

HELP 모형과 SWAT 모형의 지하수 함양량 비교

Comparison of Groundwater Recharge between HELP Model and SWAT Model

이 도 훈* / 김 남 원** / 정 일 문***

Lee, Do Hun / Kim, Nam Won / Chung, Il Moon

Abstract

The groundwater recharge was assessed by using both SWAT and HELP models in Bocheong-cheon watershed. The SWAT model is a comprehensive surface and subsurface model, but it lacks the physical basis for simulating a soil water percolation process. The HELP model which has a drawback in simulating subsurface lateral flow and groundwater flow component can simulate soil water percolation process by considering the unsaturated flow effect of soil layers. The SWAT model has been successfully applied for estimating groundwater recharge in a number of watersheds in Korea, while the application of HELP model has been very limited. The subsurface lateral flow parameter was proposed in order to consider the subsurface lateral flow effect in HELP model and the groundwater recharge was simulated by the modified exponential decay weighting function in HELP model. The simulation results indicate that the recharge of HELP model significantly depends on the values of lateral flow parameter. The recharge errors between SWAT and HELP are the smallest when the lateral flow parameter is about 0.6 and the recharge rates between two models are shown to be reasonably comparable for daily, monthly, and yearly time scales.

The HELP model is useful for estimating groundwater recharge at watershed scale because the model structure and input parameters of HELP model are simpler than that of SWAT model. The accuracy of assessing the groundwater recharge might be improved by the concurrent application of SWAT model and HELP model.

Keywords : groundwater recharge, SWAT model, HELP model, bocheong-cheon

요 지

본 연구에서는 SWAT 모형과 HELP 모형을 이용하여 보청천 유역의 지하수 함양량을 산정하였다. SWAT 모형은 지표수 및 지하수 성분을 모두 고려할 수 있는 물순환 모형이지만, 토양층에 대한 침투과정의 물리적 해석이 미흡하다. 반면에 HELP 모형은 중간유출 및 지하수 유출성분을 모의하지 못하지만, 토양층에서의 비포화흐름을 고려하여 침투과정을 해석할 수 있다. 국내유역에서 함양량 산정을 위해 SWAT 모형은 여러 유역에서 성공적으로 적용되어 왔지만, HELP 모형의 국내유역에 대한 적용은 매우 미흡하였다. HELP 모형의 적용을 위하여 중간유출계수를 제안하였고, 수정된 지수형감쇠 가중함수를 이용하여 지하수 함양량을 산정하였다. HELP 모형의 함양량은 중간유출계수 값에 따라서 많은 차이를 나타내었다. 중간유출계수 값이 0.6인 경우에 HELP 모형과 SWAT 모형사이의 함양량 오차가 가장 작았으

* 교신저자, 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

Prof. Dept. of Civil Engineering, Kyung Hee University, 1 Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 446-701, Korea (e-mail: dohlee@khu.ac.kr)

** 한국건설기술연구원 책임연구원

Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea (e-mail: nwkim@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 책임연구원

Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea (e-mail: imchung@kict.re.kr)

며 일, 월, 연단위 등 다양한 시간규모에 대하여 두 모형사이의 함양량은 비교적 잘 일치하였다. HELP 모형은 SWAT 모형에 비하여 모형구조가 비교적 간단하고 입력변수가 적게 요구되므로 지하수 함양량 산정에 유용하게 적용될 수 있으며, SWAT 모형과 HELP 모형을 병행하여 적용하면 지하수 함양량 산정의 신뢰도가 향상될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지하수 함양량, SWAT 모형, HELP 모형, 보청천

1. 서 론

지하수 함양량은 지하수의 지속적인 개발과 관리를 위하여 파악되어야 하는 중요한 물순환 성분중의 하나이다. 지하수 함양량은 실측이 매우 어려워 다양한 방법으로 간접적인 추정을 하고 있다. 지하수 함양량을 산정하는 여러 방법들에 대한 고찰은 Scanlon et al. (2002)과 배상근 (2002)에 제시되어 있다. 배상근 (2002)은 물수지에 의한 방법, 기저유출분리에 의한 방법, 동위체를 이용하는 방법, 염소이온에 의한 방법, 수치모형에 의한 방법, 지하수 위 변화량으로부터 추계하는 방법, 침투실험을 이용하는 방법, SCS-CN 방법 등 8가지 다양한 지하수 함양량 평가 방법에 대하여 고찰하였으며, Scanlon et al. (2002)은 지하수 함양량을 산정하는 적절한 방법을 선택하는 것은 어려우며 함양량의 시·공간적 규모, 범위 및 신뢰도 등이 함양량 산정방법 선택의 중요한 고려인자가 될 수 있으며 함양량의 신뢰도를 증가시키기 위해 다수의 산정방법을 적용할 것을 추천하였다.

