

소양강댐 유역의 오염부하량 산정을 위한 BASINS/WinHSPF 적용

윤춘경* · 한정윤 · 정광욱 · 장재호

(건국대학교 환경과학과)

Application of BASINS/WinHSPF for Pollutant Loading Estimation in Soyang Dam Watershed.
Yoon, Chun-Gyeong*, Jung-Yoon Han, Kwang-Wook Jung and Jae-Ho Jang (Department of
Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

In this study, the Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources (BASINS 3.0)/Window interface to Hydrological Simulation Program-FPTRAN (WinHSPF) was applied for assessment of Soyang Dam watershed. WinHSPF calibration was performed using monitoring data from 2000 to 2004 to simulate stream flow. Water quality (water temperature, DO, BOD, nitrate, total organic nitrogen, total nitrogen, total organic phosphorus and total phosphorus) was calibrated. Calibration results for dry-days and wet-days simulation were reasonably matched with observed data in stream flow, temperature, DO, BOD and nutrient simulation. Some deviation in the model results were caused by the lack of measured watershed data, hydraulic structure data and meteorological data. It was found that most of pollutant loading was contributed by nonpoint source pollution showing about 98.6%~99.0%. The WinHSPF BMPRAC was applied to evaluate the water quality improvement. These scenarios included constructed wetland for controlling nonpoint source pollution and wet detention pond. The results illustrated that reasonably reduced pollutant loadin. Overall, BASINS/WinHSPF was found to be applicable and can be a powerful tool in pollutant loading and BMP efficiency estimation from the watershed.

Key words : BASINS/WinHSPF, Soyang Dam watershed, Nonpoint source pollutant, BMPRAC

서 론

최근 우리나라는 높은 인구밀도, 고도의 산업화, 급격한 도시화 등으로 인하여 수자원의 사용량이 급증하고 있으며, 수질오염의 증가는 효과적인 수자원관리의 어려움을 더욱 가중시키고 있다. 유역 내에서 효과적인 수질관리를 위해서는 유역 및 하천의 지형학적 특성과 수리·수문학적 특성에 대한 파악이 필요하며, 수체에 유입되는 오염원이 하천의 수질에 미치는 영향을 정확하게 평가·예측

하는 것이 필요하다. 또한 효과적인 유역관리를 위해서는 유역의 오염부하량을 정확히 산정하고, 그에 따른 오염저감대책 수립과 목표수질달성 평가를 위한 수질모델의 적절한 선택과 적용이 중요하다.

유역 내로 유입되는 오염물질은 배출되는 형태에 따라서 점오염원(point source)과 비점오염원(nonpoint source)으로 구분할 수 있다. 점오염원은 발생원과 그 흐름경로가 비교적 명확하기 때문에 상대적으로 오염부하량의 산정이 용이하다. 반면에 비점오염원은 강우강도나 지속기간과 같은 강우의 특성과 지표수의 수리·수문학적 특

* Corresponding author: Tel: (02) 450-3747, Fax: (02) 446-2543, E-mail: chunyoong@konkuk.ac.kr

성과 연계되어 있으므로 이를 파악하기 위해서는 많은 어려움이 있다(환경부, 2002a). 특히 강우 시 지표면유출에 의해 발생하는 비점오염원은 토지이용상태에 영향을 받으며, 다양한 오염물질을 포함하고 있으므로 보다 효과적인 유역관리를 위해서는 비점오염원 제어에 대한 관리와 대책이 반드시 필요하다.

현재 우리나라 4대강의 비점오염원에 의한 오염부하량은 개략적으로 22~40% 정도를 차지하고 있다. 특히 수도권 주요 상수원인 팔당 상수원의 오염물질은 44.5%가 비점오염원에서 배출되고 있는 것으로 조사되었으며, 2020년에는 54.3%까지 증가할 것으로 예측하고 있다. 따라서 환경부와 관계기관 합동으로 2004년 6월 4대강 물관리종합대책 강화 및 물관리 목표 달성에 기여하기 위한 4대강 비점오염관리 종합대책을 수립하고 현재 추진 중에 있다(관계부처합동, 2004).

비점오염원의 유출은 장기적인 조사를 바탕으로 정량화하여야 하지만 비용과 시간이 많이 소요되므로 유역유출모델을 이용하여 추정하기도 한다. 대표적인 비점오염 유출 모델로는 도시유역에 많이 적용되는 STORM (Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model)과 SWMM (Storm Water Management Model), 농촌유역에 많이 적용되는 AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)와 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 등이 있으며, 혼재된 유역에서 사용할 수 있는 WinHSPF (Windows Interface to Hydrological Simulation Program-Fortran) 모델 등이 있다(Knisel *et al.*, 1980; Beasley *et al.*, 1981; USEPA, 2001b). WinHSPF는 Fortran 기반인 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)를 사용자가 모델을 적용하거나 관리하는데 있어 편리하도록 windows 기반으로 발전시킨 것이다. 따라서 WinHSPF는 사용자가 모델을 적용함에 있어 대상유역을 모의하고, 자료를 수정하는 것이 windows상에서 보다 손쉽게 이루어질 수 있다(USEPA, 1997). 최근 GIS (Geological Information System)를 기반으로 하여 유역이라는 공간적인 특성과 유역내의 여러 가지 정보를 연결시켜주는 프로그램들이 많이 사용된다. 이는 오염총량제의 적용에 있어 방대한 유역 내에서 점오염원과 비점오염원을 통합하고, 쉽게 접근할 수 있는 프로그램이 필요하게 되었기 때문이다. 대표적인 프로그램으로 BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)는 다양한 tool을 가지고 있으며, 유역 및 하천모델을 지원하고 있다. 특히 WinHSPF 모의를 위한 유역분할, 토지 이용분류 등의 초기 값을 손쉽게 생성시켜 줌으로써 모델의 적용이 더욱 용이하도록 도와준다. WinHSPF는 강

우로 인한 비점오염물질의 유출과정을 하천 내에서의 수리학적 현상, 퇴적물, 화학물질의 상호작용과 결합시켜 모의할 수 있는 유역모델과 수질모델이 결합된 형태를 취하고 있어 유역유출모델로서 많이 이용되어지고 있다(Bicknell *et al.*, 1993). Jeon (2006)은 새만금 유역의 유출량 산정 및 수질 모의를 위해, 우리나라의 토지이용 특성에 적합한 논을 모의할 수 있도록 수정된 HSPF-Paddy를 개발하여 적용하였으며, Gallagher and Doherty (2005)는 HSPF 모델을 이용하여 미국 North Carolina의 Neuse River 유역의 유출량을 산정하였고 모델의 유출 인자들에 대한 신뢰구간 산정 및 MCMC (Markov Chain Monte Carlo)를 통해 모델의 불확실성을 평가하였다. 임 등 (2003)은 HSPF와 SWAT 모델을 이용하여 Virginia의 Polecat Creek 유역의 유출량과 유사량을 모의하여 비교하였다. 두 모델의 적용결과 HSPF 모델이 실측치의 유출량 및 유사량에 더 근접한 것으로 나타났으나, 입력 자료의 구축 및 모델의 적용에 있어서 SWAT 모델에 비해 많은 시간과 노력이 필요하다고 보고하였다. Johnson *et al.* (2003)은 HSPF와 SMR (Soil Moisture Routing)을 동일한 유역에 적용하여 모델간의 서로 다른 유출메커니즘을 비교한바 있다.

