

## HRSM4BMP 모형 유출/유사 자동 보정 툴 개발

금동혁 · 류지철\* · 최재완\* · 강현우 · 장춘화 · 신동석\* · 이재관\* · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과

\*국립환경과학원

## Development of Runoff and Sediment Auto-calibration Tool for HRSM4BMP Model

Donghyuk Kum · Jichul Ryu\* · Jaewan Choi\* · Hyunwoo Kang · Chun Hwa Jang · Dong Suk Shin\* ·  
Jae Kwan Lee\* · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

\*National Institute of Environmental Research

(Received 16 August 2012, Revised 28 November 2012, Accepted 29 November 2012)

### Abstract

Recently, various Best Management Practices (BMPs) have been applied at a field to reduce soil erosion. Hourly Runoff and Sediment Model for Best Management Practices (HRSM4BMP) model could be used to evaluate soil erosion reduction for various agricultural BMPs at fields. Runoff and sediment yield from source areas have to be predicted with greater accuracies to evaluate sediment reduction efficiently with BMPs. To achieve this, the best parameters related with runoff and sediment modules of the HRSM4BMP model should be identified with proper calibration processes. Although manual calibration is often utilized in calibrating runoff and sediment using the HRSM4BMP, objective calibration method would be recommended. The purpose of the study was to develop an automatic calibration tool of the HRSM4BMP model with PARASOL method. This automatic calibration tool was applied to Bangdongri, Chuncheon-si to evaluate its calibration performance. The  $R^2$ , NSE and RMSE value for runoff estimation were 0.92, 0.92, 0.3  $m^3$ , and for sediment yield estimation were 0.94, 0.94, 0.0027 kg. As shown in this result, automatic calibration tool of HRSM4BMP model would be used to determine the best parameters and can be used to simulate runoff and sediment yield with acceptable accuracies.

**Key words** : Automatic calibration, HRSM4BMP model, PARASOL, Runoff, Sediment yield

## 1. 서론

우리나라의 연간 농경지에서 발생하는 토양유실량은 2,900 만 ton에 달하며 경제협력개발기구(OECD)에서 제시한 토양 유실량 허용권장치인 헥타르(ha)당 11ton에 비해 4배 많은 평균 41.1 ton의 토양이 밭에서 유실되고 있다(Rural Development Administration, 2012). 특히 밭으로 이용되는 토지의 70% 이상이 경사지에 분포하고, 몬순기후의 영향으로 여름철 집중호우와 국지성 폭우가 빈번히 발생하는 6~9 월 사이 많은 양의 토양유실이 발생되고 있다. 이로 인해 경제적 손실과 환경적 문제가 되풀이되고 있는데, 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미로 인한 집중호우로 탁수문제가 불거졌던 임하댐과 2006년 7월 중순 태풍 예위니아의 집중 호우로 인한 소양댐내 탁수장기화 현상 등이 대표적인 예라 할 수 있다(Kim et al., 2008; Lee, 2008). 정부에서는 토양유실 저감을 위해 7년(2007~2013년)간 총 3,859억 원의 사업비를 투자하여 정부차원의 종합대책을 마련하였다(Han

Basin Commission, 2008). 그리고 최근 몇 년간 종전 대권역 중심의 저감대책에서 소유역 단위의 저감대책을 확산시키고자 하고 있다(Park et al., 2010). 토양유실로 인한 탁수 및 수질오염문제를 해결하기 위한 다양한 최적관리기법(Best Management Practices, BMPs) 중 최근 환경부에서는 토양유실 발생원(Source Area)인 필지단위 농경지에 침사지, 저류지, 식생완충대, 우회수로, 지표피복, 녹비작물 등의 BMPs 현장에 적용하고 효과를 분석하고 있다. 또한 Kum et al. (2012)은 필지단위 유출/유사 모의 및 BMP 효과 평가를 위한 HRSM4BMP (Hourly time step Runoff and Sediment Modeling system for BMP evaluation) 모형을 개발하였다. 이 HRSM4BMP 모형은 시강우 자료를 활용하여 발생원에서의 유출량과 유사 발생량을 산정하고, 식생완충대, 우회수로, 지표피복, 녹비작물, 발두령의 BMPs 저감효과를 분석하는데 활용될 수 있다. 이 HRSM4BMP 모형을 이용하여 BMPs 적용에 따른 유출 및 유사 저감효과를 분석하기 위해서는 발생원에서의 유출량과 유사량 모의 정확성이 확보되어야 한다. 이를 위해 Source Area의 유출/유사와 관련된 최적 매개변수 도출이 선행되어야 하지만 기존 시스템은 사용자가 수작업으로 매개변수를 보정하는 시행착오법을 사용하

