모형의 출력결과값들이며,  $Y_{preBMP}$ 는 BMP 적용 전의 모형의 출력결과값이다. SI 값이 양수일때 매개변수값을 증가시키면 모형의 출력결과값은 증가하며, 매개변수값을 감소시키면 모형의 출력결과값이 감소한다. SI 값이 음수일때 매개변수값을 증가시키면 모형의 출력결과값이 감소하며 매개변수를 감소시키면 모형의 출력결과값은 증가한다.

## 4. BMP 시나리오

충주댐 유역의 유역 특성에 따른 비점오염원 저감효율을 비교 분석하기 위하여, Fig. 1과 같이 17개 소유역의 유역특성 및 토지이용현황을 파악한 후, 소유역의 부하량 특성에 적합한 BMP 시나리오를 적용하였다. 적용한 BMP 시나리오에 대한 저감효과

는 식 (2)와 같이 산정하였다.

$$reduction(\%) = \frac{100(preBMP - postBMP)}{preBMP} \quad (2)$$

Table 2는 본 연구에서 선정한 5개 BMP 시나리오에 대한 설명과 적용범위, BMP 시나리오 적용 후 (postBMP) SWAT 매개변수 조정값을 정리한 것이다. 여기서 조정된 매개변수값은 국외 연구사례를 참고하였는데, 이는 비점오염 저감을 위한 구조적, 비구조적 방법으로 본 연구에서는 충주댐 유역에 대해 적용성을 평가하고 저감효과를 비교분석하였다.

각각의 BMP 시나리오 및 적용방법은 다음과 같다. 첫째, Streambank Stabilization은 하도에서의 유사저감을 위한 시나리오로서 하천흐름에 의한 침식을 방지하기 위한 방법이다. Narasimhan et al. (2007)의 연구사례에서 이와같은 하도안정화 기술을 적용하여 1.7~15.3 %의 유사저감효과를 보인바 있다. 이를 SWAT 모형에 구현하기 위해 본 연구에서는 하도내 침식 (CH\_EROD)과, 피복 (CH\_COV), 조도계수 (CH\_N(2))를 나타내는 매개변수를 선정하였다. 이때 매개변수 적용구간은 지류하천을 제외하고 하천차수가 3차 이상인 주하도 구간 (Fig. 2a)에 대해 침식과 피복, 조도계수를 보정값 (Table 3)으로부터 조정하였다. 여기서, 조도계수는 Chow (1959)가 제시한 값을 사용하였는데 조정값으로 자연하천구간 (Natural stream channel)의 재료가 clean, straight stream에 해당하는 0.03 값을 적용하였다. 이는 우리나라 대부분의 자연하천 조도계수보다 작은 값이기는 하나 SWAT 모형에서 조도계수가 0.02로 보정되어 postBMP값을 0.01 증가시켰다. 둘째, Porous Gully Plugs는 Gully침식이 예상되는 지역에 돌이나 나무 등을 설치, 유속을 줄여 짧은 시간내에 발생하는 침식을 방지하는 시나리오이다. Srinivasan (2008)은 미국 Bosque River 유역 (4,282 km<sup>2</sup>)에 SWAT 모형을 이용하여 Gully침식 방지를 위해 조도계수를 조정된 결과 1.4~30.3 %의 유사저감 효과를 보인바 있다. 본 연구에서는 하천유속 감소에 따른 Gully침식 방지를 위해 유역평균경사가 5 % 이상이고 1, 2차 하천에 해당하는 지류하천구간에 대해 조도계수 (CH\_N(1))를 조정하였다. 조정값으로 Chow (1959)가 제시한 홍수범람 (Flood plain)의 재료가 light brush and weeds에 해당하는 0.05 값을 적용하였는데, SWAT 모형의 보정시 지류하천의 조도계수는 고려하지 않았기 때문에 기본값인 0.014에서 0.02로 증가시켰다. 셋째, Recharge Structures는 하천을 통해 이동하는 물의 일부가 침투를 통해 얕은 지하수에 도달한 후, 그 일부의 물을 유지하는 기능을 수행하는 시나리오이다. 현실적으로 국내 하천에 이를 적용하는데에는 한계가