본 연구에서는 북한강 상류 유역인 소양강댐 유역에 WinHSPF 모델을 적용하여 유출량과 수질을 모의하여 오염부하량을 산정하였고, WinHSPF의 BMPRAC (Best Management Practice Evaluation)를 적용하여 오염기여도가 높은 주요 소유역에 비점오염원 저감 시설의 수질 개선 효과를 검토하였다. 이러한 과정을 통하여 수질오염 총량관리를 위한 점원오염과 비점원오염의 합리적인 부하량 산정방법으로 유역모형을 적용하고, 이를 검증하는 방안을 검토하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 북한강 상류 유역인 소양강댐 유역으로, 소양강댐은 저수용량이 29억 ton, 만수면적은 70 km²이다(박, 2005). 소양강댐 유역의 유역면적은 약 2,703 km²이며, 유역둘레 383.6 km, 유역 평균 폭 16.5 km, 유역 평균표고 650.5 m, 그리고 유역 평균 경사는 40.6%로써 우리나라 북동부 산악지역에 위치해있다. 토지이용의 대부분은 산림으로 면적이 2,478.5 km²로 총 유역면적의 약 90%를 점유하고 있다(Fig. 1). 본 대상유역은 인구가 적고 산업 활동이 거의 없으므로 점오염원

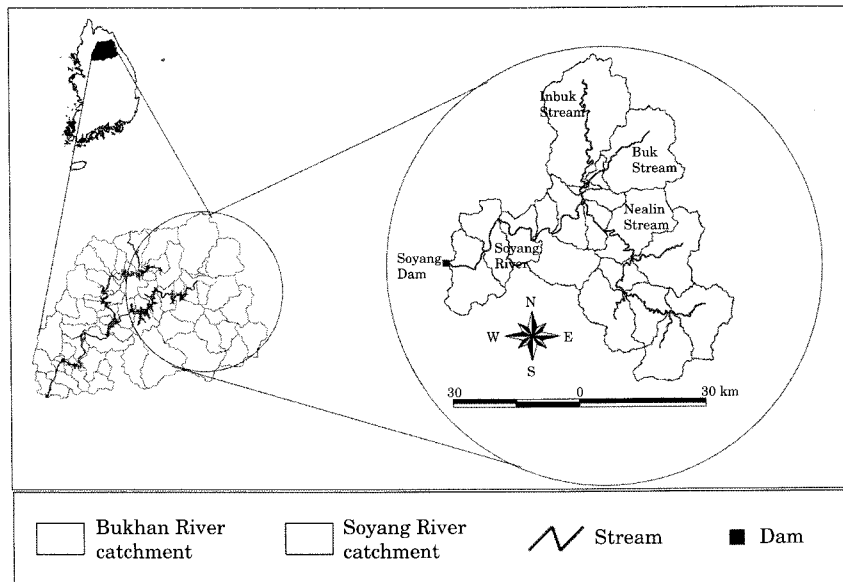


Fig. 1. Location of study area.

의 기여도는 작으며 소규모 점오염원이 비점오염원의 성격을 띠고 산재하고 있다.

2. BASINS 적용

BASINS는 유역오염관리를 위한 다목적 환경 분석 시스템으로 USEPA에서 개발하였다(USEPA, 2001a). 기존의 유역관리에서는 자료의 전처리, 정보의 요약, 지도와 표 생성, 그리고 모델적용 등과 같은 일련의 과정이 각각 분리되어 여러 가지 tool과 software 등을 이용하기 때문에 정보를 통합하는데 어려움이 있으며 많은 시간과 노력을 필요로 하였다. BASINS는 사용자에게 친숙한 window interface를 기반으로 하기 때문에, 환경적인 정보를 손쉽게 검색할 수 있으며, 분석을 위한 여러 가지 tool을 제공한다. 또한 다양한 유역모델과 수질모델을 시스템 내에서 실행할 수 있으므로, 유역 분석시간을 줄일 수 있으며 다양한 정보를 효율적으로 손쉽게 획득 할 수 있다는 장점을 가진다.

BASINS 구축은 북한강 유역에 대해서 적용하였으며, 이를 위해서는 대상 유역의 경계와 수치고도모델(DEM), 토지이용도, 토양자료, 하천특성자료, 수질측정자료, 기상자료, 그리고 점오염원자료 등의 방대한 입력 자료가 필요하다. 본 연구에서 모델의 구축에 사용한 입력 자료의 출처는 Table 1에 제시하였다.

BASINS Utility tool을 이용하여 북한강 유역의 GIS 자료 및 시계열자료를 구축하였으며, WinHSPF 모델적용

Table 1. Model input data for WinHSPF.

Data	Data source
Cataloging unit boundary	Korean Water Resources Corporation
Reach file, V1	Korean Water Resources Corporation
Digital elevation model (DEM)	Ministry of Environment
Land-use	Ministry of Environment
Point source data (2003)	Ministry of Environment
Weather data (1990~2004)	Korean Meteorological Administration
Water quantity data (2000~2004)	Han River Flood Control Office
Water quality data (1990~2004)	Ministry of Environment

을 위해 BASINS Delineation tool을 이용하여 대상지역의 소유역 분할과 토지이용분류를 실시하였다(Fig. 2). 소유역 분할은 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하였는데, DEM은 대상지역을 격자로 나누고, 격자의 평균 고도 값과 각 격자간의 위상(topology)관계를 포함하고 있어서 대상지역의 지형을 표현할 수 있는 중요한 자료이다. 토지이용은 국토지리정보원에서 제시하는 기준에 따라 농업지역, 논, 시가화건조지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지 그리고 수역 등 8가지로 분류하였다. 농업지역의 경우는, 밭, 하우스재배지, 과수원, 기타재배지의 5개의 중분류로 분류되는데 이중 논은 다른 농업지역과는 달리 일정

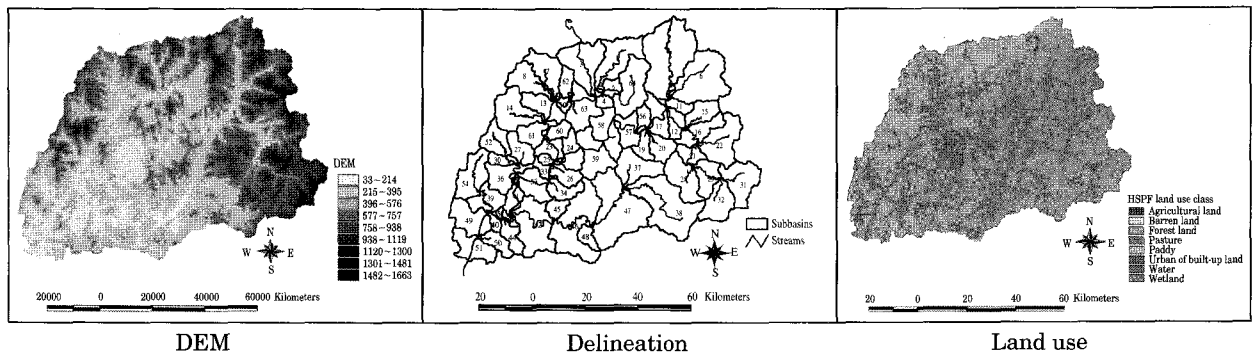


Fig. 2. Application of BASINS delineation and utility tools.

Table 2. Land use distribution in Soyang Dam watershed.

Landuse	Area (km ²)	Area (%)
Urban or built-up land	22.0	0.9
Agricultural land	73.7	2.9
Paddy	51.4	2.1
Forest land	2268.6	90.7
Pasture	2.5	0.1
Wetland	10.2	0.4
Barren land	14.6	0.6
Water	57.0	2.3
Total	2500.0	100.00

시간 담수상태를 유지하는 특징을 가지고 있으므로 모형의 보정과정에서 매개변수에 이를 반영하기 위하여 별도 분리하였다. 국토지리정보원에서 제공받아 BASINS에서 구축한 소양강댐 유역의 토지이용분포는 Table 2와 같이 나타내었다. 소양강댐 유역은 유역면적의 약 90%가 산림으로 대부분을 차지하고 있으며, 다음으로는 농업지역인 논과 밭의 분포가 많은 것으로 나타났다. 북한강 유역의 delineation 결과 총 61개의 소유역으로 분할되었으며, 이 중 소양강댐 유역은 17개 소유역이 포함되는 것으로 나타났다. 소유역 분할 후 토지이용도를 중첩하여, 각 소유역 별로 토지이용에 따라 분류한 후 유역모형인 WinHSPF를 북한강 상류의 소양강댐 유역에 적용하였다.