† To whom correspondence should be addressed.  
kjlim@kangwon.ac.kr

기 때문에 잠재적인 오류 및 최적 변수 선정의 한계가 나타날 수 있다. 이러한 모형 보정의 한계를 극복하기 위하여 자동 보정 및 검증 평가 모듈이 개발되어 활용되고 있다. 전세계적으로 널리 이용되고 있는 SWAT모형의 경우 PARASOL 방법을 이용하여 자동 보정 틀이 개발되었고, 최근에는 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting ver. 2), PARASOL (Parameter Solution), MCMC, PSO (Particle Swarm Optimization), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 라는 5가지의 알고리즘을 이용하여 SWAT을 보정하는 Window기반 독립형 프로그램 SWAT-CUP이 개발되었다 (Abbaspour, 2007). 또한 국내 연구자들도 수리/수문 모형들의 이러한 단점을 보완하고자 다양한 알고리즘을 이용하여 자동 보정에 관한 연구를 진행하였다. Kang, Lee et al. (2012)은 도시유역의 홍수유출 특성 분석에 많이 사용되고 있는 SWMM모형의 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용한 자동 보정 틀을 개발하였고, Lee and Kim (2001)은 유전자 알고리즘을 이용하여 저수지조작, 대유역의 실시간 일유출예보 등의 목적으로 널리 사용되고 있는 SSARR 모형의 자동 보정틀을 개발하였다. 또한 Kang, Ryu et al. (2012)은 SWAT 모형의 자동보정 모듈을 수정 보완하여 환경부 8일 유량·수질 자료를 이용하여 자동 검증할 수 있도록 하였다. 따라서 본 연구의 목적은 HRSM4BMP 모형의 유출 및 유사 자동 보정 틀을 개발하는데 있으며, 개발된 보정 틀을 적용하여 HRSM4BMP 모형의 유출 및 유사 예측 정확성을 평가하는데 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1. HRSM4BMP 유출량/유사량 및 BMP 평가모형 개요

HRSM4BMP 모형은 MapWindow(Watry et al., 2007)를 기반으로 인터페이스가 구축되었다. 특히 인터페이스 구성에 이용된 MapWindow는 오픈소스 소프트웨어(Open Source Software)로서 라이선스 비용이 거의 없고 소프트웨어의 수정과 배포가 용이하다. 그리고 유출량/유사/BMPs 산정 모듈은 Fortran언어를 이용하여 개발되었으며, 이 HRSM4BMP 모형의 구성도는 Fig. 1과 같다. 유출량은 시강우자료를 활용하기 때문에 시시각각 변화되는 강우강도를 반영하며, 유출곡선계수(Curve Number: CN)는 5일 선행강수량과 필지경사도를 고려하여 산정한다. 유사량은 단일 호우에 대한 유사량 산정이 가능한 수정범용토양손실공식(Modified Universal Soil Loss Equation: MUSLE)을 이용한다. 특히 MUSLE 공식의 식생피복인자는 작물성장에 따른 지표피복면적의 변화(Time-Variant C DB)가 고려되어 적용된다.

### 2.2. HRSM4BMP 모형의 유출량/유사량 최적 보정 기법

#### 2.2.1. 최적 보정 기법

수리/수문 및 비점오염 평가 모형의 모의 결과와 관측 자료간의 차이는 다양한 원인에 의해서 발생하지만, 실측 자료를 표현할 수 있는 최적 매개변수 조정의 불확실성으로 인해 빈번히 발생한다. 모형의 보정은 일정 기간 동안에 관측된 자료와 모의 결과 자료를 비교하며 매개변수를 조

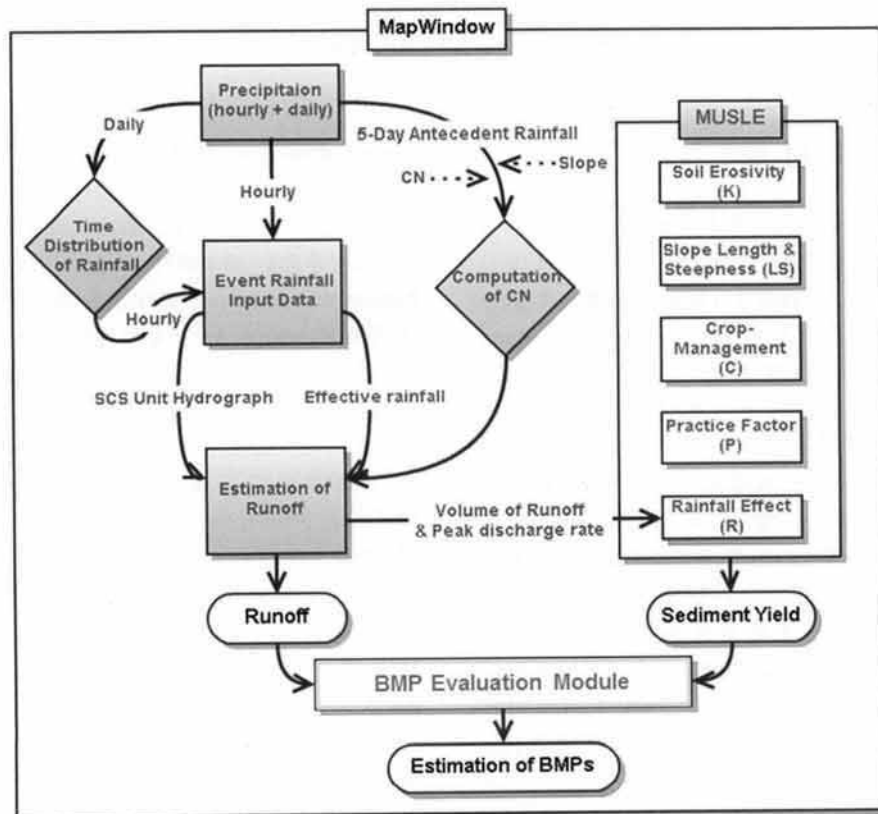


Fig. 1. Overview of HRSM4BMP modeling system (Kum et al., 2012).

