

환경부 8일 유량·수질 자료를 이용한 SWAT 자동보정 모듈 개선 및 적용 평가

강현우·류지철·강형식*·최재완**·문종필***·최중대·임경재†

강원대학교 지역건설공학과
*한국환경정책평가연구원
**국립환경과학원 수질총량연구과
***국립농업과학원

Enhancement and Application of SWAT Auto-Calibration using Korean Ministry of Environment 8-Day Interval Flow/Water Quality data

Hyunwoo Kang · Jichul Ryu · Hyungsik Kang* · Jaewan Choi** · Jongpil Moon*** · Joongdae Choi · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

*Korea Environment Institute

**National Institute of Environmental Research

***National Academy of Agricultural Science

(Received 15 November 2011, Revised 12 January 2012, Accepted 12 January 2012)

Abstract

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model has been widely used in estimation of flow and water quality at various watersheds worldwide, and it has an auto-calibration tool that could calibrate the flow and water quality data automatically from thousands of simulations. However, only continuous measured day flow/water quality data could be used in the current SWAT auto-calibration tool. Therefore, 8-day interval flow and water quality data measured nationwide by Korean Ministry of Environment (MOE) could not be used in SWAT auto-calibration even though long-term flow and water quality data in the Korean Total Maximum Daily Load (TMDL) watersheds available. In this study, current SWAT auto-calibration was modified to calibrate flow and water quality using 8-day interval flow and water quality data. As a result of this study, the Nash and Sutcliffe Efficiency (NSE) values for flow estimation using auto-calibration are 0.77 (calibration period) and 0.68 (validation period), and NSE value for water quality (T-P load) estimation (using the 8-day interval water quality data) is 0.80. The enhanced SWAT auto-calibration could be used in the estimation of continuous flow and water quality data at the outlet of TMDL watersheds and ungaged point of watersheds. In the next study, the enhanced SWAT auto-calibration will be integrated with Web based Load Duration Curve (LDC) system, and it could be suggested as methods of appraisal of TMDL in South Korea.

keywords : Auto-calibration, Pollutant load, SWAT model, 8-day interval flow/water quality data

1. 서론

강우에 의한 유출 분석 및 비점오염원 배출에 따른 수질/부하량 분석은 수자원의 활용 및 유역의 수질 관리·개선에 매우 중요한 인자이다. 우리나라의 경우 여름철에 집중되는 강우 특성 때문에 강우의 시간적 불균형이 심각하여 수자원 관리 여건이 열악하고(김종태 등, 2011), 유역의 수질 및 부하량 분석에 있어 유역의 다양한 지형적·환경적 특성을 모두 반영하기 어렵기 때문에 강우에 의한 비점오염원 배출특성을 객관화·정량화하기에는 한계가 있다(장재호 등, 2009). 강우에 따른 유출, 비점오염원 발생 및 거동의 시간적·공간적 변화를 정확히 예측하고, 이를 분석하기 위하여

HSPF (Hydrological Simulation Program in Fortran; Bicknell et al., 2001), ANSWERS (Beasley et al., 1980), CREAMS (Frere et al., 1980), AGNPS (Young et al., 1987) 등의 다양한 모형이 지난 수 십년동안 사용되어 왔으며, 최근 SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998) 모형의 적용과 개선에 대한 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있다(Akhavan et al., 2010; Jang et al., 2011; Jung et al., 2011; Ryu et al., 2011). SWAT 모형은 Geographic Information System (GIS)를 기본 인터페이스로 하고 있으며 내부 코드가 공개되어 있기 때문에 사용자가 자체 코드 수정을 통하여 모형을 개선시킬 수 있는 장점이 있다. 이와 같은 SWAT 모형의 적용성 및 예측 정확도에 대하여 많은 검증이 이루어지고 있지만, 유량 및 수질 예측에 있어 많은 불확실성을 가지고 있기 때문에 매개변수 조정을 통한 모형의 보정 및 검증 과정은 모형의 정확성 판정을

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

위해 매우 중요하다. 하지만 보정 및 검정 작업은 주로 수작업으로 이루어지기 때문에, 많은 인력과 시간을 필요로 하는 단점이 있다(Jang et al., 2011). SWAT 모형에는 유량 및 수질 보정의 간편화를 위하여 매개변수를 자동으로 변화시켜 모형을 보정하는 자동보정(Auto-calibration; Van Griensven et al., 2002) 기능이 탑재되어 있는데, 그 편리성과 높은 적용성 때문에 많은 수문/수질 모델링 관련 연구에서 사용되고 있다(Gupta et al., 1999; Van Griensven et al., 2002; Van Griensven and Bauwens, 2003).