3. WinHSPF 적용

WinHSPF모형은 복합적인 토지이용 형태를 갖는 유역에서 연속강우에 의해 발생하는 유출량과 수질 예측을 위해 USEPA와 USGS가 개발한 준분포형 모델이다. WinHSPF모형은 투수지형(pervious land)에서 수리 및 수질을 모의하는 PERLND와 불투수지형(impervious land)에서 수리 및 수질을 모의하는 IMPLND, 수체내의

수리 및 수질을 모의하는 RCHRES로 나누어져 있으며, 각 모듈에는 물의 흐름에 관계된 부분과 토사유출, 영양염류 등 수질과 관계되는 부분으로 구성되어있다(Donigian and Crawford, 1976; Donigian *et al.*, 1984; Bicknell *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 1998a, b).

WinHSPF 적용을 위해서 BASINS로부터 추출된 소유역, 하천, 토지이용 자료를 이용하였으며, 기상자료, 오염원 자료 및 수질측정자료 등의 시계열 자료를 입력하였다.

소양강댐 유역의 기상자료는 Thiessen법에 따라 분할하여, 인제와 춘천 기상관측소의 1990년부터 2004년까지 자료를 WDMUtil을 이용하여 WDM (Watershed Data Management)파일형태로 변환시켜 입력하였다. 오염원은 2003년 전국 오염원 기초자료를 이용하여 점오염부하량을 산정하였는데 환경기초시설자료를 행정구역코드와 법정동, 법정리로 구분하여 각 소유역에 해당하는 시설을 분류하였고, 각각의 처리시설에서 방류유량과 방류수질을 이용하여 최종적으로 각 소유역에 유입되는 점오염부하량을 산정하였다. 본 연구에서는 2000년부터 2004년의 유출량과 수질자료를 사용하였고, 오염원은 2003년의 자료를 이용하여 유출량과 수질자료의 측정기간과 오염원의 기간이 상이하나, 대상 유역은 북한강유역의 상류에 위치한 비도시유역이기 때문에, 2000년부터 2004년 동안의 오염원 변화가 없는 것으로 가정하여 모형을 적용하였다.

유출량에 대한 매개변수 산정과 WinHSPF모형의 효율을 평가하기 위해 식(1)과 (2)처럼 R² (Nash and Sutcliffe, 1970)와 차이 퍼센트(% Diff) (ASCE, 1993)를 산정하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2} \quad (1)$$

$$\%Diff = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, P_i는 예측 값, O_i는 실측값, n은 데이터 수, 그

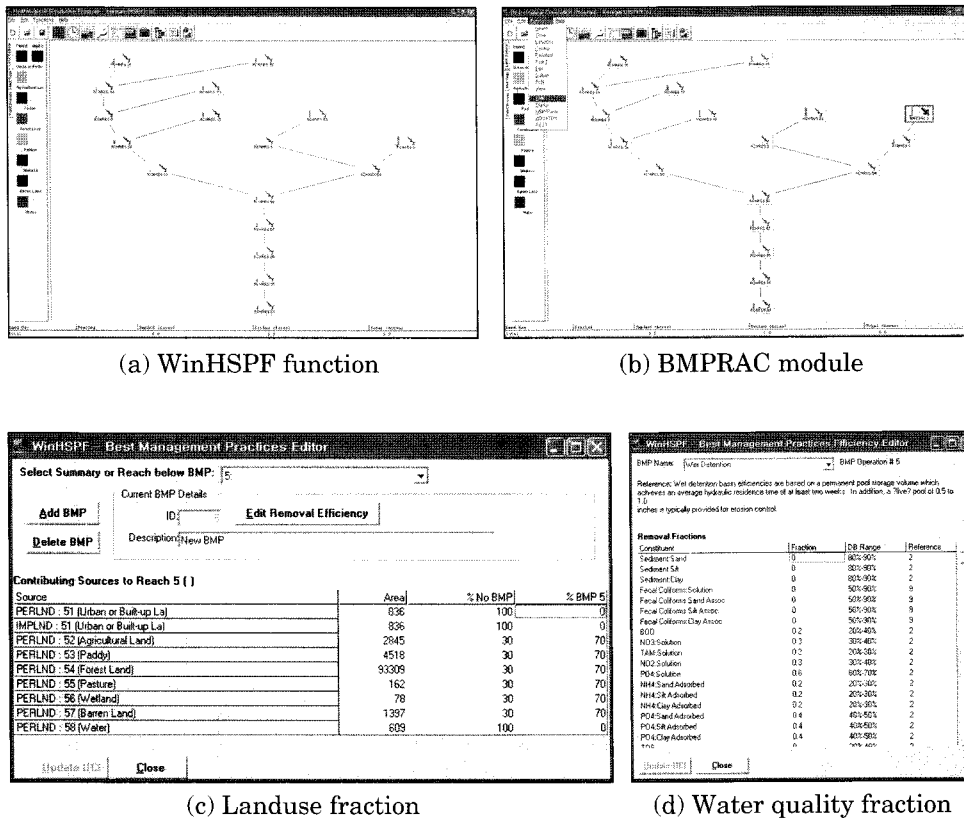


Fig. 3. Application of WinHSPF best management practices editor.

리고 \bar{P}_i 는 예측 값의 평균이다.

4. WinHSPF를 이용한 Bmprac 적용

연구대상지역인 소양강댐 유역은 비점오염에 의한 부하량이 많은 부분을 차지하고 있으므로 소양강댐 유역의 효과적인 관리를 위해서는 산림, 농경지, 시가지 등 넓은 지역에서 발생하는 비점오염물질을 처리하는 구체적인 실질적인 비점오염원 관리대책이 필요하다.

현재 한강 수역에서는 8종 27개 (장치형 12개, 저류지 등 시설형 15개)의 비점오염원 삭감시설이 시범 설치되어 운영 중에 있다(환경부, 2005). 북한 유역은 강원도 인제군과 양구군이 포함된 지역으로 소양강댐 유역 중 소 유역면적대비 오염부하량이 비교적 높은 지역이다. 따라서 본 연구에서는 유역관리를 위한 비점오염원 저감시설을 소양강댐 상류 유역인 북한 유역에 설치하였을 경우 오염부하량의 감소를 평가하였다.

1) Bmprac (Best Management Practice Evaluation)

Bmprac는 WinHSPF 모델링 과정에서 모듈을 추가

함으로서 간단한 제거율을 입력하여 최적관리기법(Best Management Practice)방안에 따른 제거효과를 모의하는 것이다. WinHSPF 모듈에서 Bmprac를 추가하여 저류지, 침투지, 인공습지, 여과시설 등 오염물질 저감시설을 설치하였을 경우 각 시설에 따라 제거되는 비율(FRAC)을 지정해 줄 수 있다. 각 소유역의 RCHRES 뿐만 아니라 PERLND와 IMPLND에서 저감시설을 통한 오염물질 제거효과를 모의 할 수 있기 때문에 유역 내에서의 복잡한 토지이용 및 오염부하 형태를 고려하여 비점오염물질의 저감을 평가할 수 있다. 그러나 저감시설을 통한 오염물질의 저류와 제거 효과에 있어서 단순한 형태로만 되어 있기 때문에 복잡한 제거기작은 포함되지 않은 단점이 있다.

