

갑천유역을 대상으로 SWAT 모형의 다 변수 및 다 지점 검보정

Multi-variable and Multi-site Calibration and Validation of SWAT for the Gap River Catchment

김정곤* / 손경호** / 노준우*** / 장창래**** / 고익환*****

Kim, Jeongkon / Son, Kyongho / Noh, Junwoo / Jang, Chang-Lae / Ko, Ick Hwan

Abstract

Hydrological models with many parameters and complex model structures require a powerful and detailed model calibration/validation scheme. In this study, we proposed a multi-variable and multi-site calibration and validation framework for the Soil Water Assessment Tool (SWAT) model applied in the Gap-cheon catchment located downstream of the Geum river basin. The sensitivity analysis conducted before main calibration helped understand various hydrological processes and the characteristics of subcatchments by identifying sensitive parameters in the model. In addition, the model's parameters were estimated based on existing data prior to calibration in order to increase the validity of model. The Nash-Sutcliffe coefficients and correlation coefficient were used to estimate compare model output with the observed streamflow data: R_{eff} and R^2 ranged 0.41-0.84 and 0.5-0.86, respectively, at the Heuduck station. Model reproduced baseflow estimated using recursive digital filter except for 2-5% overestimation at the Sindae and Boksu stations. Model also reproduced the temporal variability and fluctuation magnitude of observed groundwater levels with R^2 of 0.71 except for certain periods. Therefore, it was concluded that the use of multi-variable and multi-site method provided high confidence for the structure and estimated parameter values of the model.

keywords : multivariable and multi-site method, SWAT, baseflow, groundwater level, Recursive digital filter, Gap-cheon

- * 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, 공학박사
Corresponding Author, Principle Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea (e-mail: jkkim@kwater.or.kr)
- ** 한국수자원공사 수자원연구원 연구원, 공학석사
Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea
- *** 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, 공학박사
Senior Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea
- **** 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, 공학박사
Senior Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea
- ***** 한국수자원공사 수자원연구원 연구위원, 공학박사
Director, Water Resources and Environment Research Center, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

요 지

많은 수의 매개변수와 복잡한 구조를 가진 수문모형의 적용 시 세밀하고 강력한 모델 검·보정이 요구된다. 본 연구에서 금강유역에 위치한 갑천 소유역에 준 분포형 모형인 SWAT 모형을 이용하여 다 목적·지점 검·보정 방법을 제시하였다. 모형의 보정 전 민감도 분석을 통한 각 소유역별로 특성 분석이 이루어 졌고, 유출에 민감한 매개변수들을 추정하였다. 그리고 최소한의 보정을 통한 모형의 유효성을 높이기 위해, 관측된 데이터로부터 매개변수 값을 선보정하는 과정을 거쳤다. 그 결과 각 소유역 별로 다른 매개변수들의 민감도가 나타났다. 관측유량에 대한 보정 단계에서 R_{eff} 는 0.41-0.84, R^2 은 0.5-0.86 값으로 신뢰성 있는 결과를 얻었다. Recursive digital filter로 추정된 기저 유출량을 약 2% 범위에서 산정하였다. 관측 지하수 수위와의 비교에서도 전체적으로 관측된 지하수 수위의 시간적 변동추이와 변동 폭을 잘 나타내었으며, R^2 는 0.69로 만족스러운 결과를 보였다. 결론적으로, 다 목적·지점 방법의 사용은 모형의 구조와 추정된 매개변수들에 높은 신뢰도를 제공하였다.

핵심용어 : 다 목적·지점 방법, SWAT, 기저 유출, 지하수 수위, Recursive digital filter, 갑천

1. 서 론

분포형 모형과 같은 물리적 기반의 수문모형을 이용한 수자원과 관련된 복잡한 문제를 해결 하려는 노력이 증가하고 있다(Sorooshian and Gupta, 1995). 물리적 기반의 수문 모형들은 유역내의 공간특성 및 변화를 세밀히 나타낼 수 있는 장점을 가지는 반면, 모형의 복잡한 구조와 유역내에 존재하는 데이터만으로 추정하기에는 너무 많은 매개변수들을 필요로 하는 단점이 있다. 이와 같이 많은 매개변수를 가진 모형의 경우, 그 모형이 가지는 높은 효율성에도 불구하고, 모델 구조나 매개변수 값에 대한 신뢰도에 많은 의문이 제기되고 있다. 그러므로 이런 형태의 모형 적용 시 더 세밀한 검증 단계가 최우선적으로 요구된다. 하지만 실제적으로 대부분의 모형 검증이 하나의 목적 함수(대부분 유역의 최종 출구점에서 측정된 유량 값)를 이용하여 이루어져왔으며, 이러한 방법의 구조적 문제는 많은 연구를 통해 지적되어 왔다(Uhlenbrook et al., 1999; Hooper et al., 1988; Refsgaard, 1997). Uhlenbrook et al.(1999)은 HBV모형 적용 시 강우량과 유출량만으로는 비현실적인 모델 구조를 구분해 낼 수 없음을 증명했다. 그리고 Hooper et al.(1988)은 유출량으로 검증된 Birkenes 모형이 구조적 문제가 있음을 동위원소(^{18}O)를 이용하여 증명하였다.

이러한 문제점에 대한 대안으로 유출 곡선의 다 목적함수를 이용한 유효변수 값 추정과 유역에서 측정된 다양한 형태의 데이터를 이용하는 방법이 있다. 전자의 예로는 침투유량을 잘 맞추어 낼수록 높은 효율을 나타내는 Nash-Sutcliffe 계수(Nash and Sutcliffe, 1970)의 이용과, 기저유출량을 잘 맞추어 낼수록 더 높은 값을

내는 이 목적함수에 로그 값을 취한 두 목적함수를 동시에 이용할 경우 더 실질적인 유출량 모의뿐만 아니라 유효변수 값을 찾아낼 수 있는 가능성이 높아진다고 볼 수 있다. 그리고 후자의 예로는 최종 유역의 출구 점에서 측정된 유출량뿐만 아니라, 각 소유역 내의 유출량 분석을 통한 모형의 보정과, 보존성 추적자 이용, 지하수 수위 및 토양 수분 량 자료의 이용 등을 들 수 있다. McDonnell and Seibert(2002)는 동의원소를 이용하여 산출된 직접유출수(new water)와 토양수 및 지하수 형태의 유출수(old water)의 비율을 이용한 모형의 검증을 시도하였고, Franks et al.(1998)은 관찰된 습윤 지역 면적(saturated area)을 이용한 TOPMODEL의 검증 시 투수계수에 관련된 매개변수 값의 불확실성이 낮아짐을 증명하였다.

SWAT 모형의 경우 다양한 토지 이용 및 토양 성분을 바탕으로 공간적 시간적 분석이 용이하고, 수질 및 유사의 이동의 모의가 가능하기에 많은 목적을 위해서 사용되고 있다. 하지만 앞에서 언급하였듯이, 준 분포형 SWAT 모형은 유역내의 많은 매개변수들을 필요로 하고, 그 모든 매개변수들 값들을 유역의 모든 지점에서 시·공간적으로 추정할 수 없기 때문에 보정을 통해 추정된 매개변수 값과 모형 구조의 검증을 위해서 다 목적 함수 모델 검증이 불가피하다. Cao et al.(2005)의 경우 SWAT 모형의 검증을 위해서 각 소유역의 유출량뿐만 아니라 측정된 토양수분을 이용하였고, Hattermann et al.(2005)은 SWAT 모형과 비슷한 모델 구조를 가진 SWMM의 적용 시 유역에서 관찰된 지하수 수위를 이용한 검증을 실시하였다.

본 연구에서는 다양한 토지 이용도와 토양특성을 지닌 갑천유역을 대상으로 다 지점·목적 검·보증 방법

을 통한 물리적 준 분포형인 SWAT 모형을 구축하였다. 모델의 검증에는 세 가지 방법을 이용하였다. 첫째로 최종 유역 출구 점에서의 측정된 유출량뿐만 아니라, 각 주요 수계 지점에서 측정된 유출량을 이용한 모델의 검증, 두 번째로는 recursive digital filter(Arnold et al., 2000)를 이용한 기저유출량 산정법을 이용하여 기저유출량 예측에 관련된 모델 검증, 마지막으로 측정된 지하수 수위를 이용하여 모델의 검증을 실시함으로써 구축된 모형의 신뢰성을 높이도록 노력하였다.