과거 우리나라의 수질관리는 생활하수, 산업폐수 등의 배출허용기준(농도) 설정에 의하여 관리되었으나, 산업화·도시화 등으로 오·폐수 배출량이 증가하여 개별 오염원이 배출허용기준을 준수하더라도 하천에 유입되는 오염물질의 총량이 증가하여 유역의 수질관리에 어려움이 가중되었다. 이에 정부에서는 유역에서 배출되는 오염물질의 배출총량이 허용총량이하로 관리하고 하천의 수질이 회복 될 수 있도록 수질오염총량관리제도를 도입하여 실제 단위 유역에 적용하고 있다(환경부, 2004). 환경부에서는 수질오염총량관리 기본방침에 따라 수질오염총량관리 목표수질지점에 대한 수질·유량조사를 실시하고 있으며 이를 환경부 수질·유량 측정망 시스템(<http://water.nier.go.kr/>)(수질유량측정망 시스템, 2011)에서 제공하고 있다. 수질·유량 측정망 시스템에서는 수질오염총량관리제 단위 유역의 8일 간격 유량 및 수질자료(BOD, Total Nitrogen, Total Phosphorus 등)를 제공하고 있으며 측정망의 위치 정보 및 측정 자료 조회가 가능하다.

수질·유량 측정망 시스템에서 제공하는 방대한 양의 유량 및 수질자료를 SWAT 자동보정의 실측자료로 사용하여 모형 보정에 활용한다면 측정 지점 외 유량 및 수질 특성을 파악하고 일 유량 및 수질자료를 산정하는데 큰 도움이 될 것이라 판단된다. 또한 이는 8일 간격 유량 및 수질 자료가 나타낼 수 있는 여러 문제점을 보완하는데 사용될 수 있을 것이라 여겨진다. 하지만 현재 SWAT 자동보정은 유

량 및 수질자동보정에 연속된 일, 월, 년도별 실측자료를 필요로 하기 때문에, 환경부 8일 간격 유량 및 수질자료를 SWAT 자동보정에 실측 자료로 사용하기에 많은 문제점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 1) SWAT 내부 Source code를 수정하여 8일 유량 및 수질 자료를 이용한 자동보정이 가능 하도록 모형을 개선하는 것과, 2) 개선된 SWAT 자동보정을 실제 유역에 적용하여 이를 평가함에 있다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

본 연구의 연구대상지역은 강원도 홍천군에 위치한 홍천강 유역으로 한강 중권역 유역이고 내촌천, 홍천강 하류 등 14개 소권역으로 분류된다(Fig. 1). 홍천강 유역의 유역면적은 1,566.06 km², 유역평균경사 39.3%, 유역평균고도 366.51 m, 유로연장은 106.1 km이며 연평균 강수량은 1387.1 mm이다(환경부, 2009). 토지이용은 임야 82.52%, 전 6.22%, 답 4.27%, 대지 2.15%로 산림과 농업지역이 대부분을 차지한다(환경부, 2009).

2.2. SWAT 모형의 개요 및 입력자료

SWAT 모형은 미국 농무성 농업 연구소(United States Department of Agricultural Research Service, USDA ARS)에서 개발된 유역 모형으로, 유역의 지형, 강수량, 토지이용, 토양 상태에 따른 수문 및 수질, 농업화학물질의 거동에 대한 특성을 모의하기 위하여 개발되었다(Neitsch et al., 2005a, 2005b).

SWAT 모형의 입력자료는 유역의 지형정보를 담고 있는 수치표고모형(Digital Elevation Model: DEM), 연구기간의 기상자료(강수량, 최대 및 최저 온도, 풍속, 일조량, 상대습도), 공간적으로 분포하는 토지이용 현황 자료(Landuse)와 토양속성(Soil) 자료가 필요하다(Arnold, 1992; Arnold et al.,

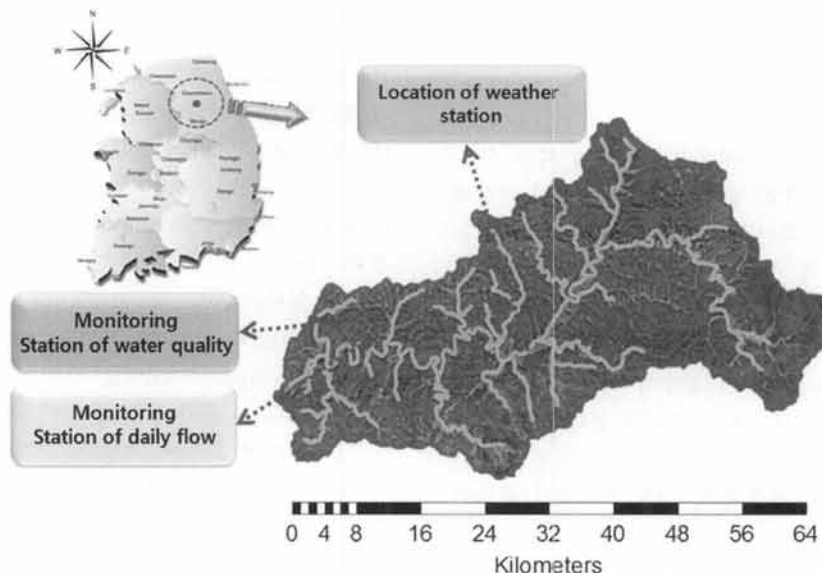


Fig. 1. Location of Hongcheon-gang watershed.

