

MIKE SHE 모형을 이용한 경안천 유역의 지하수 함양량 산정

Groundwater Recharge Estimation for the Gyeongang-cheon Watershed with MIKE SHE Modeling System

김철겸* / 김현준** / 장철희*** / 임상준****

Kim, Chul Gyum / Kim, Hyeon Jun / Jang, Cheol Hee / Im, Sang Jun

Abstract

To estimate the groundwater recharge, the fully distributed parameter based model, MIKE SHE was applied to the Gyeongang-cheon watershed which is one of the tributaries of Han River Basin, and covers approximately 260 km² with about 49 km main stream length. To set up the model, spatial data such as topography, land use, soil, and meteorological data were compiled, and grid size of 200 m was applied considering computer ability and reliability of the results. The model was calibrated and validated using a split sample procedure against 4-year daily stream flows at the outlet of the watershed. Statistical criteria for the calibration and validation results indicated a good agreement between the simulated and observed stream flows. The annual recharges calculated from the model were compared with the values from the conventional groundwater recession curve method, and the simulated groundwater levels were compared with the observed values. As a result, it was concluded that the model could reasonably simulate the groundwater level and recharge, and could be a useful tool for estimating spatially/temporally the groundwater recharges, and enhancing the analysis of the watershed water cycle.

keywords : MIKE SHE, Groundwater level, Groundwater recharge, Gyeongang-cheon

요 지

본 연구에서는 대상유역인 경안천 유역 (유역면적 260 km²)에 대한 지하수 함양량 추정을 위해, 완전 분포형 모형인 MIKE SHE를 적용하였다. 모형 입력자료로서 DEM, 토지이용도, 정밀토양도 등과 같은 GIS 자료를 구축하고, 기상자료를 이용하여 증발산 입력자료를 생성하였다. 유역 최종 출구점인 경안 수위표 지점에서의 유출자료를 활용하여 모형 보정과 검증을 수행한 결과, 관측치의 경향을 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 유역내 운영되고 있는 마평 지하수위 관측소의 관측지하수위와 모의치를 비교한 결과도 매우 양호하게 나타났다. 모형을 이용하여 대상유역에 대한 연간 지하수 함양량을 산정하고, 기존의 감수곡선법에 의해 계산된 값과 비교한 결과 비슷한 모의값을 보였다. 결론적으로 모형을 통한 지하수위 모의 및 함양량 모의에 신뢰성이 높게 나타났으며, 함양량의 시공간적인 분포 특

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원
Senior Researcher, Water Resources Research Department, Goyangsi, Gyeonggido, 411-712, Korea
(e-mail: cgkim@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원
Research Fellow, Water Resources Research Department, Goyangsi, Gyeonggido, 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Water Resources Research Department, Goyangsi, Gyeonggido, 411-712, Korea

**** 서울대학교 산림과학부 조교수
Assistant Professor, Forest Science Department, Seoul National University, Seoul, 151-921, Korea

성 파악에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

핵심용어 : MIKE SHE, 지하수위, 지하수 함양량, 경안천

1. 서론

유역의 물순환을 평가하기 위해서는 유역내의 수문성분의 기작에 대한 정확한 모의가 선행되어야 한다. 유출모형은 이러한 유역내의 수문순환을 모의해주는 도구로서, 최근에는 분포형 유출모형의 개발 및 적용에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (김성준, 2001).

분포형 유출모형은 유역을 수문학적으로 균일한 소유역 또는 격자망으로 구분하여 적용하는 것으로, 도시화 등 토지이용의 변화나 기타 유역내의 물리적인 특성의 변화가 수문기작에 미치는 영향을 잘 모의할 수 있다. 또한 모형의 매개변수의 대부분이 유역의 물리적 특성이나 관측치로부터 얻어지기 때문에 미계측유역에 적용될 수 있는 장점이 있다. 그러나, 한편으로는 입력자료의 구축과 모형 구동에 많은 시간과 노력과 전문성이 요구되는 등의 단점도 가지고 있다 (김지훈, 1998).

국내의 경우, 과거 오랫동안 수자원은 지표수와 지하수로 분류되어 관리되어 왔으며, 수자원 해석을 위한 모의 모형의 개발 및 적용 또한 그에 따라 구분되어져 왔다. 기존의 대부분의 수문모형들은 강우-유출 관계에 기반을 둔 지표수 흐름에 중점을 두고 있고 지하수 흐름에 대해서는 물수지를 맞추기 위한 요소로서만 역할을 하고 있기 때문에, 지표수-지하수 상호 성분 교환 및 이동 해석에 대한 이해가 부족한 현실이다.

지하수 분야에서 많이 활용되고 있는 MODFLOW 모형 (McDonald and Harbaugh, 1988) 또한 지하수의 시공간적 분포에 장점을 보이긴 하지만, 지표수 흐름이나 하천수 흐름, 침투 등의 다른 성분과의 연계가 부족하기 때문에 전반적인 유역 수문순환 해석이 곤란하다.

유엔의 국제인구행동연구소 (PAI)에서 우리나라를 물부족국가로 분류하고 있듯이, 최근 물부족 문제의 대두와 함께 수자원 확보 및 효율적 이용에 대한 관심이 높아지면서 지표수-지하수 연계 운영에 대한 필요성과, 이에 따른 연계 모의 모형에 대한 개발 및 적용도 점차 증가하고 있다.

1990년 이후, 미국을 중심으로 WDWBM (Walton *et al.*, 1995), SWATMOD (Sophocleous *et al.*, 1997), ISGW (SDI Environmental Service, 1997), HSE (Lal *et al.*, 1998) 등의 지표수-지하수 결합 모형이 발표되고 있으며, 국내에서도 SIRG (건설교통부, 1999), SWAT-

MODFLOW (김남원 등, 2004) 등의 개발을 통해 연계 운영 및 모의에 대한 시도를 하고 있다.