국내·외에서는 물리기반의 물순환 모형을 적용하여 지하수 함양량을 산정하는 여러 연구들이 수행되어 왔다. Arnold et al. (2000)은 유역면적 492,000 km²의 미시시피강 상류유역에 SWAT 모형을 적용하여 지하수 함양량을 산정하였고, Sun and Cornish (2005)도 유역면적 437 km²의 호주 Liverpool Plains 유역에 SWAT 모형을 이용하여 지하수 함양량을 추정하였다. SWAT 모형이외에도 Jyrkama et al. (2002)는 HELP 모형을 이용하여 공간적으로 분포한 함양량을 산정하여 지하수 유동모형의 경계조건으로 적용하였다. Gogolev (2002)는 캐나다 워터루시 지역에 HELP 모형을 적용하여 함양량을 산정하였고, Richards 방정식에 기초하여 비포화 흐름을 모사하는 VS2DT 모형과 HELP 모형을 비교하여 두 모형사이의 최대 오차는 12% 이내임을 제시하였다. 또한 Jyrkama and Sykes (2007)는 HELP 모형이 가지는 적용의 간편성 때문에 HELP 모형을 적용하여 기후변화의 시공간적 변화가 지하수 함양량에 미치는 영향을 파악하였다. Risser et al. (2005)은 lysimeter 및 지하수위 변동법으로 지하수 함양량을 산정하고 HELP 모형의 함양량과 비교하였으며, HELP 모형과 lysimeter 방법 사이의 8년간 연평균 함양량의 차이는 1.8mm, HELP 모

형과 지하수위변동법사이의 연평균 함양량의 차이는 66 mm로 HELP 모형의 함양량 산정결과는 다른 방법과 잘 일치함을 보였다.

국내에서도 물리기반의 물순환 모형을 적용하여 지하수 함양량을 산정하는 추세가 증가하고 있다. 김성준과 채효석 (2000)은 격자기반의 토양수분 추적 모형을 개발하여 유역면적 75.6 km²의 보청천유역 이평교 지점을 대상으로 지하수 함양량을 산정하였다. 김철겸 등 (2007)은 완전분포형 MIKE SHE 모형을 적용하여 경안천 유역에 대한 함양량을 추정하였으며 함양량의 시공간적 분포특성 파악에 분포형 물순환모형의 유용성을 암시하였다. 최근 국내유역의 장기유출해석, 유역수질모의 및 함양량 산정을 위하여 많은 관심을 모으고 있는 SWAT 모형은 기후조건, 토지이용 및 토양조건에 의한 지하수 함양량의 시공간적 변동성을 고려할 수 있으며 경안천, 무심천 등 여러 유역에서 SWAT 모형의 적용성이 검토되었다(김남원 등, 2005; 김남원 등, 2006).

본 연구에서는 물리 기반의 물순환 모형 중에서 모형구조가 간단하고 사용이 간편하지만, 토양층의 비포화흐름을 반영할 수 있으며 국내유역에 대한 적용성이 검토되지 않은 HELP 모형을 선택하여 보청천 유역에 대한 함양량을 추정하였다. HELP 모형과 더불어 SWAT 모형을 병행하여 지하수 함양량을 모의하고, 두 모형사이의 함양량을 비교하여 유역규모에서 지하수 함양량 산정을 위한 물순환 모형의 적용성을 분석하고자 하였다.

2. 물순환 모형 및 대상유역

2.1 SWAT 모형

SWAT 모형은 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양, 토지이용 및 토지관리 상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사량 및 농화학물질의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 Arnold et al. (1993)에 의해 개발되었다. SWAT 모형은 개발된 후에 여러 번 수정을 거쳐 현재는 ArcView GIS와 연계되어 DEM, 토지이용도, 토양도 등의 수치주제도를 이용하여 입력자료를 구축할 수 있다 (Neitsch et al. 2001).

SWAT 모형은 토양과 토지이용 특성에 따라 유역을

HRU로 분할하여, 일 단위를 기본 시간규모로 다음의 물수지 방정식을 기반으로 유출량을 해석한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_i - E_i - W_i - GW_i) \quad (1)$$

Eq. (1)에서 SW_t 는 t 일의 토양수분량, SW_0 는 초기 토양수분량, P_i 는 i 일의 강수량, Q_i 는 i 일의 지표유출량, E_i 는 i 일의 증발산량, W_i 는 i 일의 토양층의 침투량, GW_i 는 i 일의 회귀량을 의미한다.

SWAT 모형에서 토양층 침투량은 Darcy 법칙을 적용하지 않고 단순한 토양수분 저류량 추적방법에 의해 다음 식으로 산정한다.

$$W_i = SW_{ex} (1 - e^{-dt/TT}) \quad TT = \frac{SW_s - FC}{K_s} \quad (2)$$

이 식에서 SW_{ex} 는 침투가능한 토양수분량, dt 는 계산 시간간격, TT 는 침투 유하시간, SW_s 는 포화상태 토양수분, FC 는 포장용수량 상태의 토양수분, K_s 는 토양층 포화 투수계수를 나타낸다. 그리고 SWAT 모형에서 지하수 함양량은 지수형 감쇠가중함수 (exponential decay weighting function)에 의해 계산한다.

$$R_i = (1 - e^{-1/\delta}) W_i + (e^{-1/\delta}) R_{i-1} \quad (3)$$

여기에서 R_i 는 i 일의 지하수 함양량, δ 는 지체시간(일), R_{i-1} 는 $i-1$ 일의 함양량을 의미한다.