**Table 2 The selected model parameters for 5 BMP scenarios of this study**

BMP scenario	Purpose	Selection criteria	Model parameters	Post-BMP	References
Streambank Stabilization	Reduce sediment load in streams Maintain channel capacity	Main stream (3rd, 4th order and above)	CH_COV	0.25	Narasimhan
			CH_EROD	Reduce 50 %	et al. (2007)
			CH_N(2)	0.03	Chow (1959)
Porous Gully Plugs	Reduce ephemeral gully erosion Reduce velocity of flow Trap sediment	Tributary channels in subbasins with slope > 5 %	CH_N(1)	0.05	Chow (1959) Srinivasan (2008)
Recharge Structures	Increase ground water recharge	Tributary channels in subbasins with soils of hydrologic group A and B	CH_K(1)	25	Lane (1983)
Terrace	Reduce overland flow and conduct runoff to a safe outlet Reduce sheet erosion	Paddy	CN2	Reduced by 5 from the calibration values	SCS Engineering Division (1986)
			P-factor	0.10 if slope = 1 to 2 % 0.12 if slope = 3 to 8 %	Schwab et al. (1995)
Contour Farming	Reduce sheet erosion	All cropland	CN2	Reduced by 3 from the calibration values	SCS Engineering Division (1986)
			P-factor	0.5 if slope = 1 to 2 % 0.6 if slope = 3 to 8 %	Schwab et al. (1995)

© CH\_COV; Channel cover factor, CH\_EROD; Channel erodibility factor, CH\_N(2); Manning's "n" value for the main channel, CH\_N(1); Manning's "n" value for the tributary channels, CH\_K(1); effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium (mm/hr), CN2; Initial SCS runoff curve number for antecedent moisture condition II, P-factor; USLE equation support practice factor

있으나, Lane (1983)의 연구에서는 하천의 침투 및 수리전도도를 조정하여 하천의 흐름에너지를 감소시킨바 있다. 이를 위해 본 연구에서는 침투율이 높은 장소에서 효과가 좋을 것으로 판단 충주댐 유역의 수문학적 토양군 A, B (Fig. 2c)에 해당하는 지류하천에 대해 SWAT 모형의 투수계수 (CH\_K(1))를 0.5에서 25 mm/hr로 증가시켰다. 넷째, Terrace는 비탈경사의 길이를 줄임으로써 면상침식이나 실개천에서의 침식을 줄이고, gully의 형성을 방지하며 강수량이 불충분한 지역에서의 강우유출을 유지하는 시나리오이다. 이를 위해 SWAT 모형에서 지표유출수 저감을 위한 CN값 (SCS Engineering Division, 1986)과 USLE의 관행인자 (P-factor)를 각각 조정하였다. 적용범위는 경사가 1~2 %, 3~8 %인 논지역 (Paddy)의 P-factor를 Schwab et al. (1995)이 제시한 값 0.10과 0.12를 각각 적용하였으며, 논 의 CN값을 78에서 73으로 조정하였다. 특히, 본 연구에서 사용한 논지역의 CN값은 Bae et. al. (2003)이 제시한 것으로 수문학적 토양그룹에 상관없이 모두 78을 적용하였다. 따라서, 지표 유출수 저감을 위해 CN값의 조정은 현실적이지 않으나, SWAT 모형에서 Terrace 설치에 따른 지표유출수 저감효과를 모의하기 위해 Tuppad et al. (2010)의 연구에서 논지역의 지표유출수 저감을 위해 조정한 값 (-5)을 사용하였다. 다섯째, Contour Farming은 등고선 경작으로 유출과 면상침식을 줄이는데 목적이 있다. 관련 매개변수로는 Terrace와 마찬가지로 CN값과 USLE P-factor를 각각 조정하였다. 경작지의 CN값을 78에서 75로 조정하였고, P-factor는 경사가 1~2 %에서 0.5, 3~8 %에서 0.6을 적용하였다.