이러한 모형들이 기존 모형들의 부분적인 결합을 통해 지표수-지하수 연계를 시도하는 것에 비해, 1977년 영국·프랑스·덴마크 등 유럽 3개국의 공동연구로 개발된 SHE (Système Hydrologique Européen) 모형을 기본으로 하여 DHI에서는 MIKE SHE를 발표함으로써 (Abbott *et al.*, 1986), 지표수-지하수의 연계를 비롯하여 각 수문성분간의 완전연계 및 시공간적인 분포에 대한 모의를 가능하게 하였다.

본 연구에서는 MIKE SHE 모형을 이용하여 경안천 유역에 적용함으로써, 대상유역에 대한 모형 적용성의 평가와 함께 지표수-지하수, 그리고 하천과의 연계를 통한 유역 모델링을 수행하고, 지하수 함양량의 시공간적인 분포 특성을 검토하고자 한다.

2. MIKE SHE 모형

MIKE SHE 모형 (DHI, 1999)은 1977년부터 유럽 3개국 (영국, 프랑스, 덴마크)이 공동으로 개발하여 광범위한 응용을 선보이며 오늘날에 이르게 됐으며, 전신은 SHE (Système Hydrologique Européen) 모형 (Abbott *et al.*, 1986)이다.

MIKE SHE 모형은 토양층을 중심으로 물순환의 단계에서 발생하는 모든 수문성분을 모의하는 물리적 기반의 공간분포형 모형이며, 농업지역 저수지에서의 유수량, 수질 및 유사 이동의 모의가 가능하다. 특히, 인위적인 물순환 변화의 결과 평가, 지표수와 지하수를 통합한 넓은 범위의 수자원과 환경적인 문제들의 분석, 그리고 수자원계획과 관리를 위한 동적인 모형이다.

MIKE SHE 모형에서의 물이동 모듈 WM은 전체 모형 시스템에서 가장 기본이 되는 모듈로서, Fig. 1과 같이 차단-증발산 성분, 지표면-하도 흐름 성분, 비포화대 흐름 성분, 지하수 흐름 성분, 대수층-하천 교환 성분, 용설 성분 등으로 구성되어 있다

모형에서 차단 및 증발산은 수정 Rutter 모형 (Rutter *et al.*, 1971) 및 Penman-Monteith 방법에 의해 엽면차단용량과 잠재증발산량을 계산한 후, Kristensen and Jensen (1975) 방법을 이용하여 실제증발산량을 계산한다. 지표면 수로 흐름 성분은 격자의 경계를 따라 이동하는 것으로 가정하여 연속방정식과 운동량방정식

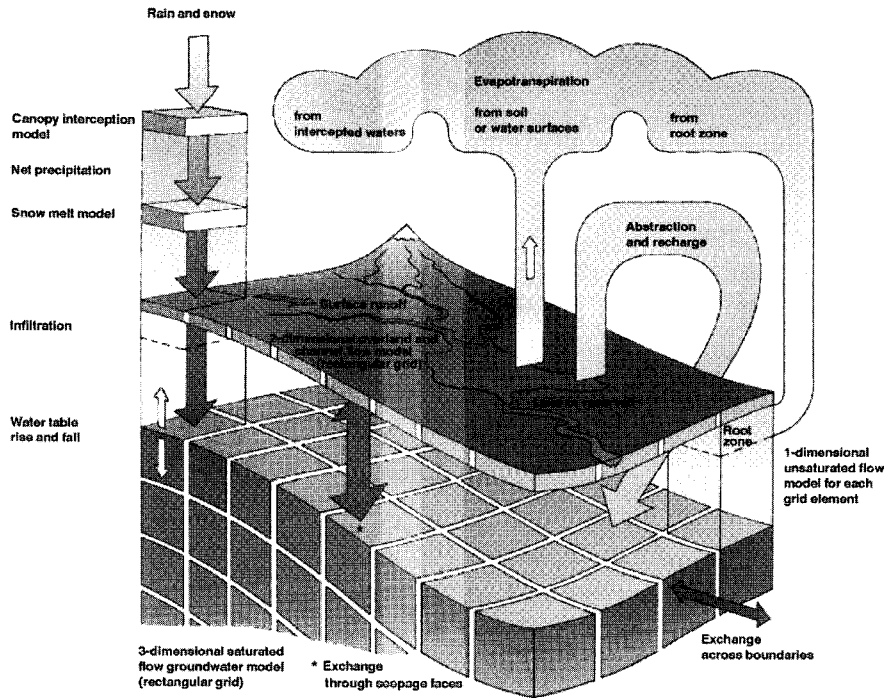


Fig. 1. Hydrologic processes of MIKE SHE (Refsgaard and Storm, 1995)

(St. Venant 식)을 이용하여 계산하고, 비포화대 흐름 성분은 수직 흐름만을 가정하여 1차원 Richards 식을 유한차분법을 이용하여 풀이해 모의한다. 지하수 흐름 성분, 즉 포화대 흐름은 3차원 Boussinesq 식의 편미분 방정식을 이용하여 수두의 시공간적 변화를 계산한다.

3. 대상 유역 및 모형 입력자료 구축

모형 적용을 위해 선정된 경안천 유역은 Fig. 2와 같이 경기도 광주와 용인 지역을 포함하여 팔당호로 유입하는 49.5 km 길이의 중규모 하천으로, 복잡한 토지이용 특성을 지니고 있고 유역 대부분이 상수원 보호구역에 속해 있으며 최근 도시화가 활발히 진행되고 있어 유역의 수문 및 수질 변화에 대한 관심이 높은 지역이다. 유역의 토지이용 현황은 임야 79%, 주거지 4%, 농경지 16%, 기타 1%로서 임야가 차지하는 비중이 높은 지역으로 고산준령은 없으나, 유역경사 28.8%로 비교적 급한 지세를 나타내고 있다 (경기도, 2001).