2.2 HELP 모형

HELP 모형은 지표유출, 침투, 증발산, 및 침투 등의 토양층에 대한 수문성분을 모의하기 위한 물순환 모형으로 Schroeder et al. (1994)에 의해 개발되었다. 지표유출 성분은 SCS 방법을 이용하고, 잠재증발산은 수정 Penman 식, 실제증발산은 Richtie 식으로 산정한다. 토양층에서 수분 이동은 비포화대에 대한 Darcy 법칙에 기초하여 산정한다. 비포화 투수계수는 Campbell (1974) 식을 이용하

고, 토양수분-토양장력 관계는 Brooks and Corey (1964) 식을 이용하며 HELP 모형에서는 지표하 중간유출, 지하수 유출 및 하도추적 과정은 고려되지 않는다. HELP 모형에서도 일 단위의 시간규모를 사용하며, 최저 토양층에서의 침투량 (PR)은 토양층의 물수지에 기초하여 다음 식과 같이 산정한다.

$$PR = P - (E + Q + \Delta S) \quad (4)$$

이 식에서 P 는 강수량, E 는 증발산량, Q 는 지표유출량, ΔS 는 토양수분 저류량의 변화를 나타낸다. HELP 모형의 적용에서는 SWAT 모형처럼 하부 토양층으로부터 대수층으로 이동하는 지체시간을 고려하고 토양층의 중간유출 (subsurface lateral flow)을 반영하기 위하여 SWAT 모형에서 이용한 지수형감쇠 가중함수를 다음과 같이 수정하여 HELP 모형의 함양량을 산정하였다.

$$R_i = (1 - e^{-1/\delta}) PR_i (1 - \beta) + (e^{-1/\delta}) R_{i-1} \quad (5)$$

여기서 R_i 는 i 일의 함양량, R_{i-1} 는 $i-1$ 일의 함양량, δ 는 지체시간(일), β 는 중간유출계수 (lateral flow parameter)를 의미한다. HELP 모형에서 유역평균 함양량은 HRU별로 함양량을 각각 계산한 다음에 전체 유역면적에 대한 HRU별 면적의 비율을 가중치로 이용하여 산정하였다. Eq. (5)에서 β 값의 범위는 0과 1사이로 $\beta=0$ 은 토양층의 중간유출 손실없이 침투량이 모두 함양됨을 의미하며, β 가 증가할수록 중간유출 손실이 증가하여 함양량이 감소하게 된다. HELP 모형과 SWAT 모형에서 모의되는 수문성분 과정들은 Table 1에서 비교되고 있다. HELP 모형은 중간유출, 기저유출 및 하도추적을 모의하지 못하지만, Darcy식을 이용하여 토양층에서의 비포화 흐름을 고려할 수 있다. 반면에 SWAT 모형은 지표수 및 지하수 유출성분을 모두 고려할 수 있지만, 토양층의 비포화 흐름에 대한 물리적 과정을 단순한 토양수분 저류량 추적방법을 이용하고 있다.

Table 1. Comparison of Hydrologic Processes between SWAT Model and HELP Model

Flow Process	SWAT	HELP
Surface Runoff	SCS Curve Number Equation	SCS Curve Number Equation
Potential Evapotranspiration	Penman-Monteith Equation	Modified Penman Equation
Actual Evapotranspiration	Richtie Equation	Richtie Equation
Percolation	Storage Routing Equation	Darcy Equation
Subsurface Lateral Flow	Kinematic Storage Model	-
Channel Flow	Muskingum Routing Method	-
Recharge	Exponential Weighting Function	Modified Exponential Weighting Function
Groundwater Flow	Hooghoudt Storage Model	-

2.3 대상유역

SWAT 모형과 HELP 모형의 적용을 위하여 수문자료가 장기간에 걸쳐서 수집되어 있는 유역면적 약 350 km²의 보청천 유역 (Fig. 1)의 기대교 수위표를 출구점으로 선정하여 모형을 해석하였다. 보청천 유역의 평균유역경사는 약 24%, 표고는 대부분의 지역이 130~800 m 사이에 분포되어 있으며, 주 토지이용 상태는 산지 (FRST)와 농지 (AGRL)로 구성되어 있다 (Fig. 2).