Bmprac 모듈에서의 오염물질 제거 기작은 다음과 같다.

$$REMOVE=FRAC \times INPUT \tag{3}$$

$$OUTPUT=INPUT - REMOVE \tag{4}$$

여기서, REMOVE=mass removed
FRAC=fraction to remove

INPUT=inflow mass

OUTPUT=outflow mass

BMPRAC 모의과정에서 제거율은 각각의 처리시설에 따라 토지이용별, 수질항목별로 입력하여 모의 할 수 있으며, windows 상에서 표로 간단히 입력하기 때문에 사용자가 유역관리를 실행하고 그 효과를 예측하는데 있어서 편리한 방식으로 되어있다.

WinHSPF Functions에서 BMP를 추가하게 되면 Fig. 3과 같이 해당 소유역에 BMPRAC가 생성된다. 이렇게 생성된 BMPRAC는 소유역의 토지이용별로 각 면적에 따라 적용 비율을 정할 수 있다. 그리고 인공습지, 저류지, 침투지, 모래 및 자갈여과 필터 등 31개 저감시설을 적절히 선택하여 각 시설에 따라 해당되는 제거율(FRAC)을 각 수질항목별로 입력하여 저감시설의 효과를 모의할 수 있다. 본 연구에서는 인북천 유역에 비점오염원 저감시설인 인공습지(constructed wetland)와 저류지(wet detention)를 설치하였을 경우 각 시설을 통한 부하량의 감소를 예측하였다.

2) Scenario 1

인북천 유역에 인공습지를 조성하였을 때 오염부하량의 감소효과를 알아보기 위하여 BMPRAC를 적용하였다. 인공습지는 하수 및 오염된 지표수를 처리하는데 많이 사용되는 기법으로, 설치 및 유지관리비용이 적고, 수질개선 뿐만 아니라 생태계 복원 등의 부가적인 효과가 있어 국·내외에서 비점오염제어 시설로 많이 적용되어지고 있다. 현재 우리나라에서는 4대강 물관리 종합대책의 일환으로 상수원 댐의 주요 유입하천에 인공습지를 조성, 운영하고 있다. 현재 주암호의 유입하천인 북내천에는 2002년 12월에 인공습지가 조성되어 운영 중에 있는데, 북내하수처리장의 방류수처리와 주변지역에서 유입되는 비점오염원을 처리하고 있다. 2001년 12월에 조성되어 현재까지 운영되어지고 있는 석문 인공습지는 면적 0.8 ha에 약 $1000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 까지 처리 될 수 있으며, 2002년 6월부터 2004년 6월까지 2년 동안 생장기(3~11월)와 동절기(12~2월)로 나누어 인공습지의 수질정화 효과를 검토한 결과 처리효율은 BOD는 22%, TN은 33~54%, TP는 53%라고 보고하였다(함 등, 2005; 농업기반공사, 2005). 따라서 연구결과들을 토대로 하여, 인북천 유역에 1 ha당 최대 처리용량이 약 $1,500 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 인 인공습지(scenario 1-1)와 1 ha당 최대 처리용량이 $1,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 인 인공습지(scenario 1-2)를 100 ha에 조성하였다고 가정하고 BMPRAC를 이용하여 인북천의 수질을 모의하였다. Scenario 1-1의 인공습지는 인북천 유역의 총 유출량

대비 습지 처리용량 비율이 평균 10.2%였으며, Scenario 1-2는 평균 7.0%로 계산되었다. 여기서 인북천 유역의 총 유출량은 한강홍수통제소의 2000년부터 2004년까지 유출량 자료를 사용하였으며 처리율은 위에서 제시한 참고문헌의 값을 사용하였다. 이 값을 각각 BMPRAC의 토지이용별 BMP적용률에 넣어 감소된 부하량을 평가하였다.

3) Scenario 2

인북천 유역에 저류지를 조성하였을 때 BMPRAC를 적용하여 오염부하량의 감소를 추정하였다. 저류지는 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 작용을 통해 용존성 영양 물질을 제거한다. 유역 내 설치된 저류지는 하류에 위치한 저수지 및 호소의 부영양화를 감소하는데 도움이 될 수 있으며, 강 하구로 유입되는 영양물질의 부하를 감소 시키는데 도움이 된다(한국환경정책·평가연구원, 2002). 적절히 설계된 저류지는 TSS 70~80%, BOD 20~40%, TN 20~30%, TP 20~50%의 제거효율을 나타낸다고 보고하였다(USEPA, 1983). 특히 저류지는 강우 시 유출량과 수질을 효율적으로 개선하기위해 많이 사용되어지고 있다(Wu *et al.*, 1996; Mallin *et al.*, 2000). Wu *et al.* (1996)은 유역 내 저류시설을 설치할 경우 저류지의 면적이 총 유역 면적의 1~2%인 경우 저류시설에 의한 저감효과로 목표 수질을 달성할 수 있다고 하였다. 따라서 인북천 유역 총 면적인 420 ha의 1%에 해당하는 면적인 4.2 ha의 저류지를 설치한다고 가정하여 인북천의 오염 부하량 삭감을 계산하였다.

결과 및 고찰

1. 모형의 보정 및 검증

WinHSPF 모형의 보정 및 검증은 환경부에서 제공받은 수질측정망 자료 중 소양강댐 유역의 유량자료와 수질자료를 이용하여 수행하였다. 소양강댐 유역내의 유량 측정지점은 인북천, 북천 그리고 내린천 지점으로서 2000년 1월부터 2004년 12월까지 일단위로 측정된 수문조사 연보의 수위자료를 각 지점의 수위-유량곡선 관계식을 이용하여 유량을 산정하였다. 유출량의 보정에는 INFILT, LZSN, AGWRC, INTFW, IRC 등이 중요한 매개변수로 작용하였으며, 매개변수 보정결과는 Table 3에 제시하였다. 논의 경우 중부지방의 평균 영농기간인 6월부터 10월까지 논의 토지이용의 상부 물 저류능(UZS)의 초기 값에 일반적인 논의 물고 높이를 더한 값을 지정하여 강

Table 3. Parameter values for hydrologic simulation.

Parameter	Definition	Units	Model range	Calibration
LZSN	Lower zone nominal storage	in	0.01~100.0	4
INFILT	Index to infiltration capacity	in/hr	0.0001~100.0	0.12~0.7
KVARY	Variable groundwater recession	1/in	0~5	0~0.5
AGWRC	Groundwater recession coefficient	none	0.001~0.999	0.96~0.98
UZSN	Upper zone nominal storage	in	0.01~10.0	0.1~0.128
DEEPR	Fraction of groundwater inflow to deep recharge	none	0.0~1.0	0~0.5
INTFW	Interflow inflow parameter	none	0.0~none	0.75~8
IRC	Interflow recession parameter	none	1.0E-30	0.1~0.5