본 연구에서는 광주시 (구)경안교에 위치하고 있는 경안 수위관측소 지점을 유역 출구점으로 하는 경안천 상류 지역을 대상유역으로 선정하였으며, 유역면적은 약 259 km²이고, Fig. 2와 같이 주요 지천을 기준으로 9개의 소유역으로 구분하였다.

모형 적용을 위한 기상자료로는 강우량과 증발산이 있다. 강우자료는 유역내 5개 우량관측소 자료를 활용

하여 강우의 공간적 분포를 고려할 수 있도록 구축하였으며, 증발산은 기준잠재증발산량으로부터 실제증발산량을 추정하는데, 유역내에 기상관측소가 없어 부득이 약 22 km 떨어져있는 수원기상관측소의 일별 기상자료로부터 계산된 Penman-Monteith 기준증발산량을 입력자료로 구축하였다.

이 밖에 지형자료는 환경부에서 구축한 30 m DEM을 활용하고 (Fig. 3(a)), 토지이용자료는 NGIS 사업으로 구축된 토지피복현황도로로부터 Fig. 3(b)와 같이 활엽수림, 침엽수림, 혼합림, 논, 밭, 도시, 기타 등 7개로 구분하였다.

토양층 (비포화대)에 대한 모형 입력자료 구축은 Fig. 3(c)와 같이 농촌진흥청 농업과학기술원의 정밀토양도 (1:25,000)를 활용하여 유역내 40개 토양통에 대한 분포 현황을 구축하고, 각 토양통에 대해 깊이별로 USDA에서 분류하고 있는 12개 토성으로 구분하였다. 각 토성별 흐름 모의를 위해 van Genuchten (1980)의 Soil moisture retention curve와 Averjanov (1950)의 Hydraulic conductivity function을 적용하였으며, 토성별 수리특성치는 USDA ARS에서 제시하고 값을 이용하였다.

지하수대에 대해서는 하나의 대수층으로 가정하고, 유역전체에 걸쳐 일정한 지하수대를 설정하였다. 유역내 용인 마평지하수위 관측소의 관측공 제원에 따라 대

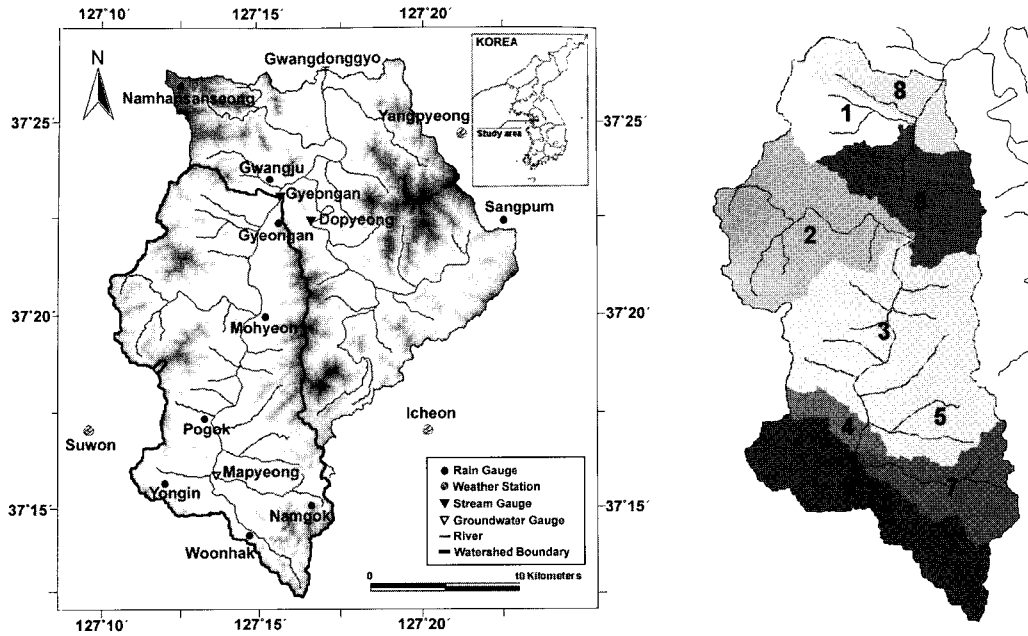


Fig. 2. Hydrological monitoring network and sub-watersheds

수층의 깊이는 지표하 9.5 m로 설정하였으며, 초기 지하수위는 1997년 이후 관측수위를 참고하여 지표하 4 m로 설정하였다.

또한, 경안천 유역과 같이 중규모의 유역에 대한 수문해석에서는 하천구간에 대한 하도추적이 필요하기 때문에, 강이나 하천에 대한 1차원 부정류 해석이나 유사 및 오염물질의 거동 해석을 위한 목적으로 DHI

에 의해 개발된 MIKE 11 모형을 MIKE SHE 모형과 연계하여 경안천 유역에 대한 수문순환 해석을 수행하였다. MIKE 11 모형의 구동을 위해서 우리 7톱 길라잡이 (건설교통부·한국수자원공사, 2002)와 경안천수계 하천정비기본계획 (경기도, 2001)을 참고하여, Fig. 3(d)와 같이 하천망을 구성하고 하천구간별 하천단면 등을 구축하였으며, MIKE 11 모형의 수치해석을 위해