2. 연구방법

2.1 SWAT 모형의 개요

연속적 준 분포형 모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 장기간에 걸친 다양한 토양 속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사량 및 농업화학물의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발되었다(Luzio et al., 2002; Neitsch et al., 2002). 기본

적으로 SWAT 모형은 수문, 토양유실, 영양물질, 그리고 하도추적 등 4개의 submodel 로 구성되어 있다. SWAT 모형의 입력 자료는 GIS를 통해 자동으로 구성되는 유역의 일반적인 자료와 토양자료 및 작물 자료가 있고, 수동 입력을 통해 작성되는 기상 하도추적 농업 관리 지하수 등의 자료, 그리고 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소 유역 자료로 구분된다. 또한 출력 자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응 단위(HRU)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과 값으로 구분된다(Luzio et al., 2002).

SWAT 모형의 수문 부분 산정절차를 Fig. 1에 나타내었다. Eq. (1)에 나타낸바와 같이 저류방정식에 의해 차단, 지표면 유출, 측면 유출, 침투, 기저 유출, 수로 손실, 증발산 등을 고려하여 일 단위로 물 수지를 산정한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - P_{erc} - Q_{gw}) \quad (1)$$

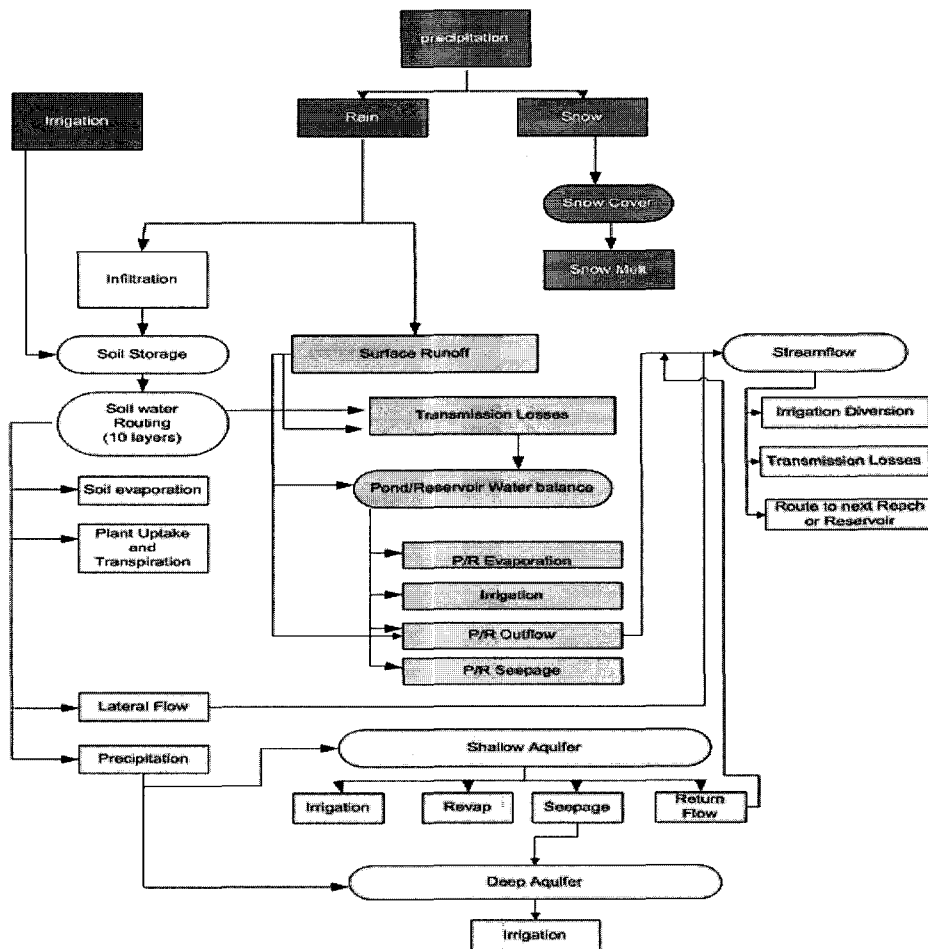


Fig. 1. Schematic of hydrological processes used in SWAT

여기서 SW_t 는 최종 토양수분량(mm H₂O), SW_0 는 i일의 초기 토양수분량(mm H₂O), t는 시간(일), R_{day} 는 i일의 강수량(mm H₂O), Q_{surf} 는 i의 지표유출량(mm H₂O), E_a 는 i일의 증발산량(mm H₂O), P_{erc} 는 i일의 토양층으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm H₂O), Q_{gw} 는 i일의 회귀 수량(mm H₂O)이다.

일별 지표 유출량은 아래의 수정 SCS 방법을 이용하여 계산된다.

$$Q_t = \frac{(P_t - 0.2S)^2}{P_t + 0.8S} \quad P > 0.2S \quad (2a)$$

$$Q_t = 0 \quad P \leq 0.2S \quad (2b)$$

$$S = 254 \left(\frac{100}{C_N} - 1 \right) \quad (3)$$

여기서 Q_t 는 지표 유출량, P는 강우량, S는 무차원 보유상수로써, 토양수분의 상태에 따라 CN 값이 결정된다.

지표 유출량 산정 후, 토양 속으로 침투되는 유출량은 아래 식을 이용한 storage routing 기법이 이용된다.

$$P_{erc,t} = SW_t \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_t}\right) \right] \quad (4)$$

여기서 T_t 는 각 트양층 내 잔류시간으로, 선형 저류기법을 이용하여 계산되고, 그 양은 토양 특성에 의해서 결정된다.

$$T_t = \frac{SW_t - F_c}{K_s \left(\frac{SW_t}{U_t} \right)^\beta} \quad (5)$$

여기서 F_c 는 포장용수량, U_t 는 최대 포화 토양 수분량, β 는 형상 계수이다.

측면 유출의 경우는 운동과 저류모형을 이용하고 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다.

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\psi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (6)$$

여기서, $SW_{ly,excess}$ 는 단위면적당 경사면의 포화대에

저장된 배수 가능한 물 부피(mm H₂O), ψ_d 는 배수 가능한 토양 공극율(mm/mm), L_{hill} 는 경사면 길이(m), slp 는 경사면의 경사(m/m), K_{sat} 는 포화 투수계수(mm/day)이다.

지하수는 얇은 대수층과 깊은 대수층으로 나뉘며, 얇은 대수층은 지표면에서 대수층으로 침투된 유량으로 유역의 하천으로 회귀수를 공급하고, 얇은 대수층으로 침투된 일부는 깊은 대수층으로 공급되어 유역 밖으로 흘러간다고 가정하고 있다. 이때, 지하수 수위는 아래 식을 이용하여 계산된다.

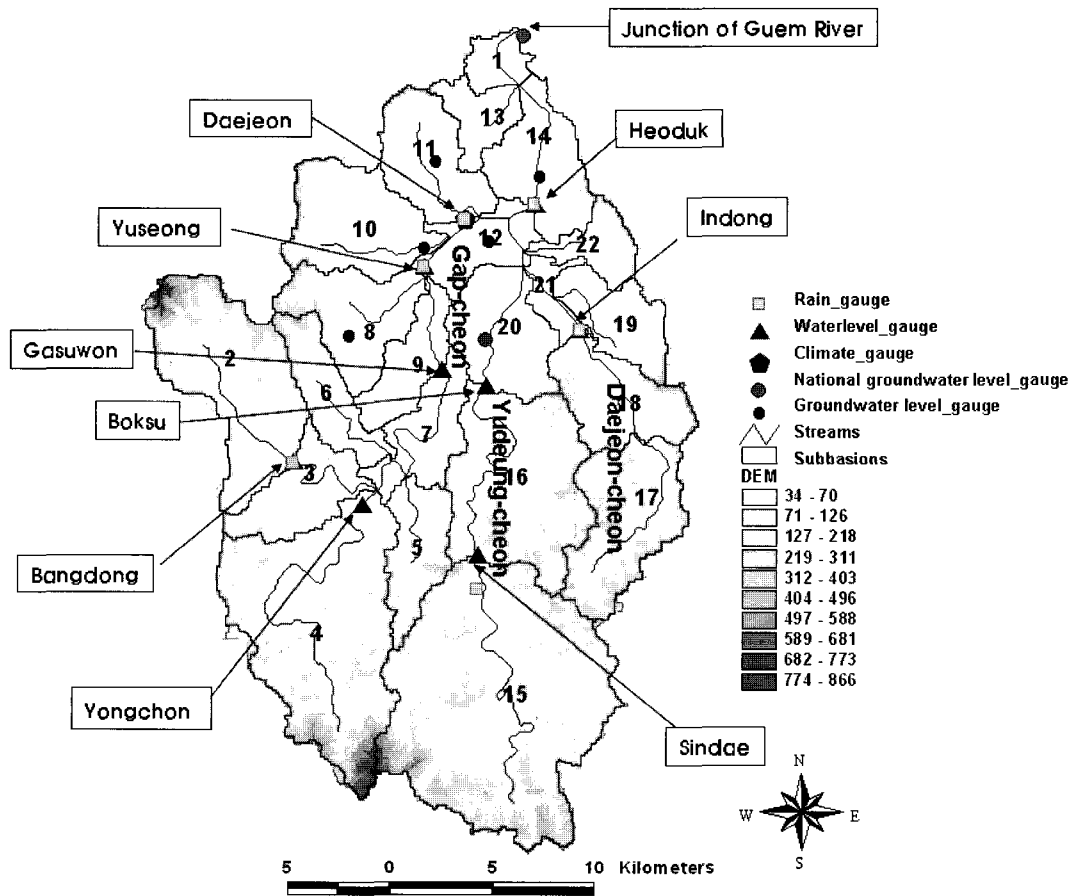
$$h_{wtbl,i} = h_{wtbl,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + \frac{w_{rchrg} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t])}{800 \cdot \mu \cdot \alpha_{gw}} \quad (7)$$