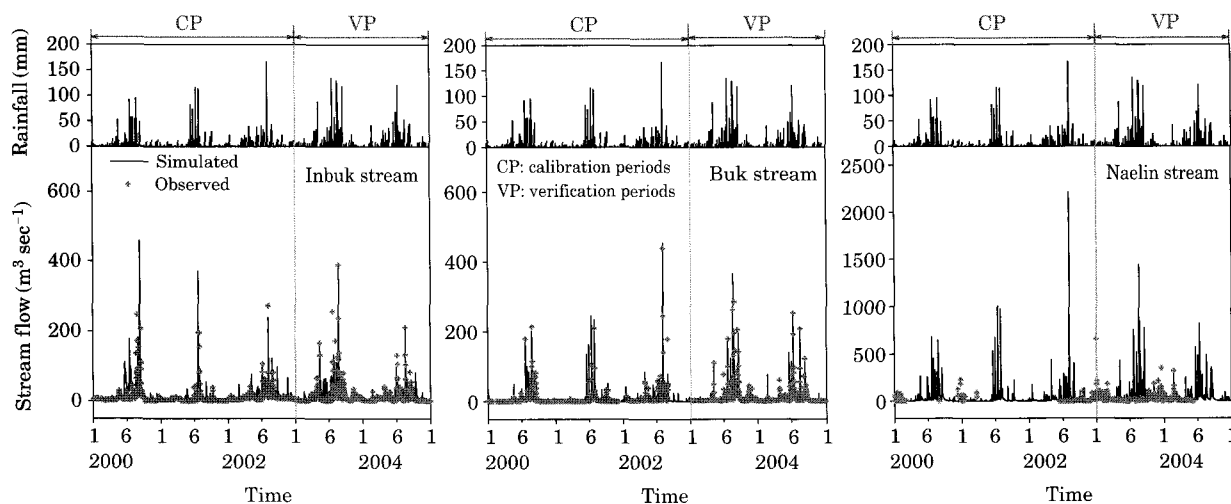


Fig. 4. Calibration and verification of daily stream flow from 2000 to 2004.

우의 일정부분이 표면에 저류되는 현상을 모의하였으며, 높은 바닥으로 침투되는 침투량은 미미하기 때문에(윤 등, 2003) 침투하는 물의 양(INFLT)을 다른 토지이용에 비해 적은 것으로 모의하였다. 유출량자료는 소양강댐 유역의 수위자료와 측정성고가 부족하여 보정은 2000년부터 2002년까지, 검정은 2003년부터 2004년까지 수행하였으며, 검·보정 결과는 Fig. 4에 제시하였다.

유량의 변화는 인북천, 북천, 내린천 세 곳 모두 강수량의 변화와 유사한 패턴을 나타내었고, 실측치와 모의치가 대체적으로 일치하지만 피크인 경우에 모의치가 과소평가 되는 시기가 있다. 이는 각 소유역에서 발생하는 강우량을 이용하여 모델을 구동한 것이 아니고, 춘천과 인제 기상관측소의 자료만을 이용하였기 때문에 주로 산악지역인 조사지역에서 지역적인 차이가 나타난 것으로 판단된다.

모델의 효율을 평가하기 위해 일별 유출량에 대해 R²와 차이 퍼센트를 산정하였다. Table 4는 지난 10년간 HSPF 교육 워크숍에서 제시한 R²와 차이 퍼센트의 범위

Table 4. General calibration and verification targets or tolerances for HSPF application.

	Very good	Good	Fair	Poor
% Diff				
Water flow	< 10	10~15	15~25	-
Water quality	< 15	15~25	25~35	-
R ²				
Daily water flow	0.90 ~0.80	0.80 ~0.70	0.70 ~0.60	0.60 ~0.50

및 목표치에 대한 일반적인 가이드라인이 표기되어 있다 (Donigan, 2000). 차이 퍼센트는 인북천은 14.9%로 “Good” (10~15%)을 나타냈고, 북천은 13.8%로 “Good” (10~15%), 내린천은 23.1%로 “Fair” (15~25%)를 나타내었다. R²의 경우에도 인북천과 북천은 각각 0.73과 0.78로 “Good” (0.80~0.7)을 내린천은 0.65로 “Fair” (0.70~0.60)를 나타내었다.

수질항목은 유량 측정지점과 마찬가지로 인북천, 북천, 내린천 세 곳의 환경부 수질측정망 자료를 사용하여 2000

Table 5. Parameter values for water quality simulation.

Parameter	Definition	Units	Model range	Calibration
KBOD20	Unit BOD decay rate at 20°C	1 hr ⁻¹	1.0E-30 ~ none	0.002 ~ 0.004
KODSET	BOD settling rate	ft hr ⁻¹	0 ~ none	0.0001 ~ 0.027
REAK	Empirical constant in the equation used to calculate the reaeration coefficient	1 hr ⁻¹	1.0E-30 ~ none	0.2 ~ 0.726
CVBO	Conversion from milligrams biomass to milligrams oxygen	mg mg ⁻¹	1.0 ~ 5.0	1.63 ~ 2.00
CVBPC	Conversion from biomass expressed as phosphorus to carbon	moles mol ⁻¹	50 ~ 200	80 ~ 180
CVBPN	Conversion from biomass expressed as phosphorus to nitrogen	moles mol ⁻¹	10 ~ 50	16 ~ 35
BPCNTC	Percentage of biomass which is carbon	none	10 ~ 100	49 ~ 60
KTAM20	Nitrification rates of ammonia at 20°C	1 hr ⁻¹	0.001 ~ none	0.015 ~ 0.05
KNO220	Nitrification rates of nitrate at 20°C	1 hr ⁻¹	0.001 ~ none	0.002 ~ 0.05
TCNIT	Temperature correction coefficient for nitrification	none	1.0 ~ 2.0	1.00 ~ 1.07
KNO320	Denitrification rates at 20°C	1 hr ⁻¹	0.001 ~ none	0.001 ~ 0.045
TCDEN	Temperature correction coefficient for denitrification	none	1.0 ~ 2.0	1.04
DENOXT	DO concentration threshold for denitrification	mg L ⁻¹	0 ~ none	1 ~ 5
MALGR	Algal growth rate	1 hr ⁻¹	0.001 ~ none	0.005 ~ 0.085

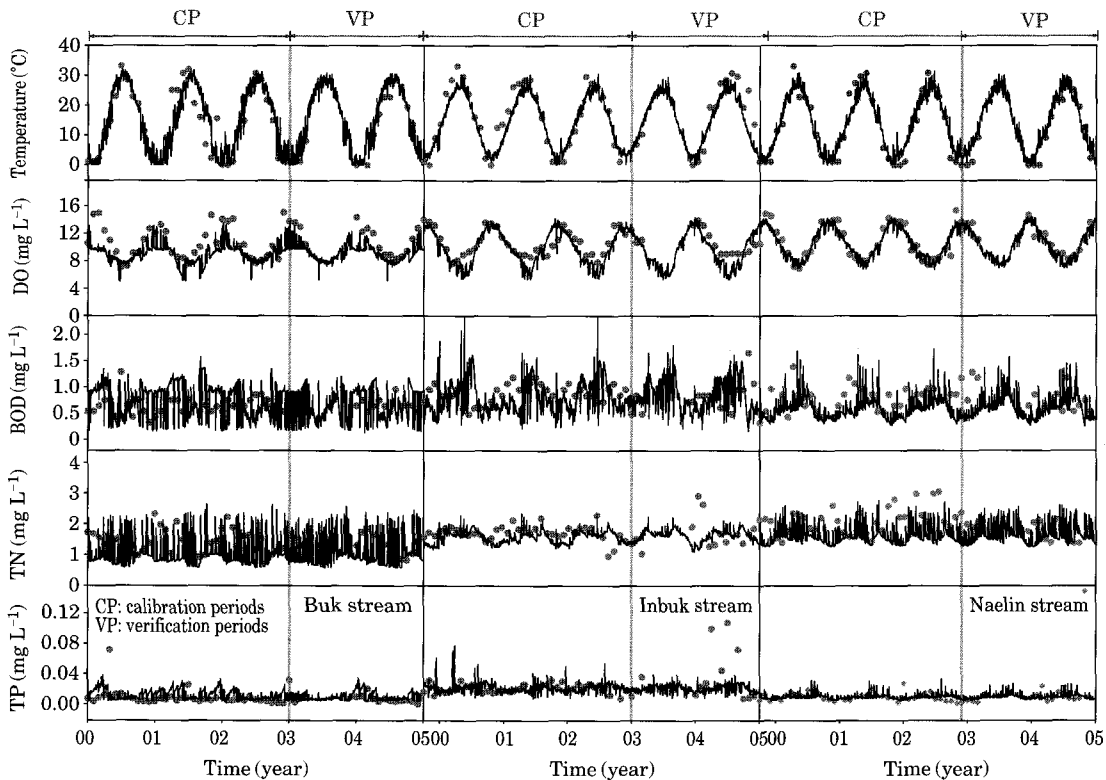


Fig. 5. Calibration and verification of daily water qualities from 2000 to 2004.