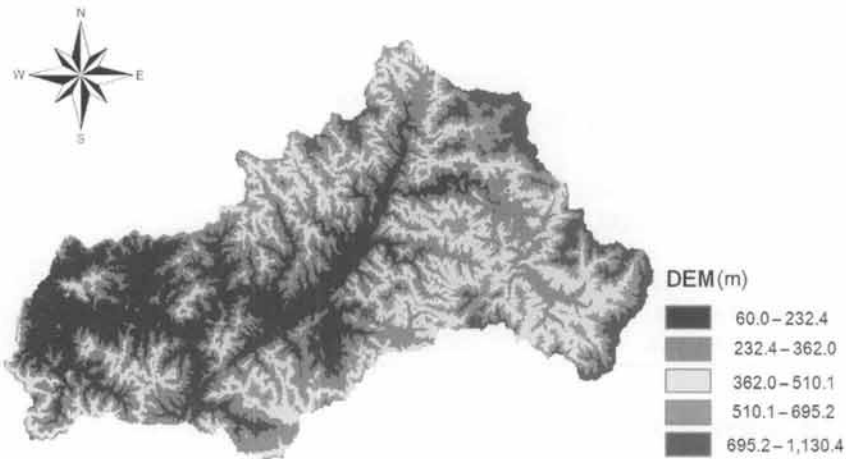


Fig. 2. Digital Elevation Model of study watershed.

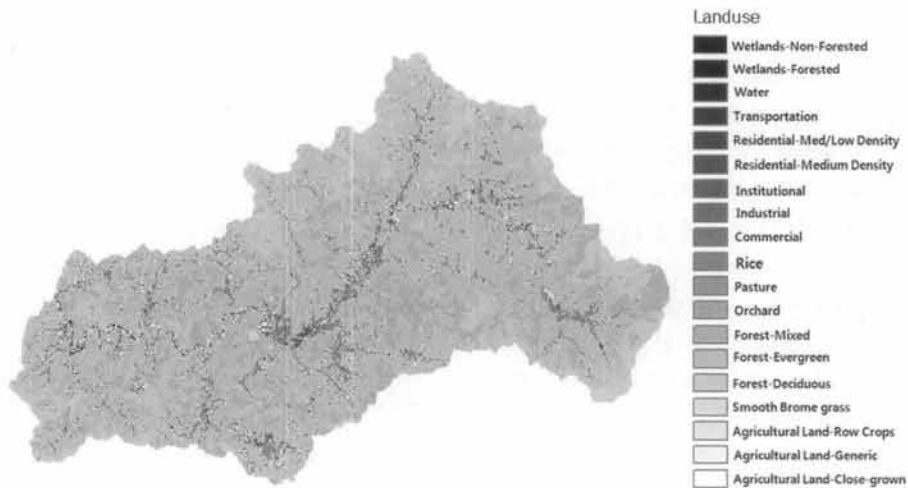


Fig. 3. Land uses of study watershed.

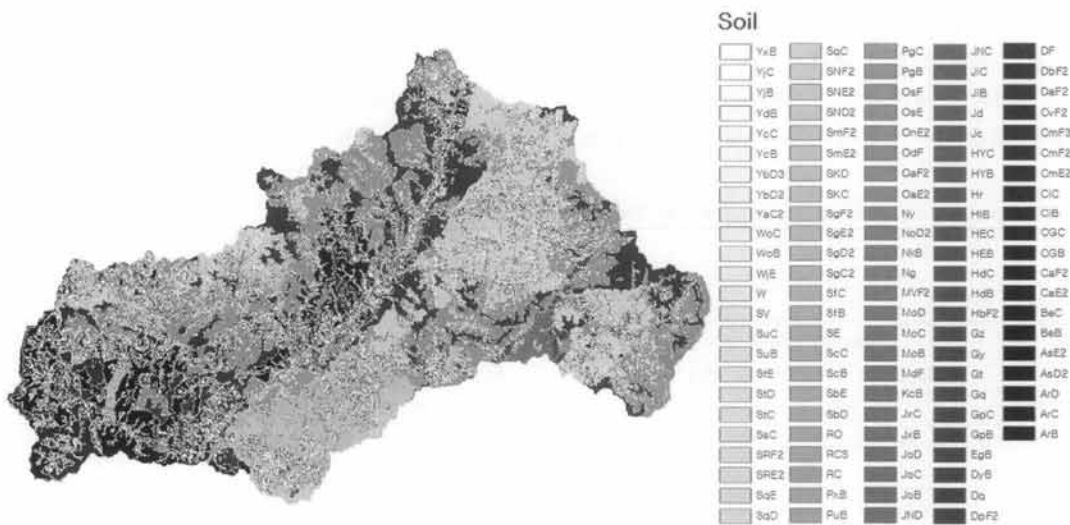


Fig. 4. Soil of study watershed.