**Table 3 The parameter values of 3 subwatersheds for BMP application**

Parameters	Calibration Range	Pre-BMP value		
		YW #1	YW #2	CD
CH_COV	0~1	0.735	0.800	0.766
CH_EROD	-0.05~0.6	0.045	0.025	0.035
CH_N(2)	-0.01~0.3	0.02	0.02	0.02
CH_N(1)	0.01~0.3	0.02	0.02	0.02
CH_K(1)	-0.01~150	0.5	0.5	0.5
CN2	±20 %	9	2	9
P-factor	0~1	0.8	0.8	1.0

### III. 결과 및 고찰

#### 1. SWAT모형의 준비

대상유역의 6년 (1998~2003)동안 유출 및 수질에 대한 보정 및 검증결과는 Park et al. (2009)의 논문에서 자세히 찾아 볼 수 있으며, 여기서의 매개변수들을 사용하였다. YW #1 (1번, 4번, 6번, 7번 소유역), YW #2 (2번, 3번, 5번 소유역), CD (8 번, 9번, 10번, 11번, 12번, 13번, 14번, 15번, 16번 17번 소유역) 지점에 대한 일유출량 검증결과는 Nash and Sutcliffe (1970) 모형효율 (ME)이 0.71, 0.61, 0.80이었다. 수질 검증결과로는 PR #3, DR 지점에 대한 SS, TN, TP 부하량의 ME는 각각 0.72, 0.54, 0.70 그리고 0.75, 0.85, 0.70이었다. 한편, 본 연구에서 수질의 검증은 월 1회 수질자료를 이용하였으나, 보다 많은 수질자료를 이용한 정확도 향상이 필요한 것으로 판

단된다. Table 3은 BMP 시나리오에서 사용되는 매개변수 값들을 나타낸 것이며, BMP 적용시 해당유역의 값들을 각각 적용하도록 하였다.

### 2. 매개변수 민감도분석 결과

Table 4는 7개 BMP 매개변수들을 대상으로, Sediment, T-N, T-P에 대하여 식 (1)의 SI를 분석한 결과를 정리한 것이다. 전체적으로 P-factor가 가장 민감하였으며, CH\_N(2), CH\_COV, CH\_K(1)순으로 민감하였다. 수질 항목별 민감도는 Sediment에 대하여 P-factor가 가장 많은 영향을 끼치는 것으로 나타났고 다음으로 CH\_N(2), CH\_N(1), CH\_COV, CH\_K(1)가 민감하였다. 다음으로 TP는 CH\_N(2)과 CH\_COV가 민감하였고, TN은 CH\_COV가 민감한 것으로 나타났다. CH\_EROD는 TN, TP에 대해서 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났고, Sediment에 대한 영향도 적은 것으로 나타났다. 이러한 민감도 지수 결정을 통하여 BMP 시나리오의 결과에 영향을 미치는 매개변수의 민감도 정도를 정량적으로 파악할 수 있다.

### 3. BMP시나리오 적용에 따른 비점오염원 저감 효과 모의

Table 5는 5가지 BMP 시나리오의 적용범위 (Table 2의

**Table 4 Sensitivity of BMP parameters to model output**

Parameter	Sensitivity Index (SI)		
	Sediment	TP	TN
CH_COV	-0.598	-0.510	-0.548
CH_EROD	0.120	0.000	0.000
CH_N(2)	-0.888	-0.830	-0.116
CH_N(1)	-0.643	-0.358	-0.025
CH_K(1)	-0.551	-0.371	-0.116
CN2	-0.105	-0.169	-0.029
P-factor	15.302	2.627	0.287