정하는데, 이러한 모형의 보정방법에는 시행착오법에 의한 수동보정 방법과 최적화 기법에 의한 자동보정 등이 있다. 하지만 시행착오법에 의한 수동보정은 모형에 대한 이해와 지식이 필요하며, 보정에 대한 숙련된 경험과 감각이 최적 매개변수에 큰 영향을 미치기 때문에, 최근에는 누구나 객관적이고 손쉽게 최적매개변수를 조정할 수 있는 자동보정 방법이 많이 이용되고 있다. 자동보정은 관련 매개변수의 최적 해를 탐색할 수 있는 수치 알고리즘을 이용하는데, 생물학 원리에 바탕을 둔 최적화 기법으로 생명체 중 환경에 잘 적응한 개체가 좀 더 많은 자손을 남길 수 있다는 자연선택 과정과 자연계의 생명체 설계도와 같은 유전자의 변화를 통해서 좋은 방향으로 발전해 나간다는 자연 진화의 과정인 자연계의 유전자 메카니즘에 바탕을 둔 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)과, 탐색이동(Explorater Move)과 표본 이동(Pattern Move)의 두 과정으로 나뉘어져, 이 과정을 연속 반복하며 최적해의 찾게 되는 패턴 탐색법, 일반화 가능성의 불확실성에 의한 추정으로 매개변수를 추정하는 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), 순차적으로 매개변수를 추정해 나가는 SUFI-2 등이 사용되고 있다. 이 중 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution at University of Arizona) 알고리즘이 최적 보정 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며(Duan et al., 1994), Van Griensven and Meixner (2007)는 단일 목적함수(Objective function)를 최소화하는 SCE-UA 알고리즘을 응용하여 여러 목적함수를 통합한 전역 최적화 기준(Global optimization criterion: GOC)을 제안하였고, 이를 최소화하는 다중목적 최적화 방법(Parameter Solution: PARASOL)을 제시하였다(Duan et al., 1993; Kim et al., 2009). 국내외에서 PARASOL 방법을 이용한 모형의 자동보정 결과 매우 좋은 보정 결과(Jung et al., 2011)가 나타났고, 이에 본 연구에서는 HRSM-4BMP 모형의 자동 보정 틀 개발에 PARASOL을 이용하였다.

2.2.2. PARASOL 방법

2.2.2.1. SCE-UA 알고리즘

SCE-UA는 GA와 Simplex 탐색방법 그리고 CRS (Controlled random search) 방법에서 적용한 탐색방법들에 집합체 혼합(Complex shuffling) 개념을 추가한 알고리즘이다. 전체적인 흐름도는 Fig. 2와 같으며, 최적해 탐색을 위해 각 매개변수의 논리적 범위(최소/최대) 내에서 무작위 표본 추출을 통해 하나의 모집단(population)을 구성하고, 모집단을 p개의 집합체(complex)로 분할한다. 각 집합체는 simplex 알고리즘을 이용하여 p개의 집합체를 개별적으로 진화시킨다. 그리고 진화된 집합체들은 주기적으로 혼합(shuffling)되어 새로운 집합체를 형성하고, 수렴조건이 만족될 때까지 반복적으로 수행한다. 이런 과정을 거쳐 매개변수의 논리적 범위 내에서 최적해를 선정하게 된다.

2.2.2.2. 다중목적 최적화

PARASOL 방법에 사용된 목적함수는 식 (1) (Van Griensven and Meixner, 2007)과 같이 잔차 제곱의 합(Sum of the squares of the residuals: SSQ)을 이용한다.