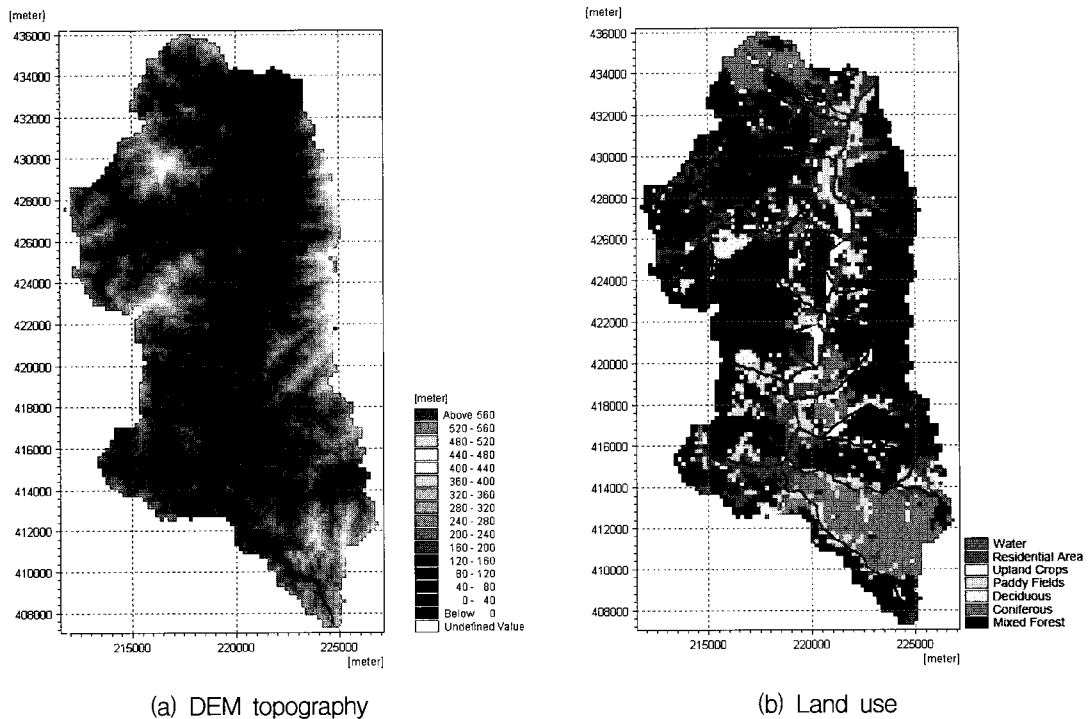
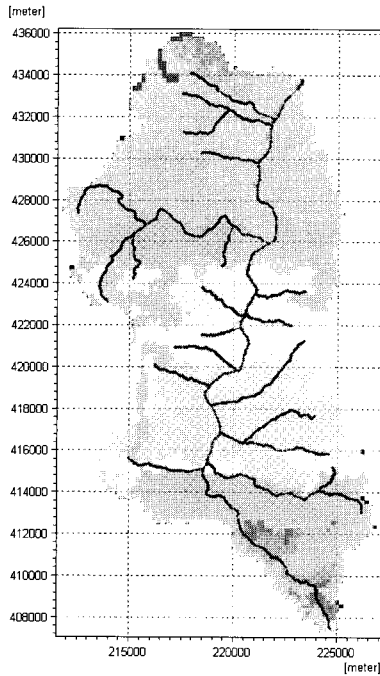
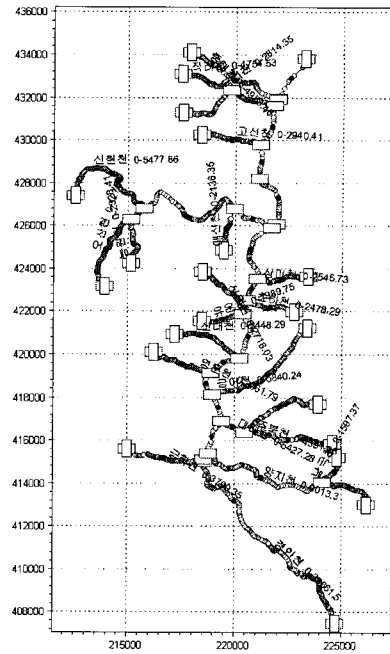


Fig. 3. Model input data for the study area(continued)



(c) Soil type



(d) Stream network

Fig. 3. Model input data for the study area

경안천 수위표 지점의 수위자료를 하부경계조건으로 이용하였다.

MIKE SHE와 같은 분포형 모형의 계산 시간 및 모의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 격자 크기의 결정은 격자 크기에 따른 토지이용 면적비 등의 변화 등을 검토하여 200×200 m 격자를 계산 격자로 적용하였다 (한국건설기술연구원, 2003).

4. 모형 보정 및 검증

4.1 매개변수 결정

MIKE SHE 모형에는 많은 수의 매개변수가 있으며, 이 모든 매개변수에 대한 보정을 수행하는 것은 가용 자료 및 보정 수행상 쉽지 않기 때문에, 우선은 관련 문헌들을 통하여 추정 가능한 매개변수 (지표면 조도계수, 하도 조도계수 등)나 기존의 연구결과로부터 어느 정도 모의 신뢰성을 확보할 수 있는 매개변수 (증발산 관련 계수)에 대해서는 보정을 수행하지 않고, 자료 구축이 가장 어렵고 불확실성이 높은 지하수대 지역의 매개변수인 투수계수 및 배수깊이 (drainage level), 시간상수 (time constant) 등의 매개변수에 대해서만 유역 출구점에서의 관측 하천유량과 모의 유량 비교를 통해 보정을 수행하였다. 보정 방법은 시행착오법에 의해 단계별 매개변수 변화에 의한 영향을 검토하고, 분할표본절차 (split sample procedure) (McCuen, 2003)를 이용하여

1988년부터 1989년의 자료에 대해 보정을 수행하고, 1990년과 1991년에 대해 검증을 수행하였다. 또한 모형의 초기조건을 안정화하기 위해 1987년부터 MIKE SHE 모형을 구동하였다.

대수층에 대한 비산출율 (specific yield)은 Freeze and Cherry (1979)의 문헌을 참고하여 0.2의 값을 적용하였으며, 저류계수 (storage coefficient)는 0.0001 1/m의 값을 초기값으로 지정한 후 값의 변화에 따른 유출 수문곡선의 변화를 검토한 결과 거의 영향이 없는 것으로 나타나, 0.0001 1/m을 적용하였다.