selection criteria)에 따라 각 시나리오를 해당 하천 또는 지역에 한정하여 적용한 결과를 적용된 소유역들을 대상으로 그 저감효과를 평균하여 정리한 것이다. Streambank Stabilization은 하천차수가 3 이상인 소유역들만을 대상으로, Porous Gully Plugs와 Recharge Structure는 하천차수가 2 이하인 소유역들을 대상으로, Terrace와 Contour farming은 발지역만을 대상으로 적용한 결과이다. 전체적으로 주하천에 적용한 Streambank Stabilization의 효과가 가장 크게 나타났고, 다음으로는 Porous Gully Plugs가 Sediment, Terrace가 TP, Terrace와 Contour farming이 TN을 크게 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 전체적으로 비점오염원을 줄이기 위해서는 주 하천길이의 20 %에 해당하는 하천에 Streambank Stabilization을 적용하고, 호소의 부영양화 인자인 TP를 더욱 줄이기 위해서는 유역전체면적의 0.8 %에 해당하는 지역에 Terrace와 Contour farming을 적용하는 것이 효과적인 것으로 생각된다.

한편, 충주댐 유역을 대상으로 각 시나리오를 모두 적용한 경우와 Table 5의 결과를 비교하여 그 효과를 평가하였다. Fig. 4는 각 BMP 시나리오의 적용결과와 5개 시나리오에 포함된 매개변수를 모두 적용한 All Scenario를 적용하여 얻은 저감율을 정리한 것이다. 그리고 이 결과를 가지고 충주댐 유역 출구지점 (Fig 1의 Outlet/CD)을 대상으로한 저감효율과 (bar), 저감효율의 최대 및 최소값의 범위로 나타내었다. Sediment, TN, TP 모두 다른 시나리오에 비하여 Streambank Stabilization의 저감 효과가 크게 나타났고, 최대와 최소값의 범위도 가장 작게 나타나 가장 안정적인 저감효과를 볼 수 있는 시나리오로 나타났다. Porous Gully Plugs, Recharge Structure, Terrace, Contour Farming, 그리고 All Scenario의 경우는 저감효과의 최소값이 음수로 나타나 BMP 시나리오 적용이 오히려 비점오염원물질을 증가시키기도 하므로, Table 5의 결과에서 논한 것과 같이, Streambank Stabilization이나 영양물질에서 비점오염물질 증가가 나타나지 않는 Terrace Contour Farming을 적용하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

수질 항목별 저감효과를 살펴보면, Sediment가 Streambank

**Table 5 The 6 years average NPS reduction effect (%) by each scenario based on the applied subwatersheds**

BMP scenario	Sediment	TP	TN	The stream length or area of BMP implementation (% of the total)	Application area or stream order
Streambank Stabilization	54.5	42.8	7.3	104.0 km* (20.0)	over 3
Porous Gully Plugs	48.6	46.5	14.8	740.8 km** (85.0)	1 or 2
Recharge Structure	42.5	46.3	15.2	682.7 km** (78.3)	1 or 2
Terrace	48.0	48.9	9.3	53.7 km <sup>2</sup> (0.8)	upland crop
Contour Farming	46.7	48.2	9.3	53.7 km <sup>2</sup> (0.8)	upland crop