년부터 2004년까지 검정과 보정을 실시하였다. 유량은 토사유출에 영향을 주며, 토사에 흡착되어 하천으로 유입

되는 오염물질의 부하량과 밀접한 관계가 있으므로 수질 항목의 보정을 위해서는 정확한 유량의 보정이 선행되어

야 한다(임, 2000). 따라서 먼저 유출량관련 매개변수를 보정한 후 온도, DO, BOD, TN, TP순으로 보정하였다.

수질 보정과정에서 DO와 BOD는 KBOD20, KODSET, REAK 등이 중요한 매개변수로 작용하였으며, TN과 TP는 CVBPC, CVBPN, KTAM20, KNO320 등이 중요한 매개변수로 작용하였다(Table 5). 수질 보정 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 온도, DO, BOD의 경우 모의 값이 연도별 수질변화 패턴과 유사하게 나타났다. TN과 TP의 경우 특정기간에 이상치를 나타내었는데, 검·보정 시 사용된 수질측정망 자료는 월 평균값이므로 정확한 날짜를 추정할 수 없기 때문에 본 연구에서는 월 중간날인 15일로 가정하여 실시하였으므로, 연간 유역의 수질패턴을 정확히 모의하는 데는 어려움이 따른다. WinHSPF는 수백 개 이상의 변수를 정의해야 하는 복잡한 모형이다. 따라서 모형의 보정과정에서 유역의 특성을 정확히 반영하여 매개변수를 산정하는 것이 중요하다. 유역의 정보를 정확하게 반영하기 위한 매개변수 결정시 수리·수문학 적 자료가 부족한 것도 오차발생의 원인 중 하나라 생각되며, 전반적으로 유역 내 복잡한 토지이용 및 오염부하 형태를 고려해 볼 때 허용할 수 있는 범위 내에서 수질을 묘사한 것으로 생각된다.

향 후 WinHSPF 모델의 정확한 보정을 위해서는 좀 더 자세한 소유역의 분할과 함께 보다 정확하고 자세한 기상자료와 수문자료가 뒷받침 되어야 하며, 실측지점의 특성을 대표할 수 있는 수질 및 유출량 측정이 이루어져야 할 것이다.

2. 오염부하량 산정

소양강댐 유역의 오염부하량을 평가하기 위해 유역을 인북천, 북천, 내린천, 소양강의 네 지역으로 구분하였으

며, 2000년부터 2004년까지 BOD, TN, TP의 점원오염부하량과 비점원오염원의 부하량 분포를 비교하였다(Fig. 6). 2000년부터 2004년까지 소양강댐 유역의 오염부하량은 강우량이 가장 높은 2003년에 BOD, TN, TP가 각각 4,109,674 kg yr⁻¹, 6,457,315 kg yr⁻¹, 104,186 kg yr⁻¹로 가장 크게 산정되었다. 2000년부터 2004년까지의 평균 월별 부하량은 Fig. 7에 제시하였으며, 7월부터 9월에 배출되는 양이 BOD는 약 63.5%, TN은 약 64.1%, TP는 약 64.4%를 차지하여, 강우기간 동안 오염부하량이 전체 부하량의 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

오염부하량은 강우 시 유출량이 증가하면 비례하여 증가하기 때문에, 강우 유출량에 많은 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 그러나 수질 농도는 강우에 의한 유출량과 반드시 비례하여 증가하지 않으며, 부하량과 하천수질이 유사한 패턴으로 변화하지 않는다는 것을 확인하였다. 김 등(1997)은 강우 시 소양강 소유역으로 부터 오염원의 유출특성에 대해 연구한 결과 강우 시 각 지천의 영양염류와 및 유기물의 유출은 강우초기에 매우 크고, 연간 부하량이 홍수유출시기에 집중되어 배출된다고 보고하였다. 또한, 소양강댐 유역의 오염부하량은 비점오염원에 의한 부하량이 전체 부하량의 98.6~99.0%로 대부분을 차지하였다. 비점오염원은 유역에서 강우에 의한 수문과정과 함께 발생한다. 유역에 산재되어있는 생활오수와 농경지에 살포된 비료, 농약, 축산폐수 등이 빗물에 의해 용해되거나, 토양 입자에 부착된 상태로 토양침식과정에 의해 하천, 저수지, 댐 등으로 유입하게 된다. 소양강댐 유역은 대부분이 산지와 농경지로 비점오염원에 의한 부하량이 크기 때문에, 점오염원의 억제보다는 강우 시 대량으로 유출되는 비점오염원의 관리가 무엇보다 중요할 것으로 판단된다.

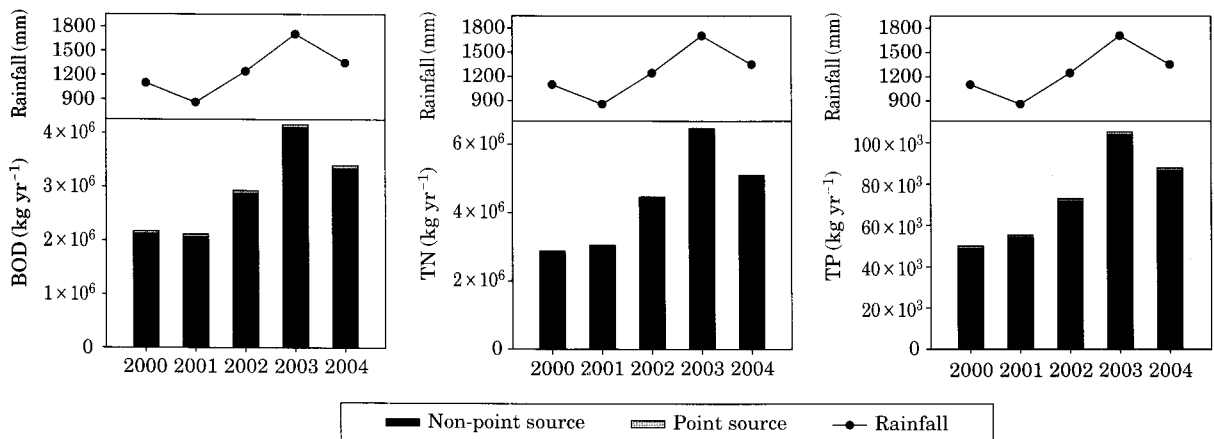


Fig. 6. Yearly pollutant load from Soyang Dam watershed.