여기서 $h_{wtbl,i}$ 는 i일의 지하수 수위, $h_{wtbl,i-1}$ 는 i-1일의 지하수 수위, α_{gw} 는 기저유출 하단 계수, Δt 는 단위시간(1 일), w_{rchrg} 는 i일에 대수층으로 들어가는 침투량, 그리고 μ 는 얇은 대수층의 비산출율(specific yield)이다.

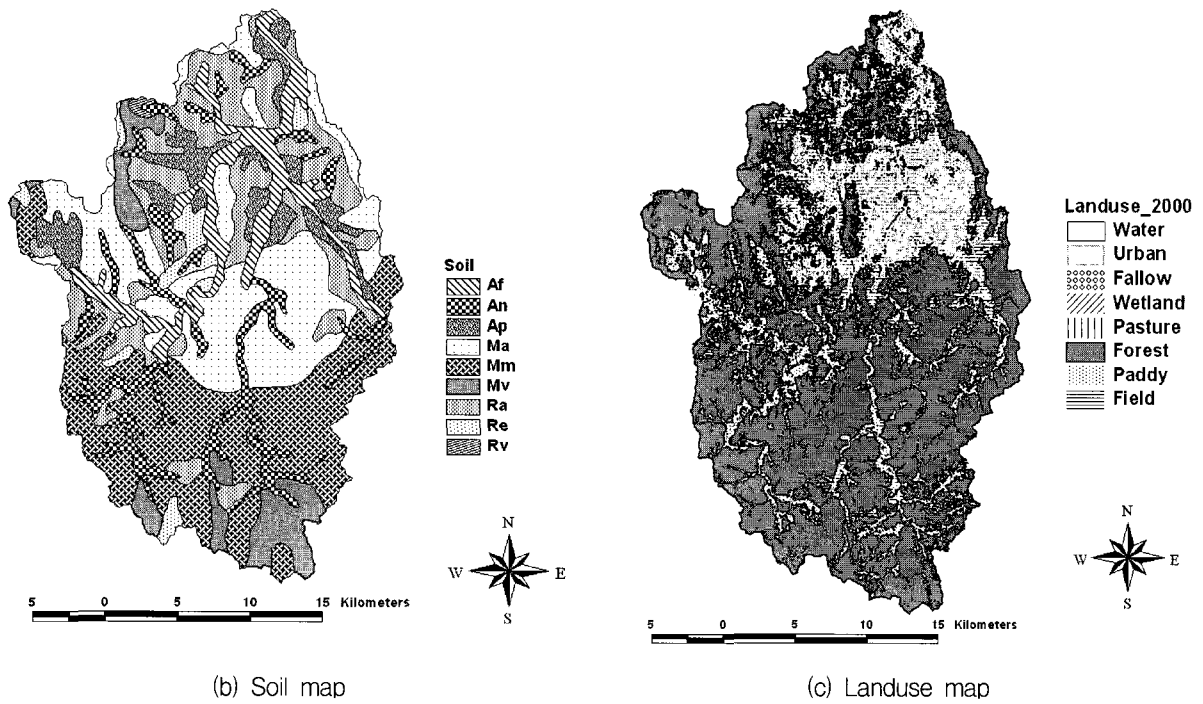
각 소유역간의 하도 추적을 위해서 Muskingum 기법과 variable storage 기법을 이용할 수 있다. 잠재증발산량 산정은 관찰된 잠재증발산량을 이용할 수도 있고, Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 이론식을 이용하여 산정할 수도 있다. Muskingum 기법이 variable storage 기법보다 측정 유출량 비교에서 있어 높을 효율을 보여, 본 연구에서는 하도추적시 Muskingum 기법을 이용하였다.

2.2 대상유역 현황

갑천은 유역면적이 648.3km², 유로연장이 73.7km로서 형상계수가 약 0.119인 비교적 장방형 형상을 하고 있으며 대전광역시 시가지 중심부를 관류하는 큰 두 지류(유등천, 대전천)로 구성된 대체로 수지형 특성을 나타내고 있다(Fig. 2a). 배수가 양호한 Ma와 Mm토양이 전체 유역의 45% 가량을 차지하며, 하천 수계를 따라 Af와 An 토양이 분포하고 산악지역은 대부분 Mm이 차지하고 있다(Fig. 2b). 자세한 각 토양의 특성은 Table 1에 나타나 있다. 대전 3대 하천 유역의 토지 이용은 산림지역이 60% 정도 차지하며, 도시 지역은 10% 정도 차지하고 있다(Table 2). 상류지역은 대부분 산림지역을 이루고 있고, 하류 지역은 도시화가 많이 진행된 상태이며 하천을 따라 많이 분포되어 있다(Fig. 2c).



(a) DEM and location of gauging stations



(b) Soil map

(c) Landuse map

Fig. 2. Catchment characteristics :
 (a) DEM and location of gauging stations, (b) Soil map, and (c) Landuse map

Table 1. soil properties of Gap-cheon catchment

Soil name	Soil type	Soil depth (m)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_{fc} (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	K_{sat} (cm/h)	area (%)
Af	silty clay loam	1.0	0.418-0.524	0.138-0.278	0.0-0.118	0.500	9.36
An	clay loam	1.0	0.409-0.519	0.115-0.279	0.0-0.174	0.267	10.63
Ap	silty clay loam	1.5	0.418-0.524	0.138-0.278	0.0-0.118	0.500	7.39
Ma	clay loam	1.5	0.409-0.519	0.115-0.279	0.0-0.174	0.53	21.50
Mm	clay loam	0.7	0.409-0.519	0.115-0.279	0.0-0.174	1.826	22.33
Mv	clay loam	0.5	0.409-0.519	0.115-0.279	0.0-0.174	0.53	6.94
Ra	clay	1.5	0.427-0.523	0.208-0.336	0.0-0.195	0.183	16.62
Re	sandy loam	0.5	0.351-0.555	0.031-0.159	0.0-0.106	5.113	2.7
Rv	clay loam	1.0	0.409-0.519	0.115-0.279	0.0-0.174	0.516	0.2

Table 2. Distribution of landuse types in year 2000.

Total	Water (water)	Uran (urld)	Barren (agrc)	Wetland (wet)	Pasture (past)	Forest (frst)	Paddy (rice)	Dry Field (agrr)
648.97(km ²)	1.44	67.83	7.78	0.02	25.68	388.35	101.64	56.24
100(%)	0.22	10.45	1.20	0.00	3.96	59.84	15.66	8.67

2.3 모형의 입력자료 구축

모형의 적용을 위한 입력자료는 지형자료, 지형자료와 연결된 속성자료, 그리고 기상 및 유역관리에 관련된 자료 등 3가지로 구분된다. 지형자료로 수자원 단위 지도 상의 유역경계와 토지이용도, 수치 고도모형(DEM), 토양도 등을 사용하였다. 토지이용도는 한강 유역조사에서 위성영상을 이용해 수치지형도와 혼합하여 구축된 수자원공사의 토지이용도를 이용하였으며, 위성영상 사진은 2000년의 토지이용상태를 기준으로 하였다. 토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 개략토양도와 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 이용하여 입력자료로 구축하였다.