물순환 모형의 구축을 위해 30m 간격의 DEM, 1:25,000 정밀토양도 및 토지이용도를 이용하였고, 강우자료는 보청

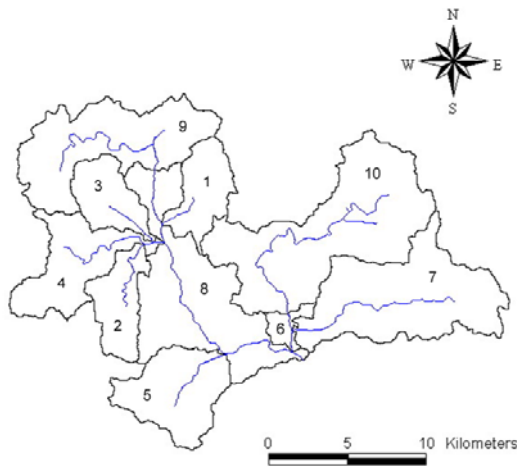


Fig. 1. Bocheong-cheon Watershed Divided into 10 Sub-catchments

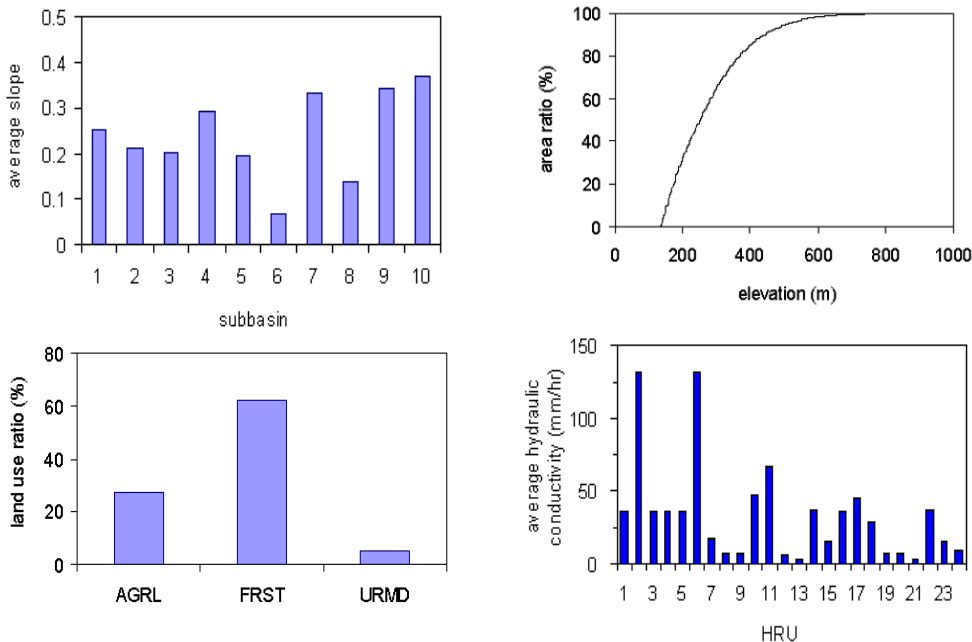


Fig. 2. Characteristics of Bocheong-cheon Watershed

천 IHP 유역의 12개 지점에서 관측된 일강우량 자료를 이용하였으며, 풍속, 일 최고온도, 일 최저온도, 일사량, 상대습도 등의 기상자료는 보은 기상관측소에서 관측된 자료를 적용하였다. SWAT 및 HELP 모형에 필요한 토양특성들은 국립농업과학원의 토양정보시스템 (<http://asis.rda.go.kr>)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 토양층의 포화 수리전도도 (K_s)는 토양정보시스템에서 제공하는 토양층의 토성비를 이용하여 Saxton et al. (1986)의 수리전도도 토양전이합수를 적용하여 산정하였으며 Fig. 2에 HRU별 평균 수리전도도 값이 제시되어 있다. HRU별 평균 수리전도도는 개개 토양층의 수리전도도와 토심을 곱하여 합산한 다음에 토양층의 전체 두께로 나누어서 산정하였다. HRU별 평균 수리전도도는 SWAT 모형에 실제 입력되는 값은 아니며 HRU별 수리전도도의 차이를 보여주기 위하여 제시하였다. 그리고 HRU별 평균 수리전도도 값은 HRU 대표토양의 공간적 변화로 인하여 HRU에 따라서 많은 차이를 보이고 있으며 평균 수리전도도 값이 같은 경우는 HRU의 대표토양이 동일함을 의미한다. 모의대상 유역은 토양도 및 토지이용도를 이용하여 24개의 HRU 및 10개의 소유역으로 구분하여 물순환모형을 모의하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 SWAT 모형의 보정 및 검정 결과

SWAT 모형의 보정 및 검증을 위하여 보청천 기대교 수위관측소의 1987~1990년 및 1992~1996년까지의 일유출량 자료를 이용하였다. SWAT 모형의 매개변수 추정은 Duan et al. (1992)이 개발한 전역 최적화 기법인 SCE-UA

방법을 적용하여 SWAT 모형에 포함된 매개변수들을 자동으로 보정하였다. SCE-UA 방법은 GA (genetic algorithm), Simplex 탐색방법, CRS (controlled random search) 탐색방법에 complex shuffling (집합체의 혼합) 개념을 추가하여 효율적으로 전역 최적해를 찾는 방법으로 물순환 모형의 매개변수 추정에 널리 적용되어 왔으며 모형의 매개변수 추정에 효율적인 방법으로 알려져 있다. SWAT 모형에 대한 SCE-UA 방법의 적용은 국내·외에서 연구된바 있다 (Eckhardt and Arnold, 2001; 이도훈, 2006). SCE-UA 방법은 첫 번째 단계에서 적합 매개변수 공간으로부터 무작위 표본추출에 의해 초기 모집단 (population)을 형성한다. 적합매개변수 공간은 매개변수들의 최소값과 최대값의 범위를 정의하여 결정되며, 초기 집단의 무작위 추출 후에 개체의 모집단은 p개의 complex로 나누어지고, 한 개의 complex는 $2p+1$ 개의 개체로 구성된다. 개개의 complex가 구성된 후에 simplex 알고리즘을 이용하여 개개의 complex를 독립적으로 진화시킨다. 또한 탐색과정의 새