\* Length of the main channel considered

\*\* Length of the tributary channel considered

Stabilization에서 59.8 %, TP가 Terrace에서 40.3 %, TN가 Contour Farming에서 12.1 %로 각각 가장 큰 저감효과를 보였다. Porous Gully Plugs와 Recharge Structure에서 Sediment의 저감효과가 적게 나타난 이유는 CH\_N(1), CH\_K(1)의 SI 값은 상대적으로 크게 산정되었지만 적용한 각 매개변수의 값이 범위안에서 작게 변화하였다. 그러므로 Streambank Stabilization보다 Sediment의 저감효율이 현저하게 작은 것으로 나타났다. 또한 Terrace와 Contour Farming에서는 Sediment에 대한 민감도지수가 가장 큰 P-factor를 조절하였다. 하지만 CN2가 민감하지 않은 것으로 나타났고, 시나리오 적용시 전체면적의 0.8 %에 해당하는 경작지에만 적용하여 Sediment의 저감효과가 작게 나타난 것으로 판단된다. 그리고 작성한 5개 시나리오를 적용할 때 Table 2의 selection criteria에 따라서 적용하였기 때문에, Sediment에 직접적으로 영향을 주는 Streambank Stabilization을 제외한 4개의 시나리오는 소유역 기준으로는 저감효과가 있으나, 주하천을 따라 최종 유역 출구에 도달하면서 각 저감효과는 크게 감소하였으며, TP, TN은 5개의 시나리오에서 어느 정도의 저감효과를 유지하는 것으로 나타났다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구는 충주댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 17개 소유역으로 구분하여 총 5가지 최적관리기법의 적용에 따른 비점오염원물질의 제거효율을 비교분석하였다. 적용한 BMP 시나리오는 Streambank Stabilization, Porous Gully Plugs, Recharge Structure, Terrace, Contour Farming, 그리고 이들 시나리오를 모두 적용한 All Scenario이다. 매개변수 민감도 분석 결과, 경작요소 관련 매개변수 P-factor가 모든 수질항목에 가장 민감한 것으로 나타났고, 다음으로 하천 피복, 주하천의 Manning 조도계수 그리고 투수계수 관련 매개변수 순으로 나타났다. 6가지 시나리오의 적용결과를 소유역 전체평균 및 소유역 범위, 유역출구를 기준으로 정리하였다.

저감효과를 살펴보면 전체적으로 Streambank Stabilization, Terrace, Contour Farming이 효과적인 것으로 나타났다. 적용 소유역 기준으로 결과를 살펴보면, 주하천에 적용한 Streambank Stabilization의 효과가 전체적으로 높았고, Porous Gully Plugs가 Sediment, Terrace가 TP, Terrace와 Contour farming이 TN을 저감시키는데 효과적이었다. 소유역 전체평균 및 유역 출구를 기준으로 평가한 결과, Streambank Stabilization, Terrace 그리고 Contour Farming의 적절성을 확인할 수 있었으며, 충주댐 유역의 전체 출구를 기준으로 보면, Streambank Stabilization이 59.8 % SS를, Terrace가 40.3 % TP를, Contour Farming이 12.1 % TN을 저감시킬 수 있었다.

SWAT은 GIS (Geographic information system)를 기반으로 한 모델로 비점오염원 발생량이 많은 취약지역을 선별할 수 있었고, 취약지역에 BMP를 적용하여 모의한 결과 비점오염원 저감효과가 다양한 형태로 나타났다. 본 연구에서 BMP 적용에 대한 경제성 측면은 고려하지 되지 않았다. BMP 시행으로 발생되는 손해비용 및 투자비용에 대한 보상이 이루어지지 않는다면 높은 저감효과를 가지는 BMP라 할지라도 시행되기 힘들 것이다. 따라서, 향후 유역의 비점오염원 저감을 위하여 국내 상황에 맞는 최적의 BMP 시나리오, 그에 따른 매개변수를 선정해야 할 것이다. 또한 BMP 시나리오 적용시 다각적인 경제성 분석과 실현가능성을 고려하여 시행하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