SWAT 모형에서는 대상유역을 출구 점을 기준으로 소유 역으로 구분하며, 이를 다시 토지이용 및 토양종류에 따라 수문반응도(HRU)를 구분하여 적용한다. 본 연구에서는 먼저 갑천, 유등천, 대전천 유역의 경계를 구분하고 수위 관측 지점인 회덕, 유성, 인동, 방동, 신대, 복수, 용촌, 가수원 지점을 중심으로 22개 소유 역으로 구분하였다(Fig. 2a). 모형 구축결과 토지이용 및 토양성분에 따라 총 681개의 HRU가 생성되었다.

기상 자료는 1999년 1월 1일~2004년 12월 31일까지 5개년동안 관측된 대전 기상청의 최대 및 최저온도, 풍속, 상대 습도, 일사량, 증발량 자료를 이용하였다. 강우

의 경우는 6개 강우 관측소에서 관측한 자료를 이용하였다. 각 측정 지점마다 다른 형태의 강우 사상을 보이는데, 상류 지역인 신대 지역과 하류 지역인 회덕이나 유성은 시간적 강우 분포뿐 만 아니라 총 강우량에서도 많은 차이를 보이고 있다. 유철상 등(2005)은 SWAT 모형을 위한 적정 강우계 밀도의 추정 연구에서 대상 연구지역인 용담댐 유역의 경우 적정 소유역의 평균 면적 및 강우계 1개가 대표하는 적정면적을 80km²로 산정하였다. 본 연구유역의 면적은 649.87km²이며, 전체 6개의 강우 측정 지점을 이용하였으므로, 대략 강우계 1개가 대표하는 면적은 100km²로써 유철상 등(2005)이 산정한 면적보다 다소 크지만 큰 무리는 없을 것으로 판단된다. 참고로, SWAT 모형에서 각 소유역의 강우는 각 소유역 중심에서 가장 가까운 곳에 위치한 강우 측정지점의 데이터를 사용하도록 되어 있다.

2.4 모형 구축 방법

본 연구에서 사용된 모형의 구축을 위한 전반적인 절차는 다섯 단계로 나뉘어졌다. 첫째, 모형 매개변수들의 민감도 분석이 이루어져서 각 소유 역에 맞는 모델 보정을 위한 준비 및 각 소유역의 특성 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 각 소유역의 특성분석과 함께, 모델을 더 잘 이해하는데 도움이 된다. 본 연구에서는 LH-OAT 민감도 분석(Van Griensven and Meixner, 2003)을 이용하였다. 둘째, 검보정 단계에서의 매개변수

값의 보정을 통한 모델 변수 값들의 추정 전에, 관찰된 데이터로부터 각 매개변수 값들에 대한 추정을 최대한 실시하였다. 이 방법은 관측 자료의 유효한 정보를 모델링에 최대한 이용한다는 측면의 이익과, 간접적인 모델의 복잡성과 예측 능력의 확인차원에서 많은 의미를 지닌다. 세 번째는, 각 소유역에서 관찰된 수위와 유량 값으로부터 모델의 보정 및 검증 실시하였다. 각 소유역별로 다른 수문학적 특징을 보이기 때문에 단순히 최종 출구점의 유출량을 이용한 모델의 보정에는 모델 신뢰성에 대한 한계가 있으므로, 주요 소유역별로 관측된 6개의 수위-유량곡선을 이용하여 산출된 유량 값을 이용하였다. 네 번째로는, 각 소유역의 기저유출량을 통한 모델의 검증을 시도하였고, 마지막으로 관측된 지하수 수위를 이용한 모델 검증을 실시하였다.

3. 결과

3.1 민감도 분석

많은 매개변수들을 가진 SWAT와 같은 복잡한 모형의 경우, 실제적으로 모든 매개변수 값들을 데이터로부터 직접 추정하지 못하고, 많은 경우에 보정을 통해 매개변수 값들을 추정하게 된다. 하지만 이러한 보정 작업에도 많은 노력과 시간이 요구되기 때문에, 실질적인 보정 이전에 민감도 분석을 통한 특정 모델 예측대상, 즉 대표적으로 하천의 유량에 대한 모델 변수들의 민감도를 알아봄으로써 검토중 단계에서 불필요한 작업들을 생략할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 목적으로 LH-OAT 민감도 분석(Van Griensven and Meixner, 2003)을 실시하였다. LH-OAT 방법은 One-factor-At-a-Time(OAT) 방법과 Latin Hypercube sampling(LH) 방법의 혼용으로 구성되어 있다. LH 방법은 Monte Carlo Simulation 방법을 이용하지만 시뮬레이션의 횟수를 최소화 할 수 있다. 이 방법은 각 매개변수들을 m 범위로 나누고, 각 매개변수들은 샘플링 단계에서 $1/m$ 의 확률 값을 가진다. 각 매개변수에 대한 난수가 추출되고, 각 범위에서 하나의 값만이 선택되어진다. OAT 방법은 크기 $n(x_1, \dots, x_n)$ 의 매개변수 벡터로부터 차례로 각 매개변수들을 변화시키는 것이다. 한 번의 모델 실행에 단지 하나의 매개변수 값만을 변화시키므로, 모델 결과는 매개변수 값의 변화에 직접적으로 영향을 받는다. 한편으로 이 방법은 단수 x_1 에 대한 모델 결과 값의 민감도가 다른 매개변수들에 값에 영향을 받게 된다. 이런 문제들은 LH와 OAT 방법을 함께 사용하면서 해결될 수 있다. LH-OAT 민감도 분석에는 최종적으로 $(n+1) \times m$

의 모델 실행이 요구된다(Holvoet et al., 2005).

관측 유량이 있는 대표지점인 회덕, 인동, 신대 및 방동을 중심으로, 유출량에 영향을 미칠 가능성이 큰 27가지 매개변수들에 대해서 민감도 분석을 수행하였다(Table 3). 그 결과 중 소유역의 특징에 따른 민감도의 변화를 고찰하기 위해 평지지역이고 도시화가 많이 이루어진 회덕지점과 경사가 급한 산악지역인 신대지점에 대한 민감도를 분석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 두 지점 모두 $CN2$, $soil_z$ 및 SoL_AWC 에 대해서 매우 높은 민감도를 나타내었다. 하지만 회덕의 경우는 $CN2$ 가 가장 높은 민감도를 보인 반면, 신대지점은 $soil_z$ 가 가장 높은 민감도를 보였다. 이 결과는 평지에 위치하고 도시화가 많이 진행된 회덕 지점은 $CN2$ 매개변수의 값에 의해서 대부분의 직접유출(surface flow)이 결정되기 때문이고, 이에 비해 얇은 토양층을 가진 산악지역에서는 $soil_z$ 에 의한 유출량이 결정되기 때문이다. 그리고 평지에 위치한 회덕의 경우 상대적으로 신대지점에 비해 지하수 유출과 관련된 매개변수들이 높은 민감도를 나타내고 있고, 산악지역이고 고지대에 위치한 신대지점은 용설과 관련된 매개변수들이 상대적으로 높은 민감도를 보이고 있다. 이처럼 각 소유역의 특징에 따라 각 매개변수들은 다른 민감도를 나타냈으며, 모델 보정 시 이런 영향들을 고려하였다.

3.2 매개변수 값 추정

본 연구에서는 관찰된 데이터를 최대한 이용하려는 목적과 최대한 매개변수의 불확정성을 줄이기 위해서, 그리고 본 보정 시 최소한의 모델 보정을 위하여 보정 전 관측된 데이터로부터 매개변수 값을 추정하였다. SWAT 모형은 기본적으로 토양도와 토지이용도를 이용하여, 토양속성 성분과 CN 값을 추정한다. 이러한 과정에서, 한국의 지형적 특성과 다소 상이한 미국 토양 보전국의 피복 분류방법에 의해 산정된 CN 값을 이용할 경우, 과소 산정되는 결과를 보였기 때문에(배덕효 등, 2003; 오경두 등, 2005), 이를 고려하여 CN 값들을 재 산정하였다. 그리고 CN 값 산정 시 각 소유역의 경사의 영향 역시 고려되었다(Williams, 1995). 토양 속성 성분의 경우, 각 소유역의 토지 이용도의 영향을 고려하여 Table 1에 산출된 값을 바탕으로 최소한의 보정이 이루어졌다. DEM과 하천 수계 도를 이용하여 유출 흐름 방향 및 하천 속성성분 값을 예측하였고, 지하수 부분에서의 GW_DELAY 의 경우 강우량과 지하수 심도와 교차 상관도 분석에 의해서 각 지하수 관측 망 자료를 이용하여 예측하였다(한국지질자원연구원, 2004). 대전 문평 충적층과 태평 암반의 경우 각각 7일 및 2일의

지체시간(lag time)을 보였다. 그리고 유량감수곡선 분석(streamflow recession analysis)를 통한 ALPHA_BF의 값을 예측하였다. 이때, SWAT 모형에서는 아래의 선형 지하수 방정식이 이용된다.