MIKE SHE에서의 배수깊이와 시간상수는 작은 인공수로나 도랑과 같은 자연적 인위적인 배수시스템을 정의하는 경계조건으로서의 지표 배수량을 모의하는데 사용되고 있으며, 다음 식과 같이 배수흐름을 모의하고 있다.

$$q = (h - Z_{dr}) \cdot C_{dr} \quad (1)$$

여기서, q 는 단위면적당 배수량 ($m^3/sec/m^2$), h 는 배수되는 셀의 수두 (m), Z_{dr} 는 배수깊이 (m), C_{dr} 는 시간상수 (1/sec)이다. 시간상수는 배수속도를 의미하는 것으로서 배수시스템의 밀도나 배수시설 주변의 투수성 조건 등을 나타내는 변수이며, 수문곡선의 첨두치에 주로 영향을 주고, 배수깊이는 수문곡선의 감수부에 더 많은 영향을 주는 특징이 있다.

본 연구에서도 유역내 소규모 배수시설 (농경지 배수로 등)을 고려하기 위한 목적으로 모형내 지표배수에 대한 옵션을 적용하였으며, 유역내 배수시설에 대한 자세한 정보를 알 수 없기 때문에, 셀별 배수깊이 및 시간상수 값을 정의하지 않고, 유역 전체에 대해 하나의 커다란 배수시설을 가정하고 그에 따른 유역 대표치를 적용하였다.

DHI에서는 조정값으로서 배수깊이를 지표면 아래 1 m, 시간상수는 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ 1/sec의 범위로 제시하고 있고, Feyen *et al.* (2000)은 배수깊이 0.5 m 이하인 경우 배수깊이에 따른 모의 결과의 영향이 크지 않고 시간 상수에 따른 영향이 더 크게 작용한다는 연구 결과를 제시한 바 있어, 이를 참고하여 배수깊이는 -0.75 m를 적용하고, 시간상수에 대해서는 값의 변화에 따른 모형 거동 특성을 고려하여 1×10^{-7} 1/sec의 값을 적용하였다.

지하수대에 대한 수리전도도의 경우 일반적으로 수직 수리전도도는 지표유출과 배수흐름 및 침투유출에 더 크게 영향을 주고, 수평 수리전도도는 상대적으로

기저유출에 영향을 준다 (Feyen *et al.*, 2000). 본 연구에서는 대상 유역에 대해 수평수리전도도와 수직수리전도도를 각각 $[1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-3}]$ 의 범위 안에서 단계별로 두 값을 서로 변화시켜가며 모의 유량과 관측 유량을 시행착오법에 비교 검토한 결과, 수평 수리전도도 1×10^{-6} m/s, 수직 수리전도도 2×10^{-5} m/s일 때 모의 통계적 특성이 좋게 나타났다.

4.2 보정 및 검증 결과

Fig. 4는 보정 결과로부터 경안 수위관측소 지점에서 1988~1989년 동안의 관측 및 모의 유출 수문곡선을 비교한 것이며, Fig. 5는 보정된 모형 매개변수를 이용하여 1990~1991년에 대해 검증한 결과이다.

Fig. 4의 보정 결과에서 보듯이 보정기간 전반에 걸쳐 관측 수문곡선의 모양을 잘 모의하고 있으며, Fig. 5의 검증에서는 1990년 10월에서 1991년 6월 사이의 저수시 일부 감수곡선에서 다소 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6의 관측유량과 모의유량의 일대일 비교에서도 보여지듯이 검증기간 중 약 2 m