로운 정보를 공유하기 위하여 complex를 주기적으로 혼합 (shuffling)하여 새로운 complex를 형성하고, 수렴조건이 만족될 때까지 반복적 모의를 수행하여 전체 매개변수 공간에 대한 최적해를 찾게 된다. SCE-UA 방법의 적용에서는 complex의 수 (p), sub-complex의 수 (q), 개개 complex에 허용되는 진화단계의 수 (β) 등의 변수들을 정의해야 한다. 본 논문에서 이 변수 값들은 SWAT 모형의 보정 매개변수 수 (n)를 이용하여 다음과 같이 정의되었다: complex의 수는 SWAT 모형의 보정 매개변수 수 (n)와 같게 정의하였고 ($p=n$), sub-complex의 수는 $q=n+1$, 개개 complex의 진화단계의 수는 $\beta=2n+1$ 로 정의되었다.

Table 2는 SWAT 모형의 자동보정에 적용한 매개변수 수 값들을 보여주고 있다. Table 3은 보정기간 및 검증기간에 대한 SWAT 모형의 일유출량 오차들을 나타내고 있다. 값들의 범위와 SCE-UA 방법으로부터 얻은 최적 매개변수 보정기간과 검증기간의 일유출량 평균값은 관측 값이 SWAT 모의 값보다 $2.4\text{m}^3/\text{s}$, $2.3\text{m}^3/\text{s}$ 정도 크게 산정되고

Table 2. The Optimized Parameters of SWAT Model

Parameter	Definition	Minimum Value	Maximum Value	Optimized Value
ALPHA_BF	Baseflow Recession Constant	0.0	1.0	0.31
GW_DELAY	Delay Time For Aquifer Recharge (Days)	1.0	100.0	5.34
GW_REVAP	Revap Coefficient	0.02	0.2	0.079
RCHRG_DP	Aquifer Percolation Coefficient	0.0	1.0	0.004
REVAPMN	Threshold Water Level In Shallow Aquifer For Revap (Mm)	0.0	500.0	193.34
GWQMN	Threshold Water Level In Shallow Aquifer For Baseflow (Mm)	0.0	5000.0	1.13
SLOPE	Average Slope Steepness (M/M)	initial \times 0.75	initial \times 1.25	initial \times 1.1
SLSUBBSN	Average Slope Length (M)	initial	initial+20	initial+11.4
ESCO	Soil Evaporation Compensation Factor	0.01	1.0	0.19
SOL_AWC	Available Water Capacity	initial-0.05	initial+0.05	initial+0.036
CN2	Initial SCS Curve Number	initial-8	initial+8	initial+7.92
SURLAG	Surface Runoff Lag Time (Hours)	0.0	10.0	9.82

Table 3. Performance Statistics of SWAT Model

	Calibration Period (1987~1990)		Validation Period (1992~1996)	
	Observed	SWAT	Observed	SWAT
Average of Daily Flow (m^3/s)	11.2	8.8	7.6	5.3
Standard Deviation of Daily Flow (m^3/s)	37.6	21.2	20.0	13.9
NSEF	0.56		0.71	
R^2	0.60		0.75	

있다. 보정기간과 검증기간에 대한 일유출량의 표준편차 값도 관측 값이 SWAT 모의 값보다 크게 산정되었다. 보정기간과 검증기간의 NSEF (Nash-Sutcliffe Model Efficiency)는 보정기간이 0.56, 검증기간은 0.71로 검증기간이 보정기간보다 더 좋은 결과를 나타내었다. NSEF (Nash-Sutcliffe Model Efficiency)는 물순환 모형의 오차평가에 널리 사용되고 있으며 다음 식에 의해 산정될 수 있다.

$$NSEF = 1 - \frac{\sum_{t=0}^n [Q_o(t) - Q_s(t)]^2}{\sum_{t=0}^n [Q_o(t) - \bar{Q}_o]^2} \quad (6)$$

이 식에서 $Q_o(t)$ 는 관측 일유출량, $Q_s(t)$ 는 모의 일유출량, \bar{Q}_o 는 관측 일유출량의 평균을 나타낸다. Fig. 3과

Fig. 4는 보정기간과 검증기간에 대한 일유출량의 관측 값과 모의 값을 비교하고 있으며 결정계수 (R^2) 값은 보정기간이 0.6, 검증기간이 0.75를 나타내었다.

3.2 함양량 모의결과의 비교

HELP 모형의 함양량은 Eq. (5)의 수정된 지수형감쇠 가중함수를 이용하므로 중간유출계수 β 값이 정의되어야 한다. 적절한 중간유출계수 β 값을 사전에 알 수 없으므로 0과 1사이의 다양한 β 값을 이용하여 함양량을 계산하고, SWAT 모형의 함양량과 비교하여 MAE (mean absolute error), NSEF (Nash-Sutcliffe Model Efficiency), MBE (mean bias error), SDBE (standard deviation bias error) 등 4가지 오차들을 다음과 같이 정의하여 평가하였다.