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot t] \quad (8)$$

여기서 Q_{gw} 는 시간 t에 하천으로 흘러 나가는 지하수

수량(mm H₂O)이고, $Q_{gw,0}$ 는 시간 t=0에 하천으로 흘러 나가는 지하수 수량(mm H₂O), 그리고 α_{gw} 는 기저 유출 상수 값이다. ALPHA_BF는 이 모델 방정식의 α_{gw} 에 대응한다. 유출량이 유효한 지점에서 이 방정식과 유출량의 기저유출부분의 비교를 통해 매개변수 값을 예측하였다. 그 결과 인동지점은 0.1-0.28, 신대지점은 0.44-0.72로 각 토양 종류와 고도에 따라 다른 값을 보였다.

Table 3. Major parameters and their ranges estimated through the sensitivity analysis (GW=groundwater, Evap=evaporation, Geom=Geomorphology)

Name	Min	Max	Definition	Process
ALPHA_BF	0	1	Baseflow alpha factor(days)	GW
BIOMIX	0	1	Biological mixing efficiency	Soil
blai*	-50	50	Leaf area index for crop	Crop
Ch_k2	0	150	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium(mm/hr)	Channel
canmx	0	10	Maximum canopy index	Runoff
ch_n*	-20	20	Manning coefficient for channel	Channel
CN2*	-50	50	SCS runoff curve number for moisture condition II	Runoff
epco*	-50	50	Plant uptake compensation factor	Evap
ESCO	0	1	Plant evaporation compensation factor	Evap
GW_DELAY	0	100	Groundwater delay(days)	GW
GW_REVAP	0.02	0.2	Groundwater "revap" coefficient	GW
GWQMN	0	1000	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur(mm)	GW
rchrq_dp	0	1	Groundwater recharge to deep aquifer(fraction)	Soil
REVAPMIN	0	500	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur(mm)	GW
SFTMP	-2	2	Snowfall temperature(°C)	Snow
SLOPE*	-50	-50	average slope steepness(m/m)	Geom
SLSUBBSN*	-50	50	Average slope length(m/m)	Geom
SMFMN	0	10	Min. melt rate for snow(mm/°C/day)	Snow
SWFMX	0	10	Maximum melt rate for snow(mm/°C/day)	Snow
SMTMP	-2	2	Snow melt base temperature(°C)	Snow
sol_alb	0	1	Moist soil albedo	Soil
SOL_AWC*	-50	50	Available water capacity(mm/mm soil)	Soil
sol_k*	-50	50	Soil conductivity (mm/h)	Soil
sol_z*	-50	50	Soil depth	Soil
surlag	0	10	Surface runoff lag coefficient	Runoff
TIMP	0.01	1	Snow pack temperature lag factor	Snow
TLAPS*	-50	50	Temperature lap rate (°C/km)	Geom

* Relative change

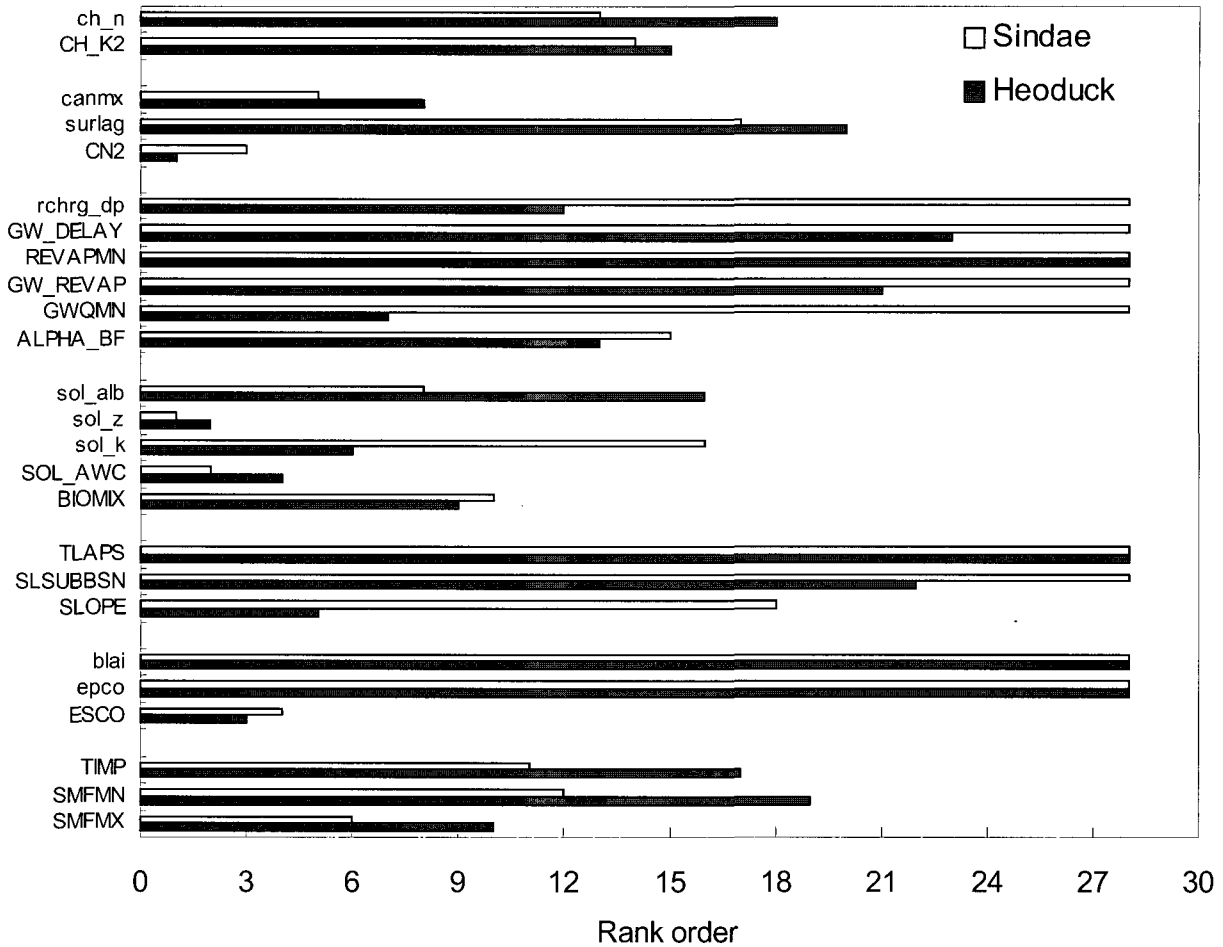


Fig. 3. Sensitivity ranking of the hydrological parameters for Heoduck and Shindae stations (Definition of different parameters can be found in Table 3).

3.3 유출유량을 이용한 검·보정

본 연구에서는 보정 전 최대한 많은 매개변수 값을 추정하려고 노력하였다. 그 외의 매개변수들에 대해서는 민감도 분석결과를 바탕으로 년별 월별 일별 유출량 순으로 보정을 실시하였다. 그리고 상류부터 시작하여 하류까지 각 소유역의 적정 매개변수(optimized parameter)에 대한 보정을 실시하였으며, 하류 소유역에 대한 보정 시에는 상류에서 보정한 매개변수들의 값을 고정시켰다. 먼저 대전천 유역에 대하여 19번 소유역부터 보정을 실시하였고, 그 다음 유등천 유역에 대하여 17번 소유역부터 보정을 실시한 후, 갑천 유역 전체에 대해서 15번 소유역부터 시작해서 갑천 유역의 최종 출구 점인 금강 합류부에 위치한 1번 소유역까지 보정을 실시하였다. 최종 보정은 갑천 유역의 최종 출구 점에서 가장 가까운 회덕 수위 관측소의 수위-유량 곡선식에 의해 계산된 유량 값과 모델 예측유출량과의 비

교를 통해 실시하였다.