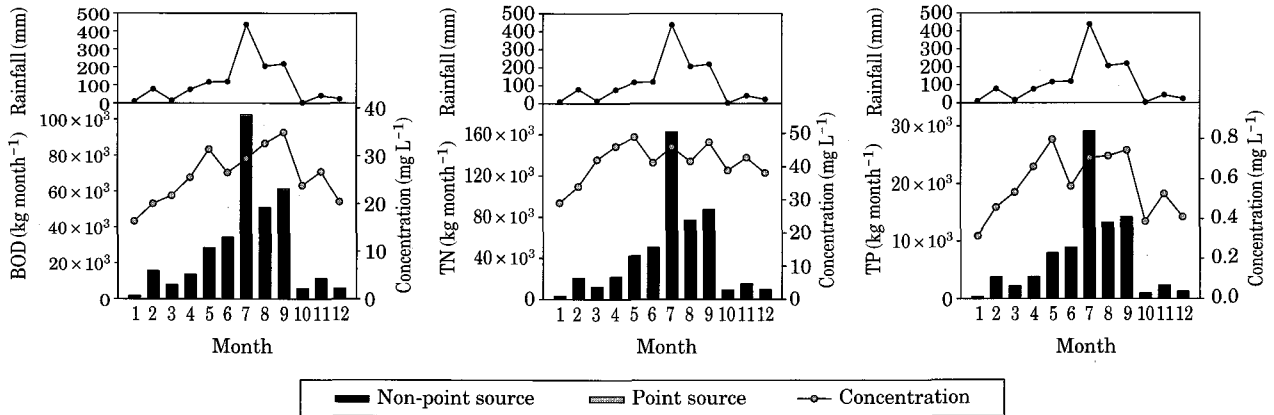


Fig. 7. Monthly mean pollutant load from Soyang Dam watershed.

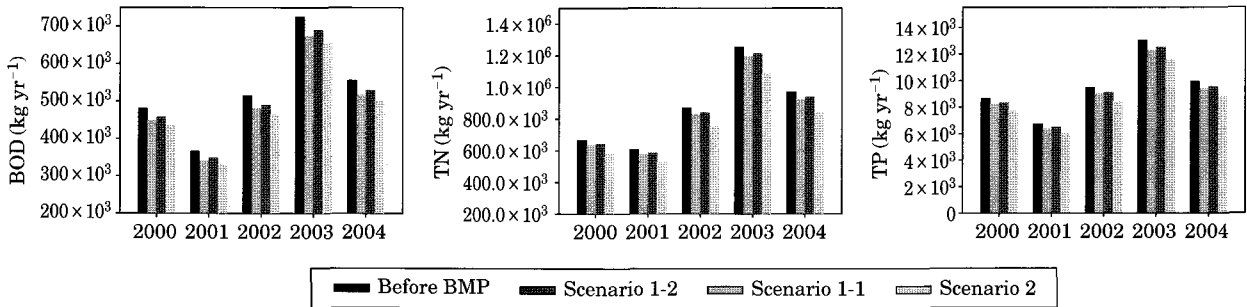


Fig. 8. Comparison of pollutant loading between before and after application of BMP.

3. WinHSPF의 BMPRAC 적용

Fig. 8은 인북천 유역에 저감시설을 설치하였을 경우 WinHSPF의 BMPRAC를 적용하여 2000년부터 2004년까지 설치 전·후의 부하량을 월평균 산정한 결과이다.

인북천 유역의 BOD, TN, TP 모두 저류지(scenario 2)를 설치하였을 경우 오염부하량의 삭감량이 가장 많았으며, BMP 효과는 강우기와 비강우기로 구분하여 Table 3과 같이 나타내었다. 강우기(7~9월)의 경우 BOD는 scenario 1-1은 평균 6.9% 감소를 보였고, scenario 1-2는 4.8%의 감소를 보였다. 저류지를 적용한 scenario 2는 9.8%가 감소하여 scenario 1보다 연평균 약 4.0%가 더 감소하는 것으로 나타났다. 부하량이 가장 높은 2003년의 TN 감소율은 scenario 1-1은 5.0%, scenario 1-2는 3.4%, scenario 2는 13.3%로 나타났다. TP는 연평균 삭감량이 scenario 1-1은 5.6%, scenario 1-2는 3.9%, scenario 2는 11.3%로 나타났다. 비강우의 경우 scenario 1-1은 BOD가 6.7%, TN이 5.0%, TP가 5.0%, scenario 1-2는 BOD가 4.6%, TN이 3.5%, TP가 3.5% 감소되었고,

Table 6. The contribution of pollutant load before and after BMP.

		BOD	TN	TP
		kg yr ⁻¹		
Wet-days	Before BMP	527,516	871,992	9,533
	Scenario1-1	490,911	828,650	9,003
		6.9%	5.0%	5.6%
	Scenario1-2	502,157	842,023	9,166
		4.8%	3.4%	3.9%
	Scenario 2	475,596	755,588	8,453
		9.8%	13.3%	11.3%
Dry-days	Before BMP	150,335	270,501	2,894
	Scenario1-1	140,312	256,898	2,750
		6.7%	5.0%	5.0%
	Scenario1-2	143,363	261,002	2,793
		4.6%	3.5%	3.5%
	Scenario 2	140,026	248,815	2,707
		6.9%	8.0%	6.4%

scenario 2는 BOD가 6.9%, TN이 8.0%, TP가 6.4% 감소되었다(Table 6).

Scenario의 적용 결과 적절한 부지의 확보가 가능하다면 인공습지나 저류지(wet detention pond)를 설치하여 점오염원 뿐만 아니라 강우 시 유역으로 유출되는 비점오염원 부하를 감소시키는 것이 오염총량 목표달성 및 효과적인 유역관리에 도움이 될 것으로 판단된다. Ham (2005)은 화옹 유역에 인공습지를 설치하였을 경우 화옹호의 수질이 개선 효과를 예측하기위해 HSPF를 적용하여 유역의 유출량 및 수질을 모의하고 그 결과를 수질모델인 WASP5에 적용하여 화옹호의 수질개선효과를 검토하였다. 그 결과 화옹 유역에 인공습지를 설치하였을 경우 화옹호의 TN과 TP 농도가 각각 14.7%, 43.5%가 개선되는 것으로 평가되었다. 또한 본 연구의 scenario에서는 적용하지 못한, 인공습지와 저류지의 적절한 연계시스템을 적용한다면 저감시설 조성 부지면적의 감소와 보다 효과적인 수질개선효과를 가져올 수 있으리라 판단된다.

적 요

본 연구에서는 북한강 상류 지역인 소양강댐 유역에 BASINS/WinHSPF 모델을 적용하였다. WinHSPF는 도시와 농촌지역 등이 혼재된 토지이용형태를 보이는 유역에 적용하기 적합한 모델로서, 산림이 대부분인 소양강댐 유역의 유출량 및 수질을 모의하고, 유역의 오염부하량을 분석하였다. 또한, 유역관리를 위해 인공습지와 저류지를 설치하였을 경우 WinHSPF의 Best Management Practice Evaluation (BMPRACT)을 통한 오염부하 삭감량을 산정하였다.

WinHSPF 모델을 이용하여 유출량은 2000년부터 2004년까지, 수질 항목은 1990년부터 2004년까지 모의하였다. 모델 보정 결과 유량의 변화는 인북천, 북천, 내린천 세 곳 모두 강수량의 변화와 일치하여 변화하는 경향을 나타내고 있었고 모의치가 실측치를 대체적으로 잘 반영하였지만 유출량이 피크인 경우에 실측치에 비해 과소평가 되는 경향을 나타내었다. 이는 각 소유역에서 발생하는 강우량을 이용하여 모델을 구동한 것이 아니고, 일부 국한된 기상관측소의 자료만을 이용하였기 때문에 지역적인 차이가 나타났거나, 수위-유량 곡선을 통해 유출량을 산정하는 과정에서 수위가 높은 시기에 유량이 과도하게 계산된 경우가 있기 때문이라 판단된다. 수질항목은 온도, DO, BOD의 경우 예측값이 연중 수질변화패턴을 잘 반영하였다. TN과 TP는 모의치가 다소 과대, 과소평가되는 경향이 있었는데, 향후 보다 효율적인 유역관리를 위한 모델의 활용을 위해서는 정확하고 자세한 기

상자료와 수문자료가 뒷받침 되어야 하며, 실측지점의 특성을 대표할 수 있는 수질 및 유출량 측정이 이루어져야 할 것이다.