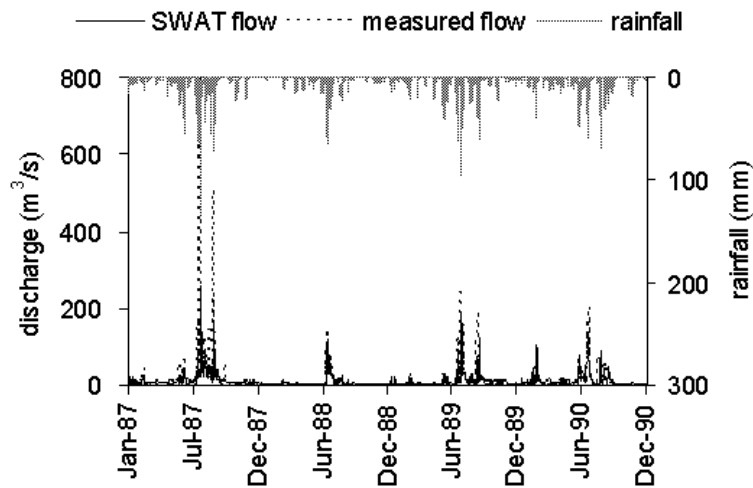


Fig. 3. Comparison of Daily Runoff between SWAT Model and Measured Flow for Calibration Period

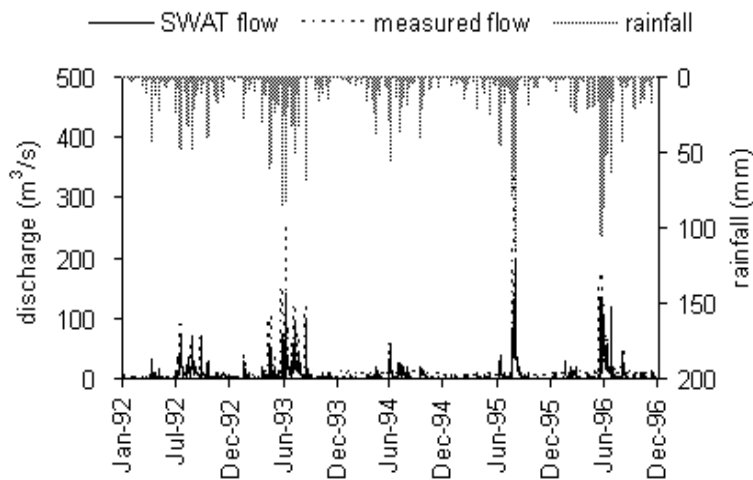


Fig. 4. Comparison of Daily Runoff between SWAT Model and Measured Flow for Validation Period

$$MAE = \frac{\sum_{t=0}^n |R_s(t) - R_h(t)|}{n} \quad (7a)$$

$$NSEF = 1 - \frac{\sum_{t=0}^n [R_s(t) - R_h(t)]^2}{\sum_{t=0}^n [R_s(t) - \overline{R_s}]^2} \quad (7b)$$

$$MBE = |\overline{R_s} - \overline{R_h}| \quad (7c)$$

$$SDBE = |\sigma_s - \sigma_h| \quad (7d)$$

여기에서 R_s 는 SWAT 모형의 일함양량, $\overline{R_s}$ 는 SWAT 모형의 일평균함양량, R_h 는 HELP 모형의 일함양량, $\overline{R_h}$ 는

HELP 모형의 일평균함양량, σ_s 는 SWAT 모형의 일함양량 표준편차, σ_h 는 HELP 모형의 일함양량 표준편차를 각각 의미한다.

Fig. 5에 HELP 모형의 중간유출계수 β 값의 변동에 따른 4가지 오차들의 변화가 제시되었다. 중간유출계수 β 값에 따라서 SWAT 모형과 HELP 모형의 함양량 오차는 큰 차이를 보이고 있으며, 오차기준에 따라서 약간의 차이는 있지만 중간유출계수 $\beta=0.6$ 부근에서 가장 작은 오차를 나타내었다. 따라서 중간유출계수 $\beta=0.6$ 의 모의결과에 대한 HELP 모형의 함양량과 SWAT 모형의 함양량을 Fig. 6과 Table 4에 비교하였다. Fig. 6에서 알 수 있는 것처럼 일 함양량에 대한 결정계수 (R^2) 값은 0.89, 월 함양