모델의 유량 예측에 관한 보정 및 검증시 1999년을 warming-up 기간으로 하였고, 2000~2003년을 보정기간으로, 그리고 2004년을 검증기간으로 설정하였다. 모델의 예측 유효성을 평가하기 위해서 그래픽을 통한 결과분석 외에 통계적 방법으로써 Nash-Sutcliffe식(Nash and Sutcliffe, 1970)을 이용하였다.

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_{obs,i} - Q_{pred,i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\left(\sum_i^n Q_{obs,i} \times Q_{pred,i} - n \overline{Q_{obs}} \times \overline{Q_{pred}} \right)^2}{\left(\sum_i^n Q_{obs}^2 - n \overline{Q_{obs}}^2 \right) \left(\sum_i^n Q_{pred}^2 - n \overline{Q_{pred}}^2 \right)} \quad (10)$$

여기서 $Q_{obs,i}$ 는 i일에 관찰된 유량의 값, $Q_{pred,i}$ 은 i일에 예측된 모형 유량 값, $\overline{Q_{obs}}$ 은 평균 관측 값, $\overline{Q_{pred}}$ 은 평균 모형 예측 값, 그리고 n은 계산된 기간을 의미한다.

R_{eff} 의 경우 유출량의 침투 유량의 크기에 민감도를 나타내고, R^2 의 경우는 강우 사상에 따른 유출의 반응 시간에 민감도를 나타낸다. 그러므로 위의 두 가지 목적함수를 이용하면 모형의 유출 예측에 대하여 더 많은 측면에서 평가할 수 있었다. 그리고 R_{eff} 의 로그 값을 통한 지 수위의 유출량 평가가 이루어 졌다.

Table 4. Calibration results for daily streamflow

Gauging Stations	Calibration Period	Reff	R ²
Heoduck	2000	0.75	0.83
	2001	0.38	0.58
	2002	0.76	0.84
	2003	0.77	0.78
Sindae	2002	0.54	0.57
	2003	0.64	0.66
Indong	2002	0.71	0.71
	2003	0.65	0.66
Boksu	2002	0.43	0.65
	2003	0.72	0.72
Yuseong	2002	0.68	0.77

각 관측 지점의 일별 유출량에 대한 모형 보정 및 검증 효율을 Table 4에 요약하였다. 각 소유역의 유출 예측의 평가에 있어서 유역의 최 하류에 위치한 회덕 지점에서 가장 높은 효율(최대 0.84)을 보이고 있다. 이

까닭은 회덕 지점이 국가 수위 관측소로써 측정 자료의 유효성이 상대적으로 높기 때문이다. 하지만 평년에 비해 적었던 갈수년(2001)의 경우는 상대적으로 낮은 보정 효율 값을 보이고 있다. 이 까닭은 앞에서 언급된 수위-유량곡선식 산정 문제와 함께 저 수위 측정에 대한 높은 오차 값에 기인한다고 본다. 검증기간에 대하여 R_{eff} 는 0.78, R^2 의 경우는 0.80의 높은 효율을 얻었다. 전반적으로 회덕 지점뿐만 아니라 다른 소유역내에서 확인된 모형의 유출량 예측에 관한 유효성은 양호한 결과를 보이고 있다(Table 4). 나머지 소유역 지점 역시 최대 0.72에서 최소 0.43의 효율의 양호한 결과를 보이고 있다. 참고로 유성의 경우는 2003년 관측 수위 값의 오차가 너무 커서, 분석에서 제외하였다.

Fig. 4는 회덕 관측 지점에서의 일별 관측 및 모의 유출량을 보여주고 있다. 일별 유출량 분석 결과를 보면 모형 예측 값들은 전체적인 경향, 침투 유량 도달 시간, 기저 유출량을 잘 나타내고 있지만, 침투 유량 값은 다소 과소 산정된 경향을 보인다.

3.4. 기저 유출량을 이용한 검·보정

Arnold et al.(2000)이 제안한 Recursive digital filter(RDF)를 이용하여, 직접 유출량과 기저유출량 값의 비교를 통한 모형 보정 및 검증의 신뢰성을 점검하였다. 이 방법은 비록 물리적 의미는 없지만, 분석결과가 객관적이고 재생산이 가능하기 때문에, 주관적 결정에 많이 좌우 되는 그래픽 방법보다 더 신뢰성이 높다. 이 방법은 원래 신호분석(signal analysis)에 바탕을 두고 있으며, 기저유출량으로부터 지표수량의 필터링은 신호분석에서 높은 진동수를 가지는 신호의 필터링과 비슷한 개념이며, 다음 두 식을 바탕으로 계산된다.

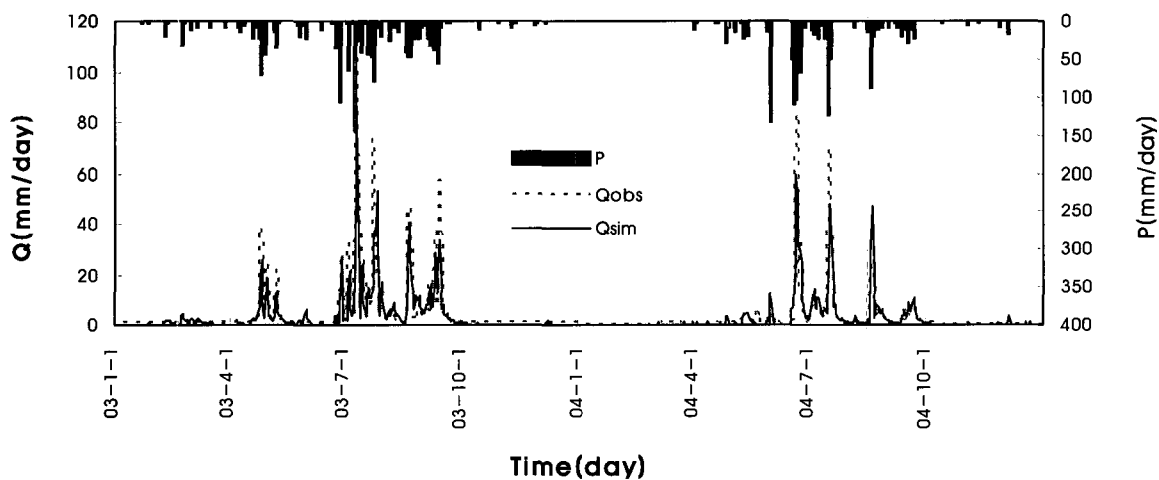


Fig. 4. Results of calibration and validation at Heoduk station (2003-04)

$$q_t = \beta q_{t-1} + (1 + \beta)/2 \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad (11)$$

$$b_t = Q_t - q_t \quad (12)$$

여기서 q_t 는 시간 t 에 지표수량, Q_t 는 시간 t 에 관측된 총 유량, β 는 필터 상수, b_t 는 기저유출량이다. 보통 기저 유출량 필터링에 있어 세 가지 시간(pass1, pass 2, pass3)을 선택하여 계산한다. Arnold et al.(2000)은 모델 예측 량이 처음 두 시간 간격에서 선택된 값에서 계산된 기저 유출량 범위에 포함되어야 한다고 제시하고 있다.

RDF를 이용하여 주요 수위 측정지점인 회덕, 유성, 인동, 복수 지점의 기저 유출량을 산정하였다. 본 방법을 이용한 기저유출량 산정 방법에 내포된 불확정성을 고려하여, 일별 또는 월별 산정 값의 비교보다는 연별 산정 값에 대한 비교가 더 타당하다고 판단되어 각 관측점에서의 연간 총 기저유출 값을 계산하였다(Table 5). 신대와 복수는 산악지역에 위치한 관측소로서 강우

량이 다른 지점보다 많지만 유출률이 0.7, 0.65로써 다른 지점보다는 상대적으로 낮은 유출률을 보이고 있다. 기저유출량의 역시 작은 값을 가진다. 하류 지역에 위치한 회덕과 유성의 경우 기저유출률이 0.55로써 가장 큰 값을 보이고 있다. 이 결과로부터 하류에 위치할수록 총 유출량에서 기저 유출량이 차지하는 비율이 커짐을 알 수 있다.