1998). 본 연구에서는 국립지리원 1:5000 수치지도를 이용하여 홍천강 유역의 10m 격자의 DEM을 구축하였고(Fig. 2), 토지 이용도는 환경지리정보서비스에서(Environmental Geographic Information System: EGIS) 제공하는 1:25,000 중분류 토지

이용자료를 이용하였으며(Fig. 3) (Table 1), 토양도는 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하였다(Fig. 4). 또한 기상자료는 기상청에서 제공하는 홍천군 기상 관측소의 기상 및 강수량(2006~2009년)을 사용하였다.

Table 1. Soil legend

Silty clay loam	Loam	Silt loam	Loamy coarse sand	Sandy loam soil
ArB, ArC, ArD, HiB, KcB, SfC, SqC, SqD, SqE, YjB, YjC	AsD2, AsE2, DaF, GpB, GpC, Gq, Gt, Gy, HYB, HYC, MdF, MoB, MoC, MoD, MVF2, NkB, NoD2, Pgb, PgC, PxB, SgE2, SgF2, SbD, SbE, ScB, ScC, SNE2, SNF2, SRE2, SRF2, SsC, WjE, YcB, YcC, YdB, YxB	BeB, BeC, CaE2, CaF2, CGB, CGC, CiB, CiC, CmE2, CmF2, CmF3, CvF2, DbF2, DF, DpF2, Dq, DyB, GZ, HbF2, HdC, HEB, HEC, Hr, JiB, JiC, OnE2, OsE, Ng, PuB, RC, RCS, RO, SE, Sfb, SgD2, SmE2, SmF2, StC, StD, StE, SuB, SuC, SV, WoB, WoC, YaC2, YbD2, YbD3	EgB	Jc, Jd, JNC, JND, JoB, JoC, JoD, JxB, JxC, Ny, OaE2, OaF2, OdF, SgC2, SKC, SKD, SND2,

2.3. SWAT 자동보정을 이용한 유량 보정

SWAT 모형에는 유역의 유량 및 수질 매개변수를 자동으로 보정할 수 있는 자동보정(Auto-calibration; Van Griensven et al., 2002)기능이 탑재되어 있다. 본 연구에서는 8일 간격 수질 자료를 이용한 수질 보정 작업 전에 기존의 SWAT 자동보정 기능을 이용하여 홍천강 유역의 유량 매개변수를 추정하였다. 일 유량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(2011)에서 제공하고 국토해양부에서 관리하는 서면 관측소의 2008~2009년의 자료를 사용하였고 이를 자동보정에 이용하였다. 또한 2010년 1월~2011년 5월의 일 유량 자료를 사용하여 추정된 유량 매개변수를 검증 하였다.

SWAT 자동보정으로 매개변수를 추정할 때, 보정에 사용되는 변수를 사용자 임의로 선택 할 수 있는데, 본 연구에서는 유량과 관련된 27개의 매개변수 중 민감도 분석(Sensitive Analysis)을 통해 추정된 상위 12개의 매개변수를 자동보정에 이용하였다(Table 2). SWAT 자동보정은 보통 수천 번 이상의 모형 연산을 통하여 최적의 매개변수를 추정하는데, 각 연산마다 매개변수를 자동으로 변환하고, 매개변수를 변화시키는 방법(Variation Method)에는 3가지가 있다. 첫 번째 방법은 'Replace by value'로 각 연산마다 매개변수 값을 주어진 범위 내에서 직접 바꿔주는 방법이고, 'Add to value'는 매개변수의 기본 값에 주어진 범위만큼 가감하여 대입하는 방법이며, 마지막 'Multiply by

value'는 매개변수의 기본 값에 주어진 범위만큼의 비율을 곱한 뒤 곱한 값을 기본 값에 가감하는 방법이다. SWAT 자동보정에 사용된 각 매개변수의 Variation Method 및 범위(Lower Bound, Upper Bound)는 Table 2에 명시되어 있다.

2.4. SWAT 자동보정 모듈의 개선 및 적용

SWAT 자동보정은 일 유량 및 수질 보정 시, 연속된 실측 일 자료를 필요로 한다. 하지만 우리나라의 경우 연속된 일 유량 실측자료는 많은 유역에서 제공받을 수 있지만, 수질 자료의 경우 수질유량측정망시스템(2011)에서 제공하는 8일 간격 수질 자료 외에는 많은 유역에서의 장기간의 실측 자료를 얻기가 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 8일 간격 수질 자료로도 자동보정이 가능하도록 SWAT 모형의 내부 Source code를 수정하였다. 개선된 자동보정의 적용 전, 같은 유역의 다른 관측지점(서면 관측소)의 연속된 일 유량 자료를 이용하여 유역의 유량 매개변수를 추정하였으며 그 이후에 개선된 SWAT 자동보정을 이용하여 수질 매개변수를 보정하였다. 자동보정에 사용된 수질자료는 수질유량측정망시스템(2011)에서 제공하는 홍천A 지점의 2008~2009년의 8일 간격 총인(Total Phosphorus: T-P) 자료와 같은 지점의 유량 자료로 계산된 일 부하량 자료이며, 일 부하량 계산식은 식 (1)과 같다. 연구기간동안 홍천A 지점에서 수질 자료는 87번 측정되었으며, 일 유량 관측