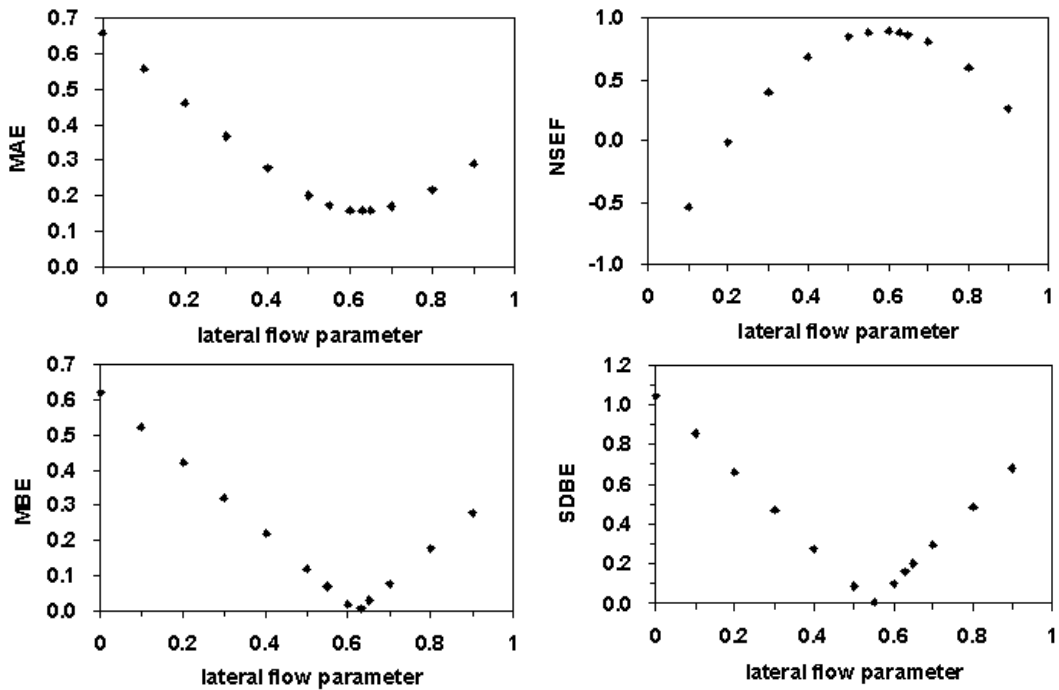


Fig. 5. Error Statistics between SWAT Model and HELP Model for Different Lateral Flow Parameters

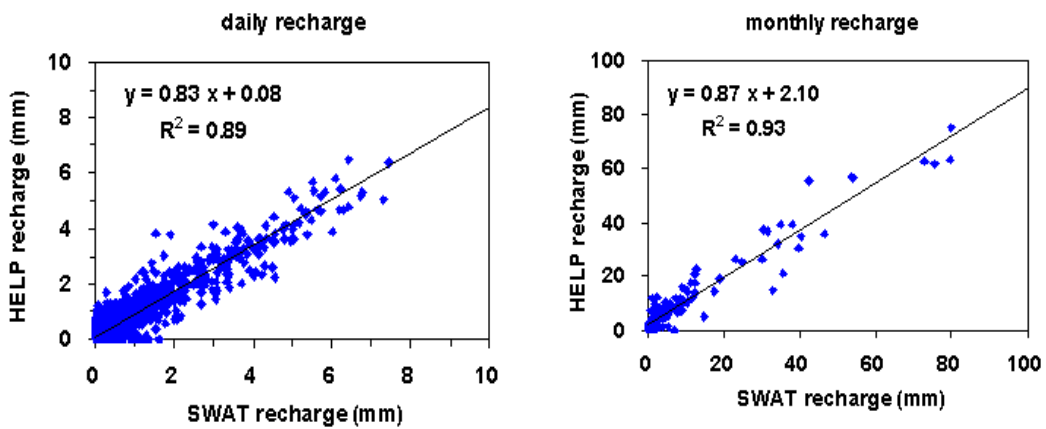


Fig. 6. Comparison of Groundwater Recharge between SWAT Model and HELP Model (The Lateral Flow Parameter β in HELP Model is Specified as 0.6).

Table 4. Annual Groundwater Recharge and Recharge Index (The Lateral Flow Parameter β in HELP Model is Specified as 0.6)

Year	Annual Rainfall (mm)	SWAT Model		HELP Model	
		Annual Recharge (mm)	Recharge Index	Annual Recharge (mm)	Recharge Index
1987	1638.20	238.96	0.15	240.32	0.15
1988	850.03	93.92	0.11	85.99	0.10
1989	1418.09	169.13	0.12	182.14	0.13
1990	1485.43	235.40	0.16	181.39	0.12
1992	1062.94	125.95	0.12	144.64	0.14
1993	1136.61	139.24	0.12	198.19	0.17
1994	756.93	47.30	0.06	57.45	0.08
1995	1001.66	95.70	0.10	95.69	0.10
1996	1178.99	100.59	0.09	128.60	0.11
Average	1169.88	138.47	0.11	146.04	0.12