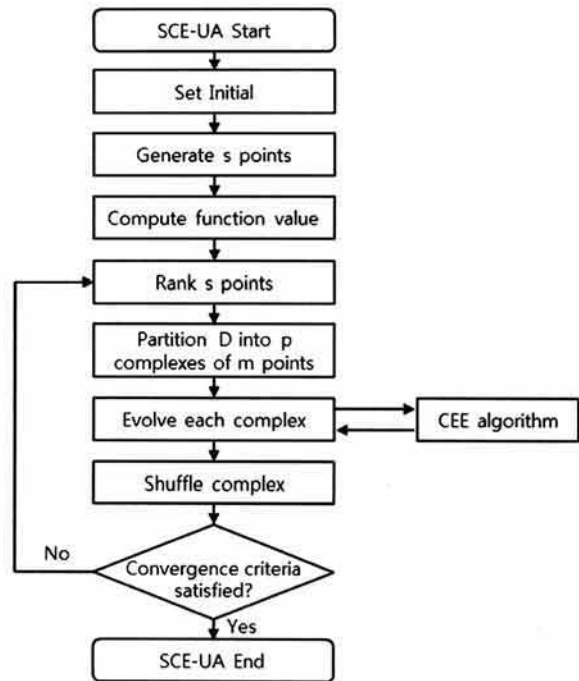


Fig. 2. Flow chart of SCE-UA algorithm (Duan et al., 1993).

$$SSQ = \sum_{n=1, N} [x_{n, measured} - x_{n, simulated}]^2 \quad (1)$$

여기서  $x_{measured}$  는 관측치  $x_{simulated}$  는 모의치를 의미하면,  $n$  는 관측 자료수를 의미한다.

매 반복 연산시 SSQ가 새롭게 산정되며, 이렇게 산정되는 단일 목적함수 SSQ는 통계기반의 통합방법인 Bayesian 이론(Box and Tiao, 1973)에 적용되어 식 (2)~식 (10)과 같이 다중목적 최적화가 시행되게 된다. 잔차(residuals)는 평균(0)과 분산( $\sigma^2$ )을 모수(parameter)로 가지는 정규분포(normal distribution)  $N(0, \sigma^2)$ 을 가지고 추정하며 잔차의 분산은 식 (2)와 같이 추정된다.

$$\sigma^2 = \frac{SSQ_{MIN}}{N} \quad (2)$$

여기서  $SSQ_{MIN}$  은 최적해를 위한 잔차 제곱의 합을 의미한다.

그리고 매개변수군(parameter set)의 잔차 확률이 특정 관측 자료에 따라 결정되는 경우 식 (3)에 의해 계산되며, N개의 관측 자료에 대한 잔차 확률은 식 (4)와 같이 계산된다.

$$p(\theta|y_{n, obs}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(y_{n, sim} - y_{n, obs})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

$$p(\theta|Y_{obs}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma^2})^N} \prod_{n=1}^N \exp\left[-\frac{(y_{n, sim} - y_{n, obs})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

이때 일정 관측 자료의 매개변수군  $\theta$ 에 대한 확률은 식 (5)와 같다.

$$p(\theta|Y_{obs}) \propto \exp\left[-\frac{SSQ_1}{2 \times \sigma_1^2}\right] \quad (5)$$

여기서  $SSQ_1$  와  $\sigma_1^2$  는 일정 관측 자료에 대한 잔차 제곱의 합과 이에 상응하는 분산을 의미한다.

Bayes's 이론에 따르면, 결합 확률(joint probability)은 독립적 확률의 곱을 통해 계산할 수 있으며, M개의 독립적 목적함수에 대한 결합 확률은 다음과 같이 식 (6)을 통해 계산한다.

$$p(\theta|Y_{obs}) \propto \prod_{m=1, M} \exp\left[-\frac{SSQ_m}{2 \times \sigma_m^2}\right] \quad (6)$$

식 (2)를 식 (6)에 대입하면 식 (7), 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$p(\theta|Y_{obs}) \propto \prod_{m=1, M} \exp\left[-\frac{SSQ_m \times N_m}{2 \times SSQ_{m, min}}\right] \quad (7)$$

$$\ln[-p(\theta|Y_{obs})] \propto \sum_{m=1}^M \frac{SSQ_m \times N_m}{SSQ_{m, min}} \quad (8)$$

따라서 식 (9)와 같이 GOC 최소화를 통해 공산(likelihood)을 최적화 할 수 있다. 그리고 식 (8)과 식 (9)를 이용하여 식 (10)과 같이 확률과 GOC를 정의할 수 있다.

$$GOC = \sum_{m=1}^M \frac{SSQ_m \times N_m}{SSQ_{m, min}} \quad (9)$$

$$p(\theta|Y_{obs}) \propto \exp[GOC] \quad (10)$$

### 2.3. 자동 보정 틀 적용 대상 지역

본 연구에서 개발된 HRSM4BMP 유출량 및 유사량 자동 보정 틀을 적용하기 위해서는 필지별 측정된 강우 이벤트별 유출량과 유사량 관측 자료가 필요하다. 그동안 국내에서는 유역단위나 소유역 단위의 유출/유사 관측은 활발히

이루어지고 있지만 소규모의 필지에서 발생하는 유출/유사 관측은 그러하지 못하다. 이에 본 연구에서는 개발된 HRSM4BMP 모형의 유출량 및 유사량 자동 보정 틀의 적용성 평가를 위해 강원도 춘천시 서면 방동리에 조성되어 있는 시험포를 적용 대상으로 선정하였다(Fig. 3). 시험포는 강원대학교에서 비점오염 연구를 위하여 조성하였으며, 3%의 경사와 가로 세로 5 m, 22 m의 크기로 되어있다. 시험포의 토양속성은 양질사토(Loamy sand)이며, 밭에는 무작물이 관행적으로 이루어지고 있는 작물 재배 방법과 동일한 방법으로 재배되고 있다(Shin et al., 2011). 또한 시험포 하단 유출부에 수위를 측정하는 플룸(Flume)이 설치되어 강우시 시험포에서 발생한 유출을 자동 측정하며, 자기우량계가 설치되어 시험포의 강우량이 측정되고 있다.