모형에서의 기저 유출 산정은 갑천 유역의 경우는 산악지역이 50%가량을 차지하고, 강우가 토양 내로 침투한 후 큰 경사와 얇은 토양 층 깊이에 의해서 측면 유출이 빠른 시간에 일어나기 때문에 직접 유출량으로 가정하고, 얇은 대수층에서 하천으로 흘러들어가는 지하수량(shallow groundwater flow)만을 기저 유출량(baseflow)으로 산정하였다. 각 관측 지점에서 계산된 기저 유출량(baseflow)과 모델로부터 예측된 값을 Fig. 5에 비교하였다. 회덕, 인동, 유성의 경우는 RDF에 의해 계산된 값의 범위 안에 들었지만, 신대와 복수의 경우 2~5% 정도 과대 산정되는 결과를 보이고 있다.

Table 5. Results of baseflow separation using the recursive digital filter method.

Gauging station	P(mm/yr)	Q(mm/yr)	Qbaseflow (mm/yr)	Q/P	Qbaseflow/P	Qbaseflow/Q
Heoduck	1291.3	1434.8	789.1	0.86	0.61	0.55
Indong	1313.0	1456.4	699.1	0.90	0.53	0.48
Sindae*	2180.5	1531.8	689.3	0.70	0.32	0.45
Boksu*	2180.5	1417.2	694.4	0.65	0.32	0.49
Yuseong	1269.0	1013.2	557.3	0.80	0.44	0.55

P : rainfall Q : observed streamflow
 Qbaseflow : estimated baseflow through recursive baseflow filtering
 * : data measured in 2003.

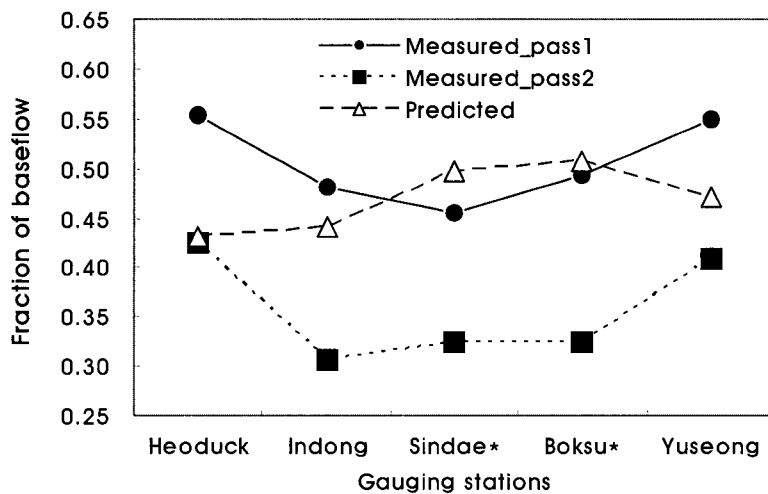


Fig. 5. Comparison of baseflow fractions estimated using RDF (based on measured data) and predicted using SWAT. * : data measured in 2003.

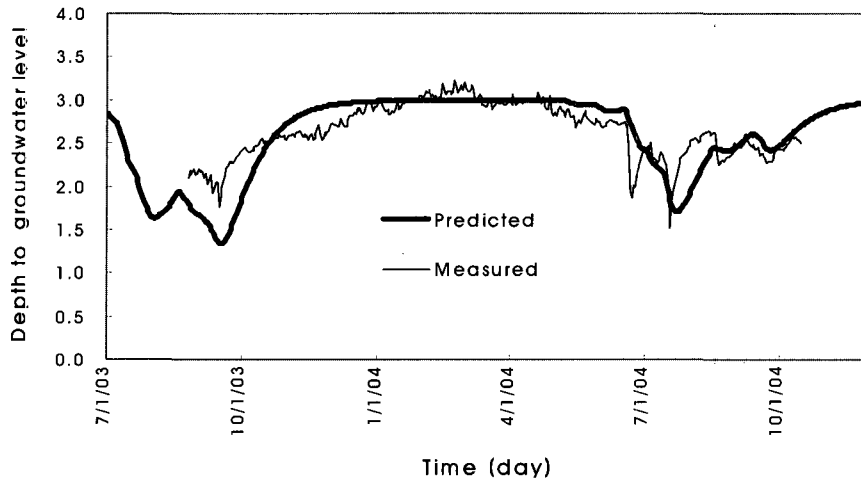


Fig. 6. Comparison of measured and predicted groundwater levels in subbasin-14

3.5. 지하수 수위를 이용한 검·보정

마지막으로 모델의 검증을 위해 유역 내에서 측정된 지하수 수위 값을 이용하였는데 관측 수위와 모델에서 예측된 수위와의 직접적인 비교보다는 지하수 수위 변동의 전체적인 시간적 추이(temporal trend)와 강우 사상에 대한 반응시간(response time)에 대한 비교에 주안점을 두었다. Fig. 6에 14번 소유역에서 관측된 지하수 수위 값과 예측된 평균 지하수 수위를 나타내었다. 관측 값과 예측 값의 차이는 토양 및 토지이용에 상태에 따라 결정된 각각 다른 특성의 HRU에 의해 불균등한 지하수 침투 량에 기인한다고 볼 수 있다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, SWAT에서 계산된 값은 몇 구간을 제외하고는 전체적으로 관측된 지하수 수위의 변동 추이와 잘 일치하고 있다. 관측 및 예측 지하수 수위 변동의 추이와 반응시간에 대해 유효성(R^2)을 평가한 결과 2003년 8월 24일~2004년 10월 15일 기간 동안 예측된 평균 지하수 수위와 관측된 지하수 수위의 R^2 계산 결과가 0.71를 나타내었다. 공간적 수위의 고려 없이 지표로부터 지하수로 들어가는 침투 량만을 고려한 결과 값으로는 양호한 결과라고 판단되므로, 갑천 유역에 구축된 SWAT모델의 신뢰성이 높다고 판단된다.

4. 토의

수문 모형의 적용 시 모형의 예측 값과 관측된 값과의 비교에서 많은 어려가 발생되고, 그 원인 또한 다양하다. 예를 들면, 매개변수의 불확정성, 모형 구조의 불확정성, 입력 및 관측 데이터의 불확정성을 들 수 있다. 강우 값의 공간적인 분포의 고려방법이 모델에 의해 산정된 유출량의 정확도에 영향을 미치고, 모형 매개변수

값 역시 대부분 직접적으로 검증될 수 없고, 단지 예측하려는 대상, 예를 들면, 유출량, 지하수 수위 변화, 토양 수분 량 등과 비교되므로, 매개변수 값의 유효성을 간접적으로 증명하려는 시도에는 한계가 있다. 같은 유역을 대상으로 모형 구조의 복잡한 정도가 다른 모형을 적용할 경우에도 비슷한 예측 효율정도를 보이거나, 그 유역의 특성을 정확히 반영한 경우와 그렇지 않은 경우에도 효율측면에서 큰 차이가 없는 경우가 발견되는 경우가 많이 있다(Uhlenbrook et al., 1999).

많은 수문 모형들, 특히 많은 매개변수들을 필요로 하는 물리적 기반의 모형의 경우 모형의 적용에 많은 문제를 안고 있다. 이를 해결하기 위한 방법은 모형의 구조 및 매개변수 종류는 대상유역에 측정된 데이터를 바탕으로 결정하고, 최소한의 모형 보정과 다 변수 및 다 지점 모형 검증을 통해야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 취지에 맞추어, SWAT 모형의 갑천 유역 적용에 있어 매개변수 값의 추정에는 관측된 데이터를 바탕으로 이루어졌다. 토양도, 토지 이용도, 기저 유출량, 강우와 지하수 변화량의 관계 등을 이용하여, 대부분의 매개변수 값들을 보정 전 단계에서 추정하였다. 하지만 본 연구에서는 모델 매개변수 및 구조의 과변수화(over-parameterization)에 대한 평가는 이루어 지지 못했다. 대신 최종 유출지점을 통한 모델의 검증뿐만 아니라, 소유역 단위의 유출량을 이용한 검증 및 RDF를 이용한 기저 유출량의 비교와, 관측된 지하수 수위를 이용하여 모델 매개변수 및 구조의 유효성에 대한 평가를 내렸다. RDF를 이용한 기저 유출량 산정의 경우, PART 모형(Rutledge and Daniel, 1994)과 같은 기존의 기저유출량 산정 프로그램과 마찬가지로, 그 자체가 물리적 의미를 지니고 있지 않기 때문에, 그 값에 대한 신뢰도는

그렇게 높지 않다. 이에 대한 신뢰도를 높이기 위해, 다른 알고리즘을 이용하여 산정한 결과 값과의 비교나 동위원소를 이용한 기저유출량 산정을 통한 검증이 요구된다. 본 연구에서는 SWAT 모형을 이용해 예측된 기저 유출량과 RDF를 통해 산정된 값과의 비교에서 산악 지역에 위치한 신대와 복수지점에서는 2~5% 정도의 과대 산정된 값을 보였지만 RDF 방법의 신뢰성을 고려하면, 대체로 양호한 결과라고 할 수 있다.