Table 2. Twelve parameters used in auto-calibration for flow estimation

Parameter	Description	Variation method	Lower bound	Upper bound	Rank of sensitive analysis
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Replace by value	0	1	1
BLAI	Maximum potential leaf area index	Replace by value	0	1	8
CANMX	Maximum canopy storage	Replace by value	0	10	7
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by value	0	150	3
CH_N2	Mannings' "n" value for the main channel	Replace by value	0	1	2
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Multiply by value (%)	-25	25	4
GW_DELAY	Groundwater delay	Add to value	-10	10	11
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow	Add to value	0	2500	12
SLOPE	Increase the lateral flow	Multiply by value (%)	-25	25	10
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	Multiply by value (%)	-25	25	9
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	Multiply by value (%)	-25	25	6
SURLAG	Surface runoff lag time	Replace by value	0	10	5

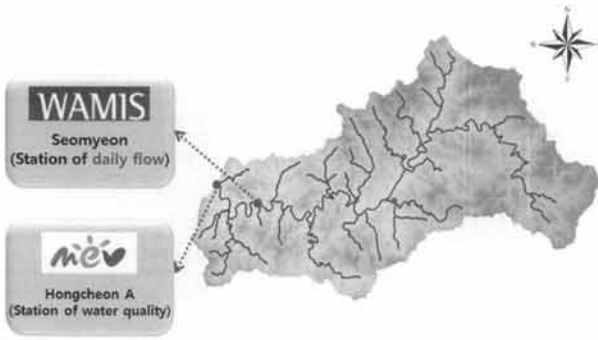


Fig. 5. Monitoring station of daily flow and 8-day interval water quality data.

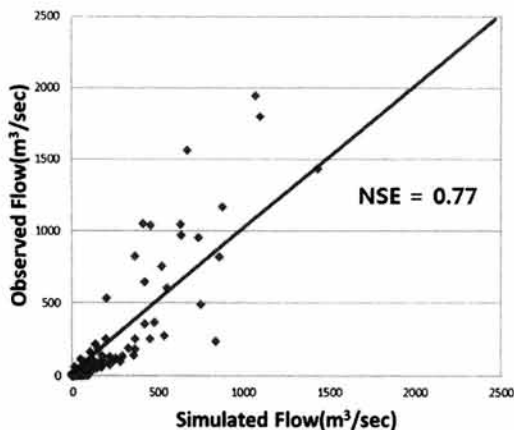
Table 3. Location of monitoring station

Monitoring station	Longitude	Latitude
Hongcheon A (Station of water quality)	127-35-27	37-43-22
Seomyeon (Station of daily flow)	127-40-15	37-41-37

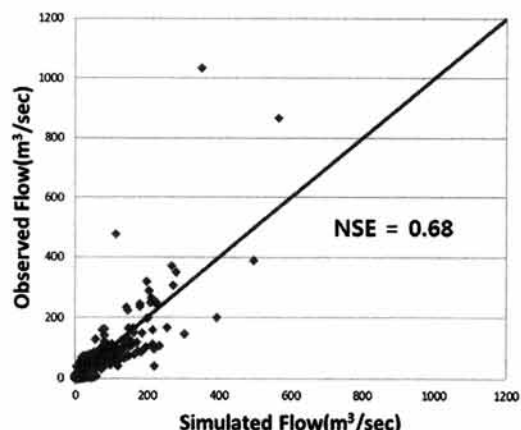
지점(서면 관측소)과 홍천A 지점의 위치는 Fig. 5, Table 3 와 같다. 또한 수질 자동보정에 사용된 11개 매개변수의 Variation Method 및 범위(Lower Bound, Upper Bound)는 Table 4와 같다.

Table 4. Eleven parameters used in auto-calibration for water quality estimation

Parameter	Description	Variation method	Lower bound	Upper bound
NPERCO	Nitrogen percolation coefficient	Replace by value	0	1
PHOSKD	Phosphorus soil partitioning coefficient	Replace by value	100	200
PPERCO	Phosphorus percolation coefficient	Replace by value	10	18
SOL_LABP	Initial labile P concentration [mg/kg]	Replace by value	0	1
SOL_NO3	Initial NO3concentration[mg/kg]	Replace by value	0	5
SOL_ORGN	Initial organic N concentration [mg/kg]	Replace by value	0	1
SOL_ORGP	Initial organic P concentration [mg/kg]	Replace by value	0	5
SPCON	Lin. re-entrainment parameter for channel sediment routing	Replace by value	0.0001	0.01
SPEXP	Exp. re-entrainment parameter for channel sediment routing	Replace by value	1	2
USLE_C	Minimum USLE cover factor	Multiply by value (%)	-25	25
USLE_P	USLE support practice factor	Replace by value	0	1



(a) Calibration period



(b) Validation period

Fig. 6. NSE from SWAT auto-calibration for flow estimation.

$$\text{Load (kg/day)} = \text{Flow (m}^3/\text{sec)} \times \text{WQD (mg/L)} \times 86.4 \quad (1)$$

WQS : Water Quality data

3. 결과 및 고찰

3.1. 유량 자동보정 결과

본 연구에서는 SWAT 자동보정을 이용하여 SWAT 모형으로 모의된 유량을 검·보정 하였다. 서면 관측소의 2008~2009년 2년 동안의 실측 일 유량을 자료를 사용하였고, 유량에 민감한 12개의 매개변수로 자동보정 하였다. 또한 2010년 1월~2011년 5월 기간의 일 유량 자료로 추정된 매개변수를 검정하였다.