### 2.4. 자동 보정 틀 적용

본 연구에서 개발된 HRSM4BMP 모형의 유출량 및 유사량 자동 보정 틀을 강원도 춘천시 서면 방동리에 조성된 시험포에 적용하였으며, 보정은 2011년 6월 1일부터 2011년 7월 6일의 관측 자료를 활용하였다. 관측 자료에서 유출량은 플룸을 통해 강우사상별 자동 관측된 자료를 이용하였고, 유사량은 강우 사상에 따른 측정의 어려움으로 인해 강우 사상에 따른 측정이 아닌 일정기간동안의 총량으로 측정되고 있다. 자동 보정 틀 적용을 위해서는 강우 사상에 따른 실측 유사량 자료도 필요하다. 그러나 실측자료의 한계로 인하여 본 연구에서는 실측 유사 자료 대안으로 유사에 대한 자동 보정 틀 적용을 위해 실제 유사발생이 유출량에 가장 큰 영향을 받기 때문에 총 유사량을 모의기간 동안의 유출량 비율로 분배하여 활용하였다.

자동 보정에 적용된 매개변수는 지형 조건과 관련된 매개변수와 작물성장에 따른 지표피복면적의 변화를 고려한 식생피복인자(Time-variant C)가 적용된 일별 USLE C 등과 같이 정적 매개변수를 제외한 강우지속시간과 호우형태(Storm Type), CN 그리고 USLE K 산정에 영향을 미치는 유기물 함량이다. 이 매개변수들은 Kum et al. (2012)의 연구에서 시행착오법에 의해 매개변수 조정에 이용되었던 변수들이다.

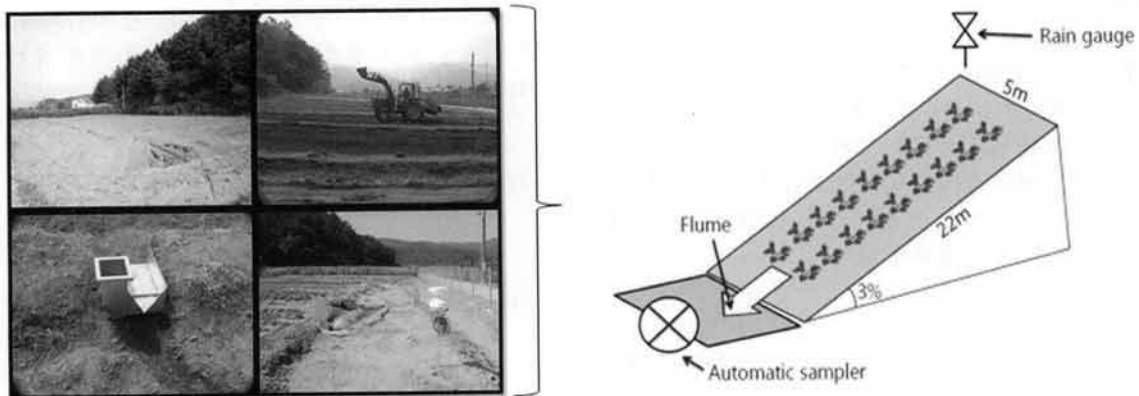


Fig. 3. Study area.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 자동 보정 틀 개발

본 연구에서는 HRSM4BMP 유출량 및 유사량 최적 보정을 위하여 PARASOL 방법을 이용한 자동 보정 틀을 개발하였다(Fig. 4). 본 연구에서는 기존 개발된 HRSM4BMP 유출/유사 산정 엔진과 PARASOL 엔진을 연계하여 자동으로 HRSM4BMP 유출량 및 유사량 산정 최적 매개변수 조정이 이루어지도록 하였다. 매 연산시 유출/유사 관련 매개변수가 PARASOL 엔진을 통해 자동 변화되며 이렇게 변화된 매개변수는 모형의 입력자료로 사용된다. 변화된 입력파일의 매개변수를 이용하여 유출/유사 산정 엔진은 새롭게 유출/유사를 모의하며, 이렇게 모의된 결과 값을 PARASOL 엔진에서 GOC를 최적화하는 매개변수를 다시 조정하게 된다. 이러한 일련의 과정을 자동적으로 수천 번 반복하여 최적의 매개변수를 조정하게 된다. 특히 매개변수별 최소치와 최대치를 사용자가 설정할 수 있기 때문에 기계적 오류, 즉 매개변수가 가진 물리적 허용 범위를 벗어난 매개변수를 조정하는 오류를 예방할 수 있다.