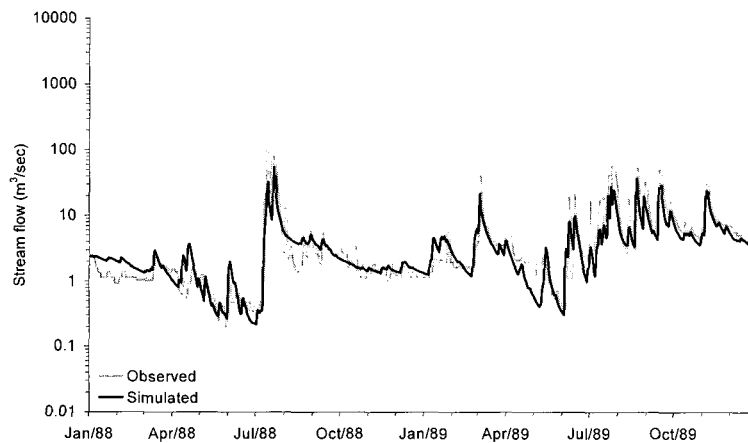


Fig. 4. Observed and simulated hydrographs for calibration period

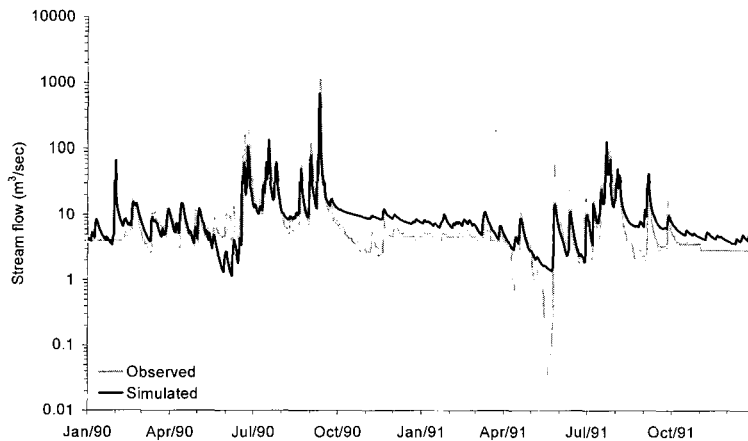


Fig. 5. Observed and simulated hydrographs for validation period

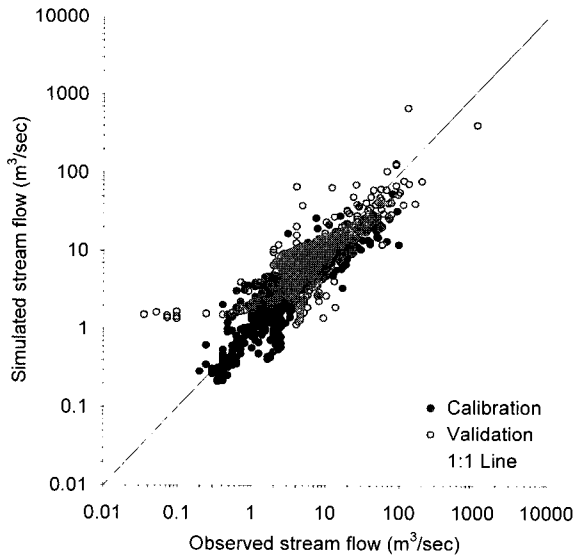


Fig. 6. Comparison of the observed and simulated daily stream flows

/sec 이하의 유량에서 모의치가 관측치보다 크게 나타나고 있으며, 그 이상의 유량값에서는 모의치와 관측치의 경향이 잘 일치하고 있다. Table 1은 보정과 검증 결과에 대한 통계치 분석 결과로서, 각 통계치의 산정 방법은 다음과 같다 (Maidment, 1992).

Relative bias =

$$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_f(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o(i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o(i)} \quad (2)$$

Root mean square error =

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_f(i) - Q_o(i)]^2} \quad (3)$$

$$\text{Mean absolute error} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_f(i) - Q_o(i)| \quad (4)$$

Table 1. Statistical criteria for the calibration and validation results

	RB ¹⁾	RMSE ²⁾ (m ³ /sec)	MAE ³⁾ (m ³ /sec)	ME ⁴⁾	R ²
Calibration (1988~1989)	-0.27	6.92	2.40	0.56	0.69
Validation (1990~1991)	0.04	34.79	6.29	0.39	0.40

1) RB: Relative Bias

2) RMSE : Root Mean Square Error

3) MAE : Mean Absolute Error

4) ME : Nash-Sutcliffe Model Efficiency

Nash-Sutcliffe model efficiency =

$$\frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - \bar{Q}_o(i)]^2 - \sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_f(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - \bar{Q}_o(i)]^2} \quad (5)$$

여기서, Q_f 와 Q_o 는 각각 모의치와 관측치를 나타낸다.

보정기간의 경우 모형효율이 0.56, 결정계수가 0.69 값을 나타냈으며, 검증기간에 대해서는 이보다 다소 낮은 모형효율 0.39와 결정계수 0.40의 값을 나타내고 있다. 하지만, 검증기간에서도 2 m³/sec 이상의 유량에 대해서는 모형의 결과가 실측치를 잘 따르고 있고, 전반적으로 그 경향을 잘 모의하고 있으므로, 장기적인 측면에서의 유출 모의에는 안정된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 지하수 함양량 산정

5.1 지하수위 비교

모형의 지하수 모의에 대한 신뢰성 검증을 위해 관측 지하수위와 모의 지하수위 비교를 수행하였다. 현재 유역내에는 한 개의 지하수위 관측소 (용인 마평관측소)가 운영 중이나, 1997년부터 자료를 보유하고 있기 때문에 본 연구에서 적용한 모의 기간과는 일치하지 않는다. 따라서, 장기적으로 보았을 경우 지하수위의 급격한 변화가 없다는 가정하에 모형의 모의 기간을 연장하여 얻어진 1997년 이후의 지하수위에 대해서 Fig. 7과 같이 비교하였다.

겨울철과 봄철에 다소 차이를 보이고 있으나, 그 차이가 50 cm 미만이며, 전반적인 변화 경향이 비슷하게 나타나는 것으로 미루어 모형으로부터 얻어지는 지하수 모의 결과가 어느 정도 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

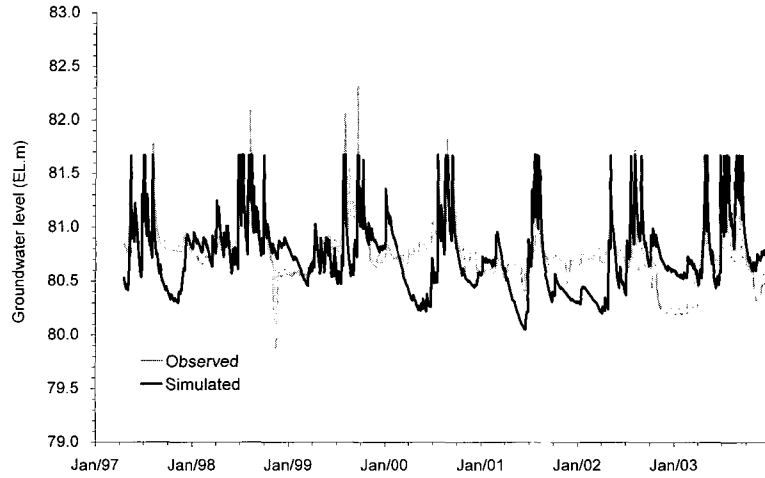


Fig. 7. Observed and simulated groundwater levels at Yongin Mapeong station

Fig. 8은 유역내 지점별 지하수 깊이를 비교한 것으로서, Site 1 (마평관측소 지점)과 Site 5 (경안수위관측소 지점)는 하천에 인접한 지점이며, 나머지 지점들은 각 소유역 중상류부의 산림지역에 위치하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 하천 인접 지점인 Site 1과 Site 5의 지하수위 깊이가 가장 작고 (즉, 지하수위가 하천수위에 가장 근접하고), 나머지 지점들은 이보다 깊게 (즉, 지하수위가 상대적으로 낮게) 나타남을 알 수 있었다. 또한, 시기별 변화를 살펴보았을 경우, 위밍업 기간인 1987년은 제외하고 나머지 기간들에서 여름철 강우량이 집중되는 시기에는 지점별 지하수위 깊이가 차이가 크지 않으며, 겨울철과 봄철의 갈수기 동안에 지점별 차이가 상대적으로 크게 나타남으로써, 홍수기와 갈수기 동안의 지하수의 변화를 잘 모의하고 있으며, 지점별 비교를 통해 지하수위 변화의 공간적인 분포 특성

또한 잘 파악할 수 있는 것으로 판단된다.