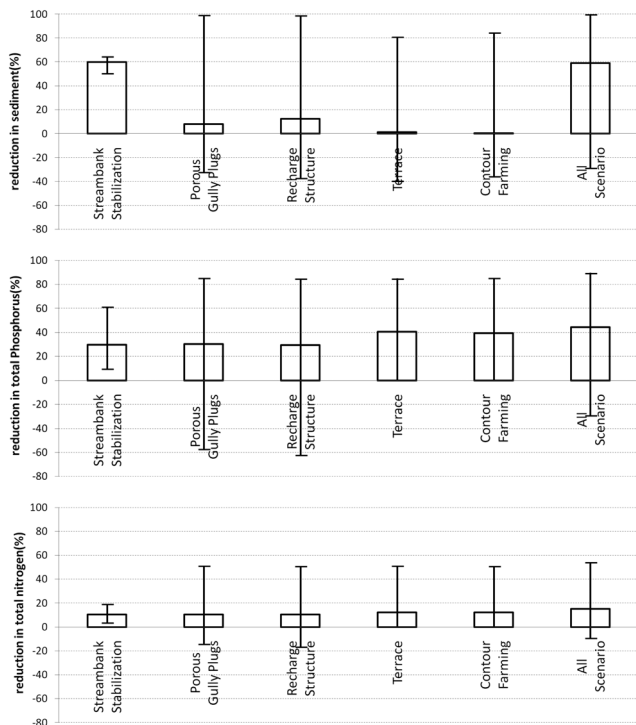


Fig. 4 The 6 years (1998~2003) watershed outlet (bars) and range (minimum and maximum represented by the line through the bars) of % reduction in (a) Sediment, (b) TP, and (c) TN for six BMP scenarios

이 논문은 2009년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009-0080745).

## REFERENCES

1. Bae, D. H., and S. R. Ha, 2011. Assessing impact of reduction of non-point source pollution by BASINS/HSPF. *Environmental Impact Assessment* 20(1): 71-78.
2. Bae, D. H., and B. J. Lee, 2003. Runoff curve number estimation for cover and treatment classification of satellite image(I): - CN estimation -. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(6): 985-997.
3. Cullen, A. C., and H. C. Frey, 1999. Probabilistic techniques in exposure assessment. Plenum, New York.
4. Choi, J. Y., and C. M. Sin, 2002. Management of nonpoint pollution by reducing storm runoff, 163-166. KEI-RE-03. Seoul: Korea Environment Institute.
5. Chow, V. T., 1959. Open-channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, New York, 112.
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. *Korean Society of Civil Engineers* 26(5B): 481-488 (in Korean).
7. Kim, C. G., and N. W. Kim, 2008. Characteristics of pollutant loads according to types of sources for the chungju dam watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(4): 465-472 (in Korean).
8. Kim, C. G., J. E. Lee, and N. W. Kim, 2007. Temporal and spatial characteristics of sediment yields from the Chungju dam upstream watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(11): 887-898.
9. Lane, L. J., 1983. Chapter 19: transmission losses. In: Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. U. S. Government Printing Office, Washington, DC, pp. 19-1-19-21.
10. Lee, Y. J., 2008. Assessment of future climate and land use change impact on hydrology and stream water quality of Anseongcheon watershed using SWAT model (I). *Korean Society of Civil Engineers* 28(6B): 653-663 (in Korean).
11. 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. ASABE publication #701P207, 10-14 March 2007.
12. 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.
13. Park, J. Y., M. J. Park, S. R. Ahn and S. J. Kim, 2009. Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of chungju dam watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(10): 877-889.
14. Song, M. Y., 2008. A study on the policy of nonpoint source controls in New Jersey, USA, 3-7. GRI. Gyeonggi: Gyeonggi Research Institute.
15. Soil Conservation Service Engineering Division. 1986. Urban hydrology for small watersheds. U. S. Department of Agriculture, Technical Release 55. USDA, Washington, DC
16. Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. Papendick, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal* 50(4): 1031-1036.
17. Srinivasan, R., 2008. Bosque river environmental infrastructure improvement plan: Phase I final report, 10-13. TR-312. Texas Water Resources Institute. Texas A & M University, College station.
18. Tuppad, P., N. Kannan, R. Srinivasan, C. G. Rossi, and J. G. Arnold, 2010. Simulation of agricultural management alternatives for watershed protection, *Water Resources Management* 24(12): 3115-3144.
19. Wetzel, R. G., and G. E. Likens, 1991. Limnological Analyses. 2nd Edition. Springer-Verlag, New York.