자동보정 결과 최적 매개변수(Best parameters)는 Table 5 와 같으며, 최적 매개변수로 보정된 일 유량은 보정기간에 NSE (Nash and Sutcliffe efficiency; Nash and Sutcliffe, 1970) 가 0.77, 검정기간에 0.68로 나타나 검·보정 기간 모두 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 6). Donigan and Love (2003)의 연구에 따르면, 일 유량 비교의 경우 NSE 가 0.6 이상이면 Fair 하다고 보았는데, 본 연구의 자동보정 및 검증 결과는 이를 만족시키는 것으로 나타났다(Table 6).

3.2. 개선된 SWAT 자동보정을 이용한 T-P 보정

본 연구에서는 환경부 8일 간격 수질자료를 SWAT 자동

Table 5. Best parameters of auto-calibration for flow estimation

Parameter	Value	Variation Method
ALPHA_BF	0.8572	Replace by value
BLAI	0.5429	Replace by value
CANMX	6.6128	Replace by value
CH_K2	34.5530	Replace by value
CH_N2	0.7025	Replace by value
CN2	10.5490	Multiply by value (%)
GW_DELAY	-3.9050	Add to value
GWQMN	1785.8000	Add to value
SLOPE	-19.2710	Multiply by value (%)
SOL_AWC	19.5940	Multiply by value (%)
SOL_K	-8.4989	Multiply by value (%)
SURLAG	0.5797	Replace by value

Table 6. Criteria for evaluating model performance (Donigan and Love, 2003)

	Poor	Fair	Good	Very good
Daily flows	<0.60	0.60 ~ 0.70	0.70 ~ 0.80	>0.80
Monthly flows	<0.65	0.65 ~ 0.75	0.75 ~ 0.85	>0.85

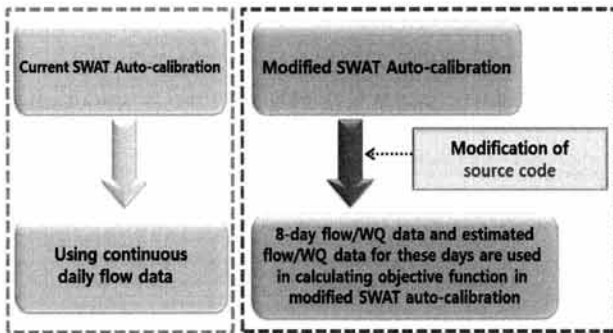


Fig. 7. Modification of SWAT source code.

Table 7. Best parameters of auto-calibration for water quality estimation

Parameter	Value	Variation Method
NPERCO	0.0567	Replace by value
PHOSKD	189.1800	Replace by value
PPERCO	14.9520	Replace by value
SOL_LABP	0.1024	Replace by value
SOL_NO3	1.9910	Replace by value
SOL_ORGN	0.5686	Replace by value
SOL_ORGP	0.0810	Replace by value
SPCON	0.0053	Replace by value
SPEXP	1.0751	Replace by value
USLE_C	11.9320	Multiply by value (%)
USLE_P	0.5252	Replace by value

보정의 실측 자료로 활용하기 위하여 SWAT의 내부 Source code를 수정하여(Fig. 7), 불규칙하게 측정된 수질 자료가 자동보정에 정확히 적용될 수 있도록 하였다. 개선된 SWAT 자동보정을 이용하여 추정된 최적 수질 매개변수는 Table 7과 같으며, 최적 매개변수로 추정된 T-P일 부하량과 8일 간격 T-P일 부하량 자료 중 일자가 같은 자료를 선별하여 비교한 결과 보정기간동안 NSE가 0.80로 높은 신뢰도(Very Good)를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 8).