5.2 지하수 함양량 비교

Table 2는 연간 지하수 함양량을 비교한 것으로서, MIKE SHE에서의 지하수 함양량은 모의된 여러 수문 성분 중에서 Unsaturated zone에서 Saturated zone으로의 흐름량이 (+)인 경우는 함양되고 (-)인 경우는 반대로 배출되는 것으로 하여 연간 순수 함양량을 산정하였다.

비교 대상인 지하수 감수곡선법과 준분포형 모형인 SWAT에 의한 결과는 김남원 등 (2005)의 연구 결과를 참고한 것으로, 비교 결과 1990년은 비슷한 값을 가지고, 1991년의 경우는 차이가 남을 알 수 있었는데, 이 차이는 앞선 검증 결과에서 나타난 것으로 판단된다.

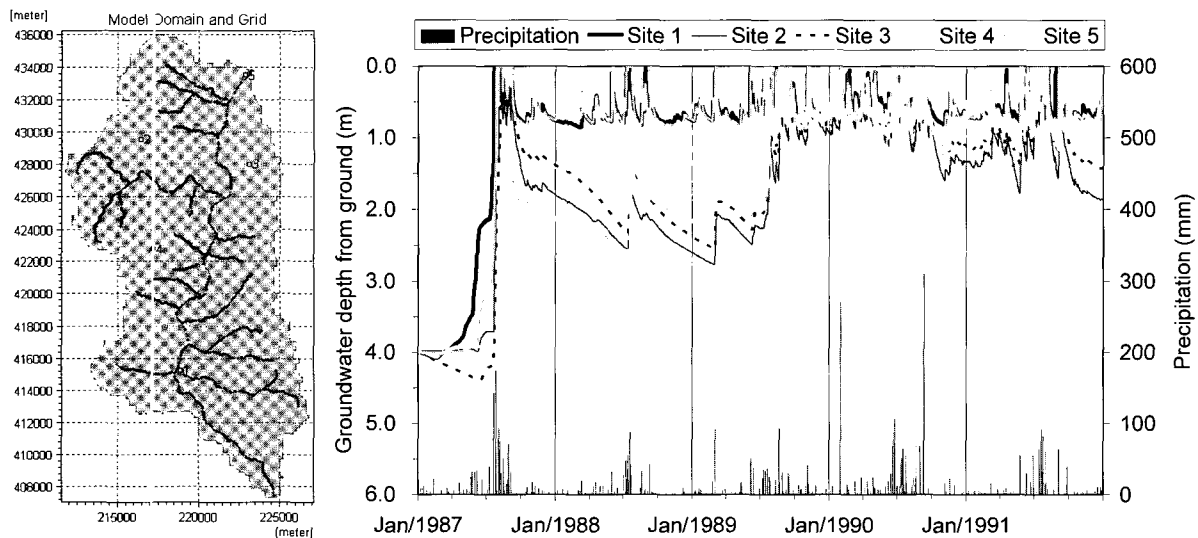


Fig. 8. Groundwater depths at several sites within the watershed

Table 2. Annual groundwater recharge

Year	by groundwater recession curve method ¹⁾	by SWAT model ¹⁾	by MIKE SHE model
1990	685	650	636
1991	327	344	487

1) 김남원 등 (2005)

Fig. 9는 월별 지하수 함양량 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 함양량이 음의 값을 나타내는 것은 함양에 비해 지하수에서 하천으로의 배출량이 크다는 것을 의미한다. 또한, 1990년 9월의 경우 강우량이 많음에도 불구하고 함양량이 0 이하인 것은 9월 8일에서 9월 11일 사이의 단기간 동안 533 mm의 비교적 많은 양의 강우가 집중적으로 내리는 바람에 대부분 지표 월류로 유출되어 실제 강우에 의한 함양량이 적고, 상대적으로 나머지 기간 동안에는 지하수에서 하천으로의 배출량이 더 크게 나타났기 때문인 것으로 파악되었다. 즉, 연간 지하수 함양량에 있어서 강우 총량도 중요하지만 강우의 시간적 분포도 매우 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

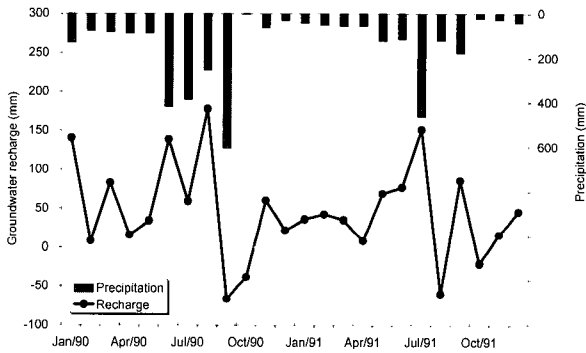


Fig. 9. Monthly variation of groundwater recharge

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 완전분포형 지표수-지하수 연계 모형인 MIKE SHE 모형에 대해 경안천 지역의 물리적 가용자료 및 관련 문헌을 통한 자료 구축을 통해 모형 적용성을 평가하고, 이로부터 지하수 거동의 시공간적인 특성에 대해서 살펴보았다.