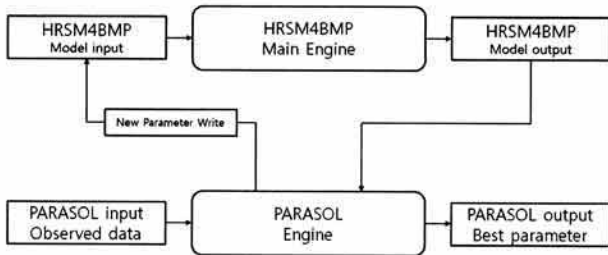


Fig. 4. Overview of HRSM4BMP auto-calibration.

#### 3.2. 자동 보정 틀 적용성 평가

시험포의 2011년 6월 1일부터 2011년 7월 6일까지 관측 강우/유출/유사 자료를 이용하여 본 연구에서 개발된 HRSM4BMP모형의 자동 보정 틀의 적용성을 평가해보았다. 자동 보정에 사용된 매개변수와 범위 그리고 보정된 최적 매개변수는 Table 1과 같으며, 초기 변수 값은 Kum et al. (2012)의 연구에서 시행착오법을 이용하여 조정된 변수값을 이용하였다.

자동 보정 틀을 이용하여 매개변수 보정 후 유출/유사 모의 결과 Table 2와 같고, Fig. 5는 유출/유사에 대한 모형의 보정 결과를 일대일로 비교하여 보여주고 있다.

본 연구에서 개발된 유출/유사 자동 보정 틀의 평가에는 유효지수(Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient: NSE)와 결정계수(R<sup>2</sup>), 그리고 평균제곱오차의 제곱근(Root Mean

Table 2. Result of simulated runoff and sediment yield

Date	Precipitation (mm)	Runoff (m <sup>3</sup> )		Sediment yield (kg)	
		Measured	Simulated	Estimated	Simulated
20110601	20.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110602	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110603	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110604	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110605	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110606	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110607	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110608	3.2	0.00	0.00	0.00	0.00
20110609	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110610	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110611	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110612	3.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110613	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110614	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110615	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110616	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110617	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110618	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110619	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110620	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110621	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110622	8.2	0.00	0.00	0.00	0.00
20110623	75.8	0.87	2.45	0.97	1.40
20110624	16.8	0.00	0.00	0.00	0.00
20110625	36.4	0.67	0.84	0.75	0.48
20110626	58.0	2.64	2.09	2.94	1.31
20110627	18.2	0.02	0.19	0.02	0.10
20110628	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110629	139.4	5.79	5.05	6.44	6.65
20110630	64.0	1.53	1.35	1.70	1.71
20110701	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110702	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110703	77.6	2.15	1.87	2.39	2.46
20110704	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110705	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
20110706	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	520.6	13.67	13.84	15.21	14.11

Square Error: RMSE)를 이용하였다. NSE와 R<sup>2</sup>는 1, RMSE는 0에 가까울수록 모형의 예측치가 실측치를 잘 모의하는 것을 의미하며, NSE 산정공식은 식 (11)과 같다(Nash and Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (11)$$

Table 1. Parameter ranges and calibrated parameter in auto-calibration

Parameter	Min	initial	Max	Calibration value	Units
CN	66	70	74	66.2	
Storm duration time	3.5	3.6	4	4	hour
Storm type (1=I, 2=II, 3=III, 4=IV)	1	2	4	2	
Organic matter	2	4	8	4.8	%

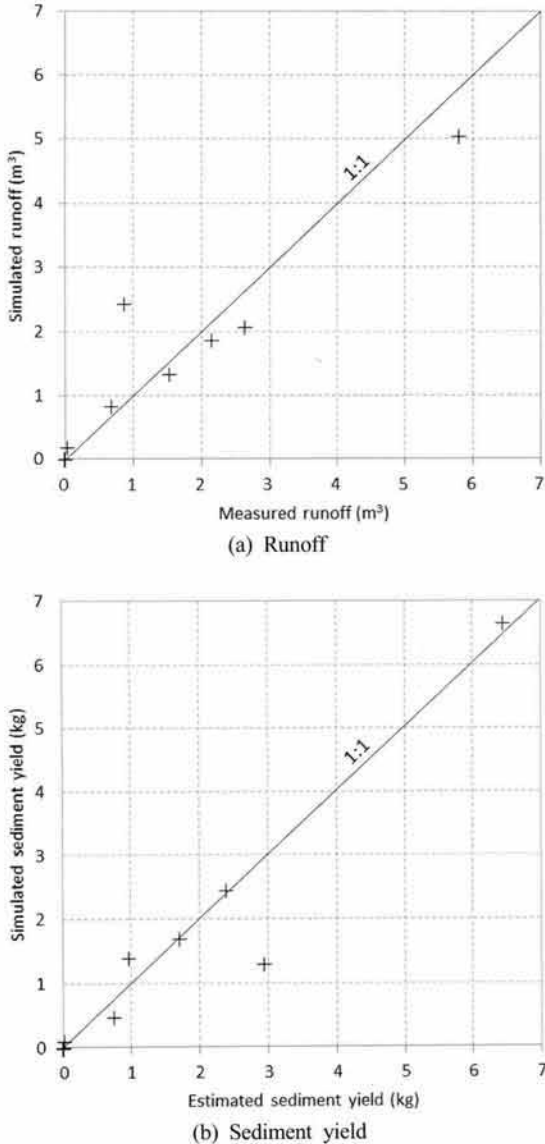


Fig. 5. Scatterplots comparing measured and simulated.