본 연구에서 검증의 하나의 수단으로 지하수 수위를 이용하였다. 이 목적을 위해서는 관찰된 지점에서 지하수 수위와 그 지점에서 계산된 지하수 수위의 비교가 최선이지만 실제적으로 모형의 격자 크기와 실제 지하수 수위 측정의 스케일이 다르기 때문에 현재까지는 한 소유역에서 관찰된 수위와 모형과의 비교가 일반화되어 있다(Hattermann et al. 2005; Arnolds and Allen, 1996). 그리고 SWAT 모형의 경우는 소유역내의 공간적 지하수 흐름을 설명하지 않고 평균으로 제시한 것이기 때문에 더 현실적인 지하수 모의를 위해서는 한계점을 가진다. 이에 대한 개선을 위해서는 공간적 분포를 설명해 줄 수 있는 지하수 모형과의 연계가 시도되고 있다. 그 예로 Perkins and Sophocleous (2000)는 SWAT 모형과 MODFLOW모형을 연계하여 구축된 SWATMOD 모형을 적용하여 미국 Kansan 주의 지하수와 하천유량의 감소에 대한 문제를 규명한 경우가 있다. 국내의 경우 김남원 등(2004)은 SWAT과 MODFLOW를 결합한 한국형 KSWAT-MODFLOW를 이용하여 오산천 유역의 유출분석을 실시하였다.

5. 결 론

다양한 토지 이용도와 토양특성을 지닌 갑천유역을 대상으로 다 지점·목적 검·보증 방법을 통한 물리적 준 분포형인 SWAT 모형을 구축하였다. 모형의 보정된 민감도 분석을 통한 각 소유역별로 특성분석을 실시하였고, 유출에 민감한 매개변수들을 추정하였다. 그리고 최소한의 보정을 통한 모형의 적용성을 높이기 위해 관찰된 데이터로부터 매개변수 값을 보정하는 과정을 거쳤다.

모형의 보정 및 검증에는 세 가지 방법을 이용하였다. 첫째로 최종 유역 출구 점에서의 측정된 유출량뿐만 아니라, 각 주요 수계 지점에서 측정된 유출량을 이용한 모형의 검증, 두 번째로는 recursive digital filter(Arnold et al., 2000)를 이용한 기저유출량 산정법을 이용하여 기저유출량 예측에 관련된 모델 검증, 마지막으로 측정된 지하수 수위를 이용하여 모형의 검

증을 실시함으로써 구축된 모형의 신뢰성을 높이도록 노력하였다.

주요 수계지점에서 측정된 수위 및 유량 자료를 통한 보정 시 전체적으로 높은 보정효율을 보였으며($R_{eff} = 0.38-0.77$, $R^2 = 0.58-0.84$) 모형의 검증 시 회택지점에 대하여 R_{eff} 은 0.78, R^2 는 0.80의 높은 값을 보였다. 갈수 년(2001)에는 보정 효율이 0.38~0.58로 낮았는데, 수위-유량곡선식 산정 문제와 함께 저 수위 측정값의 큰 오차에 기인한다고 본다. Recursive digital filter를 이용한 기저 유출량 산출량 결과와 모형에서 산정한 값을 비교해 보면, 신대와 복수 지점의 2~5% 정도의 과대 산정을 제외하고는 다른 지점은 만족스러운 결과를 보였다. 마지막 방법으로 관측된 지하수 수위와의 비교에서 전체적으로 관측된 지하수 수위의 시간적 변동추이와 변동 폭을 잘 나타내었고, R^2 는 0.71로 만족스러운 결과를 보였다.

다양한 방법으로 보정 및 검증을 통해 모형의 구조나 매개변수의 유효성에 있어서 신뢰성 높은 갑천유역에 대한 SWAT 모형을 구축하였다. 후속편(김정곤 등, 2006)으로 본 연구에서 구축한 SWAT 모형을 이용하여 갑천 유역에서의 세부적인 유출 특성분석 및 도시화에 의한 영향 평가를 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006). "SWAT 모델을 이용한 갑천 유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가", **한국수자원학회 논문집**, 제출.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2005). "완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형(II) 모형의 평가", **한국수자원학회 논문집**, 제37권 제6호, pp. 509-515.
- 배덕효, 이병주, 정일원 (2003). "위성영상 피복 분류에 대한 CN값 산정(I): - CN값 산정-", **한국수자원학회**, 제 36권 제 6호, pp. 985-997.
- 오경주, 전병호, 양정규, 안원식, 조병호 (2005). "도시 지역 CN 산정연구", **한국수자원학회**, 제 38권 제 12호, pp. 1009-1020.
- 유철상, 김경준, 김남원 (2005). "SWAT 모형의 적용을

- 위한 적정 강우계밀도의 추정“, 한국수자원학회 논문집”, 제 38권, 제 5호, pp. 415-425
- 한국지질 자원 연구원, 대전지역 지하수 기초 조사 보고서, 2004.
- Arnold, J.G. and Allen, P.M. (1996). Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds, *Journal of Hydrology*, Vol. 176, pp. 57-77.
- Arnold, J.G., Mutiah, R.S., Srinivasan, R., Allen, P.M. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 227, pp. 21-40.
- Cao, W., Bowden, W.B., Davie, T. and Fenemor, A. (2005). Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability, *Hydrological processes*, Vol. 20, pp. 1057-1073.
- Franks, S.W., Gineste, P., Beven, K.J., Merot, P. (1997). On constraining the predictions of a distributed model: the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process, *Water Resources Research*, Vol. 34, pp. 789-797.
- Hattermann, F.F., Wattenbach, M., Krysanova, V. and Wechsung, F. (2005). Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment-validation and uncertainty analysis, *Hydrological processes*, Vol. 19, pp. 693-714.
- Holvoet, K., van Griensven, A., Seuntjens, P., Vanrolleghem, P.A. (2005). Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 30, pp. 515-526.
- Hooper, R.P., Stone, A., Christophersen, N., de Grosbois, E., and Seip, H.M. (1988). Assessing the Birkenes model of stream acidification using a multi-signal calibration methodology, *Water Resources Research*, Vol. 24, pp. 1308-1316.
- Luzio, M. D., Srinivasan, R., Arnold, J. G., and Neitsch, S. L. (2002). ArcView Interface for SWAT2000 Users Guide.
- Seibert, J., and J. J. McDonnell, (2002). On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration, *Water Resour. Res.*, 38(11), 1241, doi: 10.1029/2001WR000978.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282 - 290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties, *Transactions of the American Society of Agriculture Engineers*, Vol. 25, pp. 1316-1320.
- Perkons, S and Sophocleous, M. (1999). Development of a comprehensive watershed model applied to study stream yield under drought conditions, *Ground Water*, Vol. 37, pp. 418-426.
- Refsgaard J.C. (1997). Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological model. *Journal of Hydrology* Vol. 10, pp. 282-290.
- Rutledge, A.J. and Daniel, C. C. (1994). Testing an automated method to estimate ground-water recharge from stream flow record, *Ground Water*, Vol. 32, pp. 180-189.
- Sorooshian S, Gupta V. K. (1995). Model calibration. In Computer Models of Watershed Hydrology, Singh VP(ed.) *Water Resources Publication: Highlands Ranch, CO: 23-68.*
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, and Ch., Rodhe, A. (1999). Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure, *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 44, pp. 279-299.
- Van Griensven, A., Meixner, T. (2003). Sensitivity, optimization and uncertainty analysis for the model parameters of SWAT. In: SWAT 2003: 2nd International SWAT Conference, Bari, Italy, 1-4 July.
- Williams, J.R. (1995). Chapter 25. The EPIC Model. p. 909-1000. In computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.

(논문번호:06-14/접수:2006.01.11/심사완료:2006.09.12)