2000년부터 2004년까지 소양강댐 유역의 오염부하량은 강우량이 가장 높은 2003년에 BOD, TN, TP가 각각 4,109,674 kg yr⁻¹, 6,457,315 kg yr⁻¹, 104,186 kg yr⁻¹로 가장 높게 나타났다. 월별 부하량은 7월부터 9월에 배출되는 양이 BOD는 약 63.5%, TN 약 64.1%, TP는 약 64.4%를 차지하여, 강우 시 유출량이 증가하면 부하량도 비례하여 증가는 것으로, 강우 유출량에 많은 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 인북천, 북천, 내린천, 소양강 유역에서 BOD, TN, TP의 오염부하량은 약 98% 이상이 비점오염원으로부터 발생하는 것으로 분석되었는데, 이는 유역의 대부분이 산지와 농경지로서 산업시설과 같은 점오염원이 적고, 강우 시 산림지역 및 농경지에서 많은 양의 비점오염원이 발생하기 때문으로 판단된다.

WinHSPF 모델의 BMPRACT를 이용하여 Scenario를 적용한 결과 부하량 삭감율은 저류지를 설치한 scenario 2가 가장 많이 감소하는 것으로 나타났다. 강우기(7~9월)의 부하량 삭감율은 BOD의 경우 Scenario 1-1(처리용량 1,500 m³ day⁻¹인 인공습지), scenario 1-2(처리용량 1,000 m³ day⁻¹인 인공습지), scenario 2(면적 4.2ha인 저류지)가 각각 연평균 6.9%, 4.8%, 7.1%의 감소를 보였다. TN은 4.7%, 3.4%, 13.4%의 삭감율을 나타내었으며, TP는 5.6%, 3.9%, 7.3%의 삭감율을 나타내었다. 본 연구에서는 적용하지 못하였으나, 인공습지와 저류지의 적절한 연계시스템을 적용한다면 저감시설 설치 부지면적과 비용의 감소뿐만 아니라 보다 효과적인 수질개선효과를 가져올 수 있으리라 판단된다.

인 용 문 헌

관계부처합동. 2004. 4대강 비점오염관리 종합대책. 환경부, 경기.

국립환경과학원. 2005. 비점오염원의 오염부하 유출량 조사보고서, 한강수계 2005년 환경기초조사사업. 국립환경과학원, 인천.

농업기반공사. 2005. 인공습지에 의한 수질개선 기법개발. 농업기반공사, 경기.

백도현, 임영환, 최진규, 정팔진, 곽동희. 2005. SWMM모델을 이용한 도시지역 비점오염원의 유출특성 연구, 한국환경과학회지 14(12): 1185-1194.

윤준경, 황하선, 전지홍, 함종화. 2003. 수도재배시 눈에서의 영양물질 수지 분석, 육수지 36(1): 66-73.

임상준, Kevin M. Brannan, Saied Mostaghimi, 조재필. 2003.

- HSPF와 SWAT 모델을 이용한 산림유역의 유출 및 유수량 추정, 한국농촌계획학회지 9(4): 59-64.
- 임상준. 2000. HSPF 모델을 이용한 비점오염부하량 산정에 관한 연구. 충남대학교 석사학위논문.
- 장재호, 윤춘경, 정광욱, 전지홍. 2006. BASINS/HSPF를 이용한 용담댐 유역의 오염부하량 산정, 육수지 39(2): 187-197.
- 한국환경정책·평가연구원. 2002. 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안. 한국환경정책·평가연구원, 서울.
- 함종화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 신현범. 2005. 물리적 설계인자가 인공습지의 처리효율에 미치는 영향, 한국농공학회지 47(5): 87-97.
- 환경관리공단. 2003. 자연형 하천정화를 위한 인공습지 조성방안. 환경관리공단, 인천.
- 환경부. 2002a. 환경백서. 환경부, 경기.
- 환경부. 2002b. 유역관리업무지침. 환경부, 경기.
- Albek, M., U.B. Ogutveren and E. Albek. 2004. Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. *Journal of Hydrology* 285: 260-271.
- ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation Drainage Engineering* 119(3): 429-442.
- Beasley, D.B. and L.F. Huggins. 1981. ANSWERS Users Manual. EPA 905/9-82-001. USEPA, Chicago, IL.
- Bicknell, B.R., J.C. Imhoff, J.L. Kittle, A.S. Donigian and R.C. Johanson. 1993. Hydrological simulation program-FORTRAN (HSPF): User's manual for release 10.0. EPA 600/3-84-066. USEPA, Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
- Chen, Y.D., R.F. Carsel, S.C. McCutcheon and W.L. Nutter. 1998a. Stream temperature simulation of forested riparian areas: I. Watershed-scale model development. *Journal of Environmental Engineering-ASCE* 124: 304-315.
- Chen, Y.D., S.C. McCutcheon, D.J. Norton and W.L. Nutter. 1998b. Stream temperature simulation of forested riparian areas: II. Model application. *Journal of Environmental Engineering-ASCE* 124: 316-328.
- Choi, K.S. and J.E. Ball. 2002. Parameter estimation for urban runoff modeling. *Urban Water* 4: 31-41.
- Donigian, A.S. and N.H. Crawford. 1976. Modeling nonpoint pollution from the land surface. EPA 600/3-EP76-083. Environmental Research Laboratory, Athens, Georgia.
- Donigian, A.S., J.C. Imhoff, B.R. Bicknell and J.L. Kittle. 1984. Application Guide for Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF), EPA.
- Donigian, Jr., A.S. 2000. HSPF Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000. Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.
- Endreny, T.A., C. Somerlot and J.M. Hassett. 2003. Hydrograph sensitivity to estimates of map impervious cover: a WinHSPF BASINS case study. *Hydrological process* 17: 1019-1034.
- Gallagher M. and J. Doherty. 2005. Parameter estimation and uncertainty analysis for a watershed model. *Environmental Modeling & Software*, p. 1-21.
- Ham, J.H. 2005. Nonpoint source pollution control using constructed wetlands and integrated watershed modeling, Ph.D. diss., Konkuk University.
- Jeon, J.H. 2005. BASINS/HSPF-Paddy development for watershed management Korea. Ph.D. diss. Konkuk University.
- Johnson, M.S., W.F. Coon, V.K. Metha, T.S. Steenhuis, E.S. Brooks and J. Boll. 2003. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hill-slope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. *Journal of Hydrology* 284: 57-76.
- Kang, M.S., S.W. Park, J.J. Lee and K.H. Yoo. 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural water management* 79: 72-92.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, conservation research report, No. 26. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Mallin, M.A., S.H. Ensign, T.L. Wheeler and D.B. Mayes. 2002. Pollutant removal efficacy of three wet detention ponds. *Journal of Environmental Quality* 31(2): 654-660.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. Riverflow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
- USEPA. 1983. Results of the Nationwide Urban Runoff Program. Final Report, Water Plan. Div. Washington, D.C.
- USEPA. 1997. Compendium of tools for watershed assessment and TMDL development. EPA 841-B-97-006. U.S. Environmental Protection Agency, Assessment and watershed protection division, Washington, D.C.
- USEPA. 2001a. Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources, BASINS Version 3.0 User's Manual. EPA 823-B-01-001. Washington, D.C.
- USEPA. 2001b. WinHSPF Version 2.0 User's Manual. EPA

68-C-98-010. Washington, D.C.

122(11): 983-988.

Wu, J.S., R.E. Holman and J.R. Dorney. 1996. Systematic evaluation of pollutant removal by urban wet detention ponds. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*

(Manuscript received 28 February 2007,
Revision accepted 17 April 2007)