량에 대한 결정계수 (R^2) 값은 0.93으로 SWAT 모형의 함양량과 HELP 모형의 함양량은 다양한 시간규모에 대하여 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. SWAT 모형의 연평균함양량은 138.47 mm, HELP 모형의 연평균함양량은 146.04 mm로 산정되었고, 연강수량에 대한 연 함양량의 비를 나타내는 함양률 (recharge index)은 SWAT 모형이 0.11, HELP 모형은 0.12로 산정되었다. Table 4에 제시된 두 모형에 대한 연평균함양량과 함양률의 상대오차는 5% 정도로 두 모형으로부터 추정된 함양량 값은 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 SWAT 모형과 HELP 모형을 모의하여 보청천 유역에서의 지하수 함양량을 비교하였다. HELP 모형에서는 중간유출 과정에 대한 고려가 되지 않으므로 토양층의 침투량을 중간유출량과 함양량으로 분리하기 위하여 중간유출계수를 제안하여 수정한 지수형 감쇠가 중합수 방법으로 지하수 함양량을 모의하였다. SWAT 모형과 HELP 모형사이의 함양량 오차는 중간유출계수 값에 따라서 많은 차이를 보이고 있으며, 중간유출계수 $\beta=0.6$ 부근에서 두 모형은 가장 작은 함양량 오차를 나타내었다. 중간유출계수 $\beta=0.6$ 인 경우에 두 모형사이의 일 함양량에 대한 결정계수는 0.89, 월 함양량에 대한 결정계수는 0.93을 나타내었고, 연평균함양량과 함양률의 상대오차는 5% 정도로 두 모형의 지하수 함양량은 다양한 시간

규모에 대하여 잘 일치하였다.

SWAT 모형은 지표수 및 지하수 유출성분과 함양량의 동시 모의가 가능하며 함양량과 수문성분사이의 다양한 관계를 파악할 수 있는 장점이 있지만, HELP 모형에 비하여 모형구조가 복잡하므로 많은 수의 매개변수를 추정해야 하는 문제점이 있다. 반면에 HELP 모형은 SWAT 모형에 비하여 모형구조가 단순하고 입력 매개변수 수가 작은 장점이 있지만, 하도추적 및 지하수 유출성분의 모의가 불가능하다. HELP 모형을 이용하여 함양량을 산정하는 경우에 적절한 중간유출계수의 선택이 중요하며, 유역특성이 다른 여러 유역에 적용을 통하여 HELP 모형의 추가적인 적용성분석 및 검증이 필요하고, 지하수 함양량 산정의 신뢰도 향상을 위하여 SWAT 모형과 HELP 모형을 병행하여 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원이 위탁시행한 건설기술기반구축사업 (05기반구축A03-01) 및 수자원의 지속적 확보기술개발사업 (과제번호:2-2-3)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김남원, 정일문, 원유승 (2005). "시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정방안." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 38(7), pp. 517-526.
- 김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주 (2006). "시공간적

- 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정.” **지하수토양환경**, 한국지하수토양환경학회, 11(5), pp. 9-19.
- 김성준, 채효석 (2000). “격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수 함양량 추정기법 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 33(1), pp. 61-72.
- 김철겸, 김현준, 장철희, 임상준 (2007). “MIKE SHE 모형을 이용한 경안천 유역의 지하수 함양량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 40(6), pp. 459-468.
- 배상근 (2002). “지하수 함양량 산정방법에 대한 고찰.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 35(3), pp. 50-59.
- 이도훈 (2006). “LH-OAT 민감도 분석과 SCE-UA 최적화 방법을 이용한 SWAT 모형의 자동보정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 39(8), pp. 677-690.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface-groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, ELSEVIER, 142, pp. 47-69.
- Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., and Allen, P.M. (2000). “Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin.” *Journal of Hydrology*, ELSEVIER, 227, pp. 21-40.
- Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). “*Hydraulic properties of porous media*.” Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Campbell, G.S. (1974). “A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data.” *Soil Science*, Lippincott Williams & Wilkins, 117(6), pp. 311-314.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1992). “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models.” *Water Resources Research*, AGU, 28(4), pp. 1015-1031.
- Eckhardt, K., and Arnold, J.G. (2001). “Automatic calibration of a distributed catchment model.” *Journal of Hydrology*, ELSEVIER, 251, pp. 103-109.
- Gogolev, M.I. (2002). “Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies.” *Environmental Geology*, Springer, 42, pp. 248-258.
- Jyrkama, M.I., Sykes, J.F., and Normani, S.D. (2002). “Recharge estimation for transient ground water modeling.” *Ground Water*, NGWA, 40(6), pp. 638-648.
- Jyrkama, M.I., and Sykes, J.F. (2007). “The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario).” *Journal of Hydrology*, ELSEVIER, 338, pp. 237-250.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool Version 2000*. Agricultural Research Service, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Risser, D.W., Gburek, W.J., and Folmar, G.J. (2005). *Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States*. Scientific Investigations Report 2005-5038, US Geological Survey, Reston, Virginia.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. (1986). “Estimating generalized soil-water characteristics from texture.” *Soil Science Society of America Journal*, SSSA, 55, pp. 1031-1036.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., and Cook, P.G. (2002). “Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.” *Hydrogeology Journal*, Springer, 10(1), pp. 18-39.
- Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjostrom, J.W., Peyton, R.L. (1994). *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering Documentation for version 3*. EPA/600/R-94/168b, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- Sun, H., and Cornish, P.S. (2005). “Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT.” *Hydrological Processes*, WILEY, 19, pp. 795-807.

논문번호: 09-087	접수: 2009.07.22
수정일자: 2010.02.02/03.08	심사완료: 2010.03.08