3.3. 개선된 SWAT 자동보정의 적용성 검토

환경부 수질유량측정망시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서는 수질오염총량제 단위 유역의 8일 간격 유량 및 수질 자료를 제공하고 있으나, 실제 관측 간격은 불규칙하여 1년 평균 40회 안팎의 자료가 수집되고 있다. 이는 강수량이 상대적으로 적어 유량 변동과 비점오염원 배출이 적은 갈수기, 저수기에는 부하량 산정에 적은 영향을 미치지만, 홍

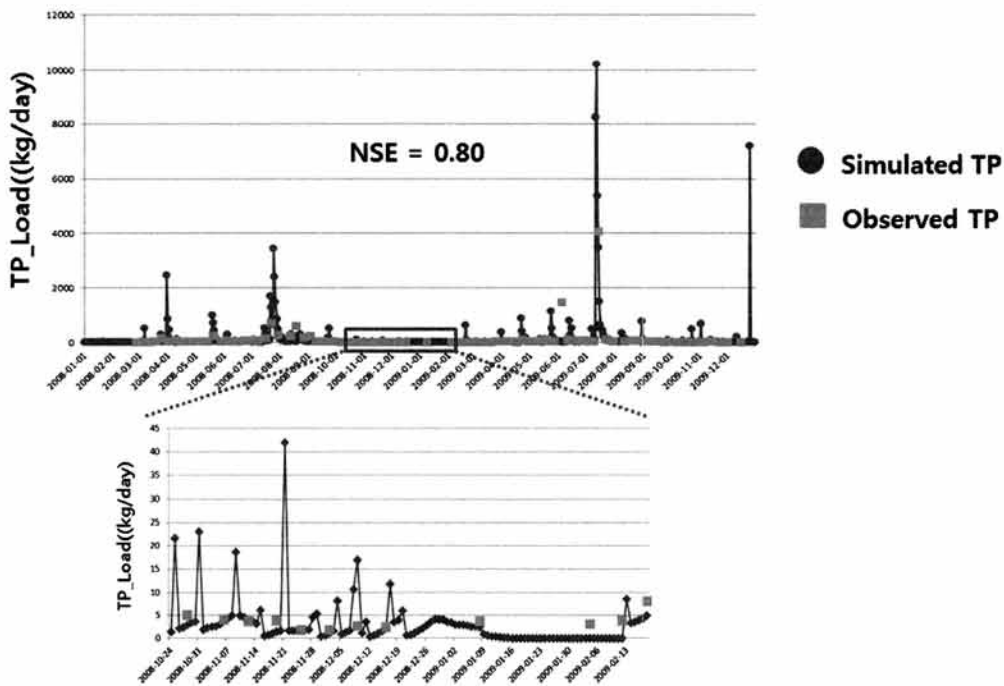


Fig. 8. Results of auto-calibration using modified SWAT engine.

Table 8. Comparison of daily and 8-day interval flow

DATE	Daily Flow(Seomyeon)	8-day interval(Hongchoen A)
2009-07-08	6.94	13.57
2009-07-09	1040.11	-
2009-07-10	1041.09	-
2009-07-11	276.64	-
2009-07-12	1803.65	-
2009-07-13	1166.05	-
2009-07-14	1437.03	581.64
2009-07-15	1948.53	-
2009-07-16	488.48	-
2009-07-17	234.56	-
2009-07-18	817.89	-

수기와 같이 일별 유량 변동이 매우 심한 시기에는 부하량 산정에 큰 문제를 일으킬 수 있다. 실제로 연구기간 동안 같은 유역에 위치하는 서면 관측소와 홍천A 지점의 유량을 비교한 결과, 서면 관측소의 일 최대 유량은 2009년 7월 15일(1948.53 m³/s)과 7월 12일(1803.65 m³/s)에 발생하였으나 홍천 A 지점에서는 같은 날짜에 유량을 측정하지 않은 것으로 나타났다(Table 8). 이는 8일 간격 유량 측정의 문제점을 나타냄과 동시에 일 부하량·삭감 부하량 산정에도 차이를 보일 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 개선된 SWAT 자동보정을 이용한다면, 8일 유량 및 8일 수질 자료를 이용한 모형의 검·보정이 가능하고, 검·보정된 SWAT 모형을 이용하면 일 유량 및 오염물질의 일 부하량 추정이 가능하기 때문에 8일 간격 자료가 가지는 문제점을 해결하는데 기여하고 모니터링 및 수질 분석에 소요되는 인력 및 비용을 절감하는데 도움을 줄 수 있을 것이라 판단된다. 또한 조금 더 정확한 수질오염총량제 단위유역별 삭감 부하량을 산정하는데 이용될 수 있을 것이라 판단된다. 또한 개선된 SWAT 자동보정 모듈은 Web 기반 LDC 시스템(Kim et al., 2012, <http://www.EnvSys.co.kr/~ldc>)과 유량산정 모듈과 연계되어 수질오염총량제의 객관화·정량화된 이행평가에 적용 될 수 있을 것이라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 SWAT 자동보정의 Source code를 수정하여 8일 간격 수질 자료가 SWAT 자동보정의 실측자료로 사용될 수 있도록 하였으며 이를 실제 유역에 적용하여 그 적용성을 평가하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공하는 서면 관측소의 일 유량 자료를 SWAT 자동보정의 실측자료로 활용하여 일 유량을 보정한 결과, 보정기간(2008~2009년)에 NSE 0.77, 검정기간(2010년1월~2011년5월)에 NSE 0.68로 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다.
- 2) 환경부 수질유량측정망시스템(<http://water.nier.go.kr/>)에서 제공하는 8일 T-P 자료를 개선된 SWAT 자동보정에 실

측 자료로 사용하여 T-P 부하량을 보정한 결과, 연구기간(2008~2009년)에 NSE 0.80으로 수질 보정 또한 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다.