모형의 적용을 위해 기상자료를 비롯한 DEM 지형자료, 토지이용자료, 토양자료, 식생, 포화대 및 비포화대 등의 공간분포형 입력자료 구축과 매개변수를 결정하고, MIKE 11 모형과의 연계 운영을 위해 하천망 구성 및 주요 하천구간에 대한 단면자료를 구축하였으며, 모형 계산 효율 및 모의 신뢰성을 고려하여 200 m의 계산격자를 적용하였다.

분할표본절차에 따라 시행착오법을 이용하여 단계별

매개변수 변화에 따른 유출 변화를 검토함으로써 주요 매개변수에 대한 보정을 수행하였다. 모형 보정을 통한 검증 결과 수문곡선의 일부 감수부 및 홍수시의 첨두유량에서 약간의 차이가 나타나긴 하였으나, 관측 유출 경향을 잘 모의하고 통계적 분석 결과 또한 양호하여 장기적인 측면에서의 유출 모의 안정성을 확인할 수 있었다.

유역내 관측 지하수위와의 비교를 통해 지하수 모의의 신뢰성을 확인하였으며, 지점별 지하수위 비교로부터 지하수위 변화의 시간적, 공간적 거동 특성을 파악할 수 있었다.

또한, 기존의 지하수위 감수곡선법이나 SWAT 모형으로부터 얻어진 함양량 결과와의 비교를 통해 함양량 모의에 대한 안정성을 확보하고, 월별 지하수 함양량 변화 비교로부터 강우에 따른 함양과 배출 관계를 검토함으로써, 지하수 함양의 시간적인 분포 특성을 파악할 수 있었다.

이상의 결과는 보다 정교한 유역의 수문순환 해석과, 지하수 거동에 대한 시공간적 변화 및 지하수 함양의 분포 특성 파악에 많은 활용이 될 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 여전히 많은 매개변수들이 자료의 부족 및 관측 자료의 오차 등으로 인해 불확실성이 높기 때문에 이에 대한 보완이 계속되어야 할 것이며, 특히 신뢰성 있는 지표수-지하수 연계 운영을 위해서는 지하수 포화지대에 대한 가용자료가 충분히 구축되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 건설교통부 (1999). **지표수-지하수 연계운영 시스템 개발**, '98 건설기술연구개발 최종보고서 R&D/98-0005.
- 건설교통부·한국수자원공사 (2002). **우리 그림 길라잡이**.
- 경기도 (2001). **경안천수계하천정비기본계획**, 수원.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004). "완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 : (I) 모형의 개발." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2005). "시공간적 변동성을 고

- 려한 지하수 함양량의 추정 방안.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제7호, pp. 517-526.
- 김성준 (2001). “분포형 수문·수질 모델링의 최근 동향과 활용방안.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권, 6호, pp. 33-45.
- 김지훈 (1998). **지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용**. 석사학위논문, 서울대학교.
- 한국건설기술연구원 (2003). **건강한 물순환체계 구축을 위한 유역진단기법 개발연구**, 건기연 2003-060.
- Abbot, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen J. (1986). “An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, SHE : 1. History and philosophy of a physically-based distributed modeling system.” *Journal of Hydrology*, 87, pp. 45-59.
- Averjanov, S.E. (1950). “About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation. In English Collection, Vol. 7. As quoted by P. Ya Palubarinov, 1962.” *The Theory of ground water movement* (English translation by I.M. Roger DeWiest. Princeton University Press, Princeton, NJ), pp. 19-21.
- DHI (1999). *MIKE SHE Water Movement: User manual*. Denmark: Hørsholm, Danish Hydraulic Institute.
- Feyen, L., Vazquez, R., Christianens, K., Sels, O., and Feyen J. (2000). “Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 47-63.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Kristensen, K.J., and Jensen, S.E. (1975). “A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration.” *Nordic Hydro.*, 6, pp. 170-188.
- Lal, A.M.W., Belnap, M., and Van Zee R. (1998). “Simulation of Overland and Groundwater Flow in the Everglades National Park.” *Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference in Memphis, Tennessee*, Volume One, American Society of Civil Engineers, pp. 610-615.
- Maidment, D.R. (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc., pp. 26.2-26.3.
- McCuen, R.H. (2003). *Modeling hydrologic change : Statistical methods*. Boca Raton, Fla., Lewis Publishers.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model.” U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, 528p.
- Refsgaard, J.C., and Storm, B. (1995). In: Singh, V.P.,(Ed.), “Computer Models of Watershed Hydrology.” Water Resources Publications, Englewood, USA, pp. 809-846.
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C., and Morton, A.J. (1971). “A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of corsican pine.” *Agric. Meteorol.*, 9, pp. 267-384.
- SDI Environmental Service, Inc. (1997). “Water Resource Evaluation and Integrated Hydrologic Model of the Central Northern Tampa Bay Region.” Final Report ISGW/CNTB Model SDE Project No. WCF-690, Prepared for West Coast Regional Water Supply Authority, Clearwater Florida.
- Sophocleous, M.S., Perkins, S.P., Stadnyk, N.G., and Kaushal, R.S. (1997). *Lower Republican Stream-Aquifer Project*. Final Report, Kansas Geological Survey Open File Report 97-8, 1930 Constant Avenue, University of Kansas, Lawrence, KS 66047-3726.
- van Genuchten, M.T. (1980). “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp. 892-898.
- Walton, R., Martin, Jr., T.H., Chapman, R.S., and Davis, J.E. (1995). *Investigation of Wetlands Hydraulic and Hydrological Processes, Model Development, and Application*. Wetlands Research Program Technical Report WRP-CP-6 prepared for US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

(논문번호:07-15/접수:2007.02.07/심사완료:2007.06.18)