여기서  $Q_i$ 는 강우사상별 실측 값,  $P_i$ 는 평가시스템에서의 강우사상별 예측 값,  $\bar{O}_i$ 는 모의기간동안의 강우사상별 실측값의 평균값을 의미한다.

Ramanarayanan et al. (1997)는 적용성 평가에서  $R^2$ 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제시하였으며, Donigian (2000)가 제시한 일반적인 모형의 효율 범위와 신뢰 구간은 Table 3과 같다.

Table 3. Criteria for evaluating model performance

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

그리고 RMSE 산정공식은 다음과 같다(식 (12)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n [Q_o(t) - P_s(t)]^2}{n}} \quad (12)$$

Table 4. Comparing of runoff and sediment yield by manual calibration and auto calibration result

Class	Evaluation indicator	Manual calibration (Kum et al., 2012)	Auto calibration
Runoff	$R^2$	0.91	0.92
	NSE	0.86	0.92
Sediment yield	Total amount	16.5	14.11

여기서  $Q_o(t)$ 는 강우사상별 실측 값,  $P_s(t)$ 는 평가시스템에서의 강우사상별 예측값을 의미한다.

유출에 대한 비교 결과  $R^2$ 는 0.92, NSE는 0.92로 Ramanarayanan et al. (1997)와 Donigian (2000)가 제시한 기준을 모두 충족하였고, RMSE는  $0.3 \text{ m}^3$ 으로 매우 만족스러운 결과를 얻었다. 그리고 유사에 대해서는 실측 조건에 따른 제한으로 실측 유사 자료 대안으로 총 유사량을 모의기간 동안의 유출량 비율로 분배하여 관측 유사 자료로 활용하였고, 자동 보정 결과  $R^2$ 는 0.94, NSE는 0.94 그리고 RMSE는  $0.0027 \text{ kg}$ 로 나타났다. HRSM4BMP 모형의 자동 보정 틀 적용에 따른 모형 적용성은 매우 높은 것으로 판단된다. 실제 관측 자료를 이용한 유출 자동 보정 결과를 보면 Kum et al. (2012)의 연구에서 시행착오법에 의한 보정 결과보다 더 좋은 보정 결과를 얻을 수 있었다. 비교 결과 자동 보정 틀 사용시 유출은  $R^2$  0.01, NSE 0.06 높았으며, 유사에 대해서는 실측과의 차이가 자동 보정 틀 사용시 더 작게 나타났다(Table. 4).

#### 4. 결론

본 연구에서는 HRSM4BMP 유출량 및 유사량 자동 보정 틀을 개발하였다. 자동 보정 틀은 다양한 최적 보정 기법 중 PARASOL 방법을 이용하여 개발되었고, 보정시 변수에 따른 최대/최소치 설정하여 매개변수의 허용범위를 내에서 최적 변수 조정이 가능하다. 개발된 자동 보정틀을 강원도 춘천시 서면 방동리에 조성된 시험포에 적용한 결과 유출은  $R^2$  0.92, NSE 0.92, RMSE  $0.3 \text{ m}^3$ 으로 모형의 모의치가 관측치와 매우 근사한 결과값을 보였다. 그리고 유사에 대해서는 모의기간동안의 총 실측 유사량을 유출량 비율로 분배하여 이용하였기 때문에 불확실성이 내재되어 있지만  $R^2$  0.94, NSE 0.94, RMSE  $0.0027 \text{ kg}$ 으로 매우 높은 적용 결과를 보였다. 하지만 유사 발생은 유출량에 가장 큰 영향을 받기 때문에 실측 유출량 비율을 이용하여 산정한 유사량을 이용한 적용성 결과로 보아 실제 실측된 유사 자료를 적용하였을 때에도 적용성에는 크게 문제가 없을 것으로 판단된다.

기존의 시행착오법에 의한 보정은 사용자가 어느 정도의 보정 결과값을 얻게 되면 사용자는 그 때의 매개변수를 최적 매개변수로 간주하고 모형에 적용하여 장기적 분석을 시행한다. 하지만 최적의 매개변수를 이용하지 않을 경우 장기적인 분석시에는 큰 오차를 범할 수 있는 위험이 내재되어 있다. 특히 Kum et al. (2012)의 연구 결과를 비교해