- 3) 개선된 SWAT 자동보정은 일 유량 및 오염물질의 일 부하량 추정에 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 이는 8일 유량 및 수질 자료의 문제점을 해결하는데 도움을 주고 나아가 수질오염총량제도의 삭감 부하량 산정에 이용될 수 있을 것이다.
- 4) 또한 개선된 SWAT 자동보정은 미 계측 유역의 유량 및 수질을 산정하는데도 활용될 수 있을 것이며 이는 많은 연구에 실제 적용될 수 있을 것이라 판단된다.
- 5) 향후 개선된 SWAT 자동보정으로 추정된 일 유량 및 수질자료를 Web 기반 LDC 시스템(Kim et al., 2012, <http://www.EnvSys.co.kr/~ldc>)과 연계하는 시스템을 개발할 예정이며, 이는 유황별 수질 및 부하량 분석을 가능하게 하여, 조금 더 객관적이고 과학적인 수질오염총량제도의 이행평가 기준을 마련하는데 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 Eco-STAR Project (과제번호 EW07-II-06, 농촌비점오염원 제어를 위한 효율적인 관리 기술 개발)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

국가수자원관리종합정보시스템(2011). <http://www.wamis.go.kr/>.
 김종태, 정일문, 김남원, 정교철(2011). SWAT-MODFLOW를 이용한 영덕 오십천의 지하댐 타당성 연구, *대한지질공학회지*, 21(2), pp. 179-186.
 수질유량측정망시스템(2011). <http://water.nier.go.kr/>.
 장재호, 윤춘경, 정광욱, 이새봄(2009). BASIN/SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 오염부하 배출 특성, *한국하천호수학회지*, 42(2), pp. 200-211.
 환경부(2004). *수질오염총량관리 업무편람*, pp. 3.
 환경부(2009). *중권역 물환경관리계획(홍천강)*, pp. 11.
 Akhavan, S., Abedi-Koupai, J., Mousavi, S., Afyuni, M., Eslamian, S., and Abbaspour, K. C. (2010). Application of SWAT Model to Investigate Nitrate Leaching in Hamadan-Bahar Watershed, *Iran. Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4), pp. 675-688.
 Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization*, Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 1-186.
 Arnold, J. G., Srinivasan, R., King, K. W., Griggs, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I: Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
 Beasley, D. B., Huggins, F., and Monke, E. J. (1980). ANSWERS - A Model for Watershed Planning, *Transactions of the ASAE*, 23, pp. 938-939.
 Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, Jr., J. L., Jobs, T. H., and Donigan, Jr., A. S. (2001). Hydrologic Simulation

- Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, G.A., pp. 1-843.
- Donigian, A. S. and Love, J. T. (2003). *Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling*, WEF TMDL 2003, November 16-19, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM, Illinois, Chicago, pp. 1-20.
- Frere, M. H., Ross J. D., and Lane, L. J. (1980). The Nutrient Submodel. In : CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, *USDA Conservation Research Report*, 26, pp. 65-85.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., and Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration, *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), pp. 135-143.
- Jang, W. S., Moon, J. P., Kim, N. W., Yoo, D. S., Kum, D. H., Kim, I. J., Mun, Y., and Lim, K. J. (2011). SWAT Direct Runoff and Baseflow Evaluation using Web-based Flow Clustering EI Estimation System, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 27(1), pp. 61-72.
- 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.
- Kim, J., Engel, B. A., Park, Y. S., Theller, L., Chaubey, I., Kong, D. S., and Lim, K. J. (2012). Development of Web based Load Duration Curve System for Analysis of Total Maximum Daily Load and Water Quality Characteristic in a Waterbody, *Journal of Environmental Management*, 97(30), pp. 46-55.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models: Part I. A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005a). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*, USDA, ARS, Temple, Texas, pp. 1-522.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005b). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005*, USDA, ARS, Temple, Texas, pp. 1-476.
- Ryu, J., Cho, J., Kim, I. J., Mun, Y., Moon, J. P., Kim, N. W., Kim, S. J., Kong, D. S., and Lim, K. J. (2011). Enhancement fo SWAT-REMM to Simulate Reduction of Total Nitrogen with Riparian Buffer, *Transactions of the ASABE*, 54(5), pp. 1791-1798.
- Van Griensven, A. and Bauwens, W. (2003). Multi-objective Autocalibration for Semi-distributed Water Quality Models, *Water Resources Research*, 39(10), pp. 1348.
- Van Grienvan, A., Francos, A., and Bauwens, W. (2002). Sensitivity Analysis and Auto-calibration of an Integral Dynamic Model for River Water Quality, *Water Science and Technology*, 45(9), pp. 325-332.
- Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D., and Anderson, W. P. (1987). *AGNPS, Agricultural Non-point Source Pollution Model; A Watershed Analysis Tool*, USDA, ARS, Conservation Research Report 35, Washington D. C., pp. 77.