보면 자동 보정 틀의 필요성을 극명하게 보여준다. 동일 대상 지역에 대해 시행착오법에 의한 유출 보정 결과 Kum et al. (2012)은 0.86의 NSE를 제시하였다. NSE 수치로 보면 분명 보정이 잘 이루어진 것으로 판단할 수 있지만, 본 연구에서 개발한 자동 보정틀을 개발하여 0.92의 NSE 값을 얻을 수 있었다. 이러한 차이는 장기 유출 및 유사량 분석 시 큰 차이가 발생할 수 있으며, 이러한 차이는 장기 BMP 저감효과 산정시 큰 오류와 오차가 발생할 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 개발된 자동 보정 틀을 이용하면 어느 누구나 객관적이고 합리적인 최적 매개 변수 조정이 가능하며, 신뢰성 있는 유출/유사 자료를 바탕으로 BMP 저감효과 산정이 가능할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 국립환경과학원(과제번호: 2012-nier-1946-342-02, 비점관리 고시지역 BMPs 적용에 따른 삭감효과 산정모델 개발(2))의 연구 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- Abbaspour, K. C. (2007). *User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs*, Swiss federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Deubendorf, Switzerland, pp. 1-33.
- Box, G. E. P. and Tiao, G. C. (1973). *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, Addison-Wesley-Longman, Reading, Mass.
- Donigan, A. S. (2000). *HSPF Training Workshop Handbook and CD, Lecture #19, Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22*. EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C., USA.
- Duan, Q., Gupta, V. K., and Sorooshian, S. (1993). A Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization, *Journal of Optimization Theory Application*, 76(3), pp. 501-521.
- Duan, Q., Gupta, V., and Sorooshian, S. (1994). Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models, *Journal of hydrology*, 158, pp. 265-284.
- Han Basin Commission (2008). *Han-kang-soo-gye-tak-soo-ju-kam-da-chaek ma-ryeon-eul wi-han yeon-gu*, pp. 152-153. [Korean Literature]
- Jung, J. W., Jang, J. R., Lim, B. J., Lee, Y. J., Kim, K. S., Kang, J. H., Park, H. L., Cho, S. H., and Yoon, K. S. (2011). Simulation of Stream Flow Using SWAT Auto Calibration Tool over the Saemangeum Watershed, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 19(1), pp. 11-17. [Korean Literature]
- Kang, H. W., Ryu, J. C., Kang, H. S., Choi, J. W., Moon, J. P., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2012). Enhancement and Application of SWAT Auto-Calibration using Korean Ministry of Environment 8-Day Interval Flow, Water Quality data, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(2), pp. 247-254. [Korean Literature]
- Kang, T. U., Lee, S. H., Kang, S. U., and Park, J. P. (2012). A Study for an Automatic Calibration of Urban Runoff Model by the SCE-UA, *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(1), pp.15-27. [Korean Literature]
- Kim, H. K., Kang, M. S., Park, S. W., Choi, J. Y., and Yang, H. J. (2009). Auto-calibration for the SWAT Model Hydrological Parameters Using Multi-objective Optimization Method, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 51(1), pp. 1-9. [Korean Literature]
- Kim, J. K., Son, K. H., Noh, J. W., and Lee, S. U. (2008). Estimation of Suspended Sediment Load in Imha-Andong Watershed using SWAT Model, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 30(12), pp. 1209-1217. [Korean Literature]
- Kum, D. H., Ryu, J. C., Choi, J. W., Shin, M. H., Shin, D. S., Cheon, S. U., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2012). Development and Evaluation of Runoff-Sediment Evaluation System and BMPs Evaluation Modules for Agricultural Fields using Hourly Rainfall, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(3), pp. 375-383. [Korean Literature]
- Lee, J. Y. (2008). A Hydrological Analysis of Current Status of Turbid Water in Soyang River and Its Mitigation, *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 13(6), pp. 85-92. [Korean Literature]
- Lee, K. S. and Kim, S. U. (2001). Automatic Calibration of SSARR Model with Genetic Algorithm, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 21(3), pp. 171-183. [Korean Literature]
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. E. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I-A Discussion of Principles, *Journal of hydrology*, 10(3), pp. 282-290.
- Park, C. W., Sonn, Y. K., Zhang, Y. S., Hong, S. Y., Hyun, B. K., Song, K. C., Ha, S. K., and Moon, Y. H. (2010). Soil Erosion Risk Assessment in the Upper Han River Basin Using Spatial Soil Erosion Map, *Korean Journal of Soil Science & Fertilizer*, 43(6), pp. 826-836. [Korean Literature]
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management, *ASAE International Meeting*, Paper 97-2209, pp. 1-7.
- Rural Development Administration. (2012). <http://www.rda.go.kr/>
- Shin, M. H., Won, C. H., Park, W. J., Choi, Y. H., Jang, J. R., Lim, K. J., and Choi, J. D. (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. [Korean Literature]
- Van Griensven A. and Meixner, T. (2007). A Global and Efficient Multi-objective Auto-calibration and Uncertainty Method for Water Quality Catchment Models, *Journal of Hydroinformatics*, 9, pp. 277-291.
- Watry, G., Ames, D. P., and Michaelis, C. (2007). *Introduction to MapWindow Version 4.3*, Florida State University, USA, pp. 1-136.