

# SWAT-MODFLOW 모형의 수리지질 매개변수 민감도 분석

## Sensitivity analysis of hydrogeologic parameters in SWAT-MODFLOW model

김남원\*, 정일문\*\*, 이정우\*\*\*, 원유승\*\*\*\*

Nam Won Kim, Il Moon Chung, Jeongwoo Lee, Yoo Seung Won

---

### 요 지

SWAT-MODFLOW 모형은 물리적 기반의 준 분포형 모형인 SWAT모형의 지하수 모듈을 분포형 모형인 MODFLOW로 대체하여 하천과 대수층간의 수위차이에 따른 물교환량으로 지하수 유출량을 결정하는 완전연동형 지표수-지하수 통합모형이다. 이 모형을 구동하기 위해서는 유역자료, 기상자료, 하천특성자료, 토지이용자료, 토양자료, 작물자료, 지하수자료 등 다양한 입력 자료를 필요로 한다. 이러한 입력 자료의 변동양상에 따라 모형의 결과가 크게 다르게 나타나므로 모형의 입력 매개변수 변화에 따른 모형의 반응을 분석하여야 한다. 본 연구에서는 지하수유출해석을 담당하는 MODFLOW 모형의 수리지질학적 매개변수 변화에 따른 모형의 반응을 검토하였다. SWAT-MODFLOW 모형을 경안천 유역에 적용하여 투수계수, 저류계수, 하상수리전도도 등의 주요 수리지질학적 매개변수가 지하수 유출현상에 미치는 증감과 변화율 등을 정량적으로 분석하였다. 유역출구점에서의 연평균 지하수유출량의 변화, 하천과 대수층의 상호작용에 따른 지하수 유출량 시계열의 변화 등을 분석하여 그 결과를 제시하였다.

**핵심용어** : SWAT-MODFLOW, 민감도 분석, 지표수-지하수 통합모형

---

### 1. 서 론

김남원 등(2004a, b)에 의해 개발된 SWAT-MODFLOW 모형은 물리기반의 준 분포형 유출모형인 SWAT 모형(Arnold 등, 1993; Arnold 등, 1995)의 지하수 해석 모듈을 분포형 모형인 MODFLOW 모형(McDonald와 Harbaugh, 1988)으로 대체한 것으로 하천과 대수층간의 수위 차이에 따른 상호 물교환량으로 지하수 유출량을 결정하게 되는 완전연동형 지표수-지하수 통합모형이다. 이 모형을 구동하기 위해서는 유역정보, 기상정보, 하천특성정보, 토지이용정보, 토양정보, 지하수정보 등 다양한 입력 자료를 필요로 한다. 이러한 입력 자료의 변동양상에 따라 모형의 결과가 다르게 나타나므로 모형의 입력 매개변수 변화에 따른 모형의 반응을 분석하여야 한다. 본 연구에서는 지하수유출해석을 담당하는 MODFLOW 모형의 수리지질학적 매개변수 변화에 따른 모형의 반응을 검토하였다. 이를 위해 SWAT-MODFLOW 모형을 경안천 유역에 적용하여, 투수계수, 저류계수, 하상수리전도도 등의 주요 수리지질학적 매개변수가 지하수 유출현상에 미치는 증감과 변화율 등을 정량적으로 분석하였다. 유역출구점에서의 연평균 지하수유출량의 변화, 하천과 대수층의 상호작용에 따른 지하수유출 시계열의 변화 등을 도시적으로 제시하였다.

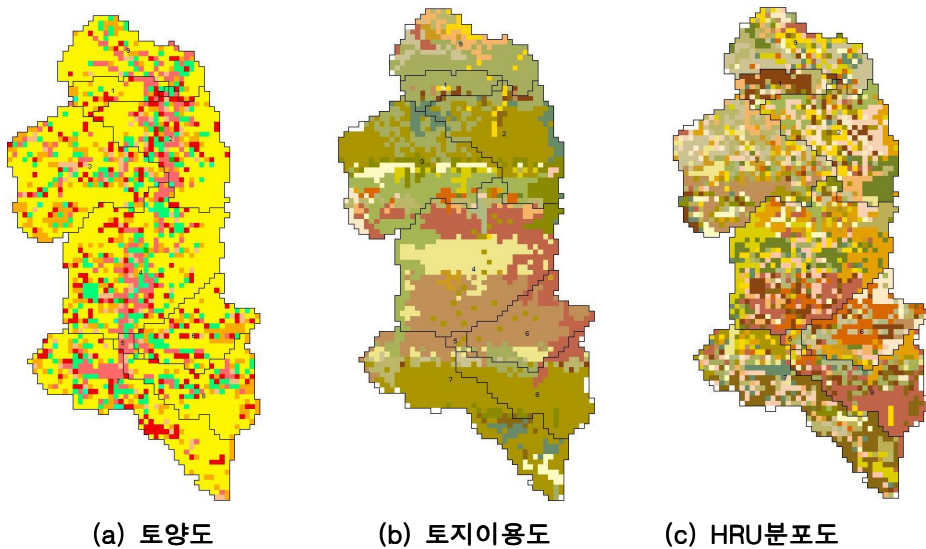
---

\* 정회원·한국건설기술연구원 수석연구원·E-mail : nwkim@kict.re.kr  
\*\* 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원·E-mail : lmchung@kict.re.kr  
\*\*\* 정회원·한국건설기술연구원 Post-doc·E-mail : ljw2961@kict.re.kr  
\*\*\*\* 정회원·건설교통부 하천정보센터 연구사·E-mail : yswon@moct.go.kr

## 2. 경안천 유역에 대한 SWAT-MODFLOW 모형의 민감도 분석

### 2.1 모형의 입력자료 구축

SWAT-MODFLOW 모형의 민감도를 분석하기 위해서 경안수위관측소를 기준으로 상류유역 259.2 km<sup>2</sup>를 모의대상유역으로 하였다. 수치표고모델, 토지이용도, 정밀토양도 등의 GIS 데이터와 그림 1과 같이 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 구한 HRU(Hydrologic Response Unit) 분포도를 활용하여 모형의 입력 자료를 구축하였다. 지하수 유출해석을 위해서 한 개의 격자크기를 300m×300m로 하여 총 123×126개의 격자망을 생성하였으며, 경계조건으로서 상부는 함양 플럭스 조건, 하천이 위치한 셀은 시간중속수두 조건, 유역 외는 무흐름 조건을 부여하였다. 함양률과 하천수위는 SWAT 모형으로부터 일단위로 모의되어 MODFLOW 모형의 입력자료로 활용되었으며, 하천과 대수층간의 수위차에 따라 물교환량이 계산되어 지표수-지하수 연계흐름이 모의되었다.



(a) 토양도 (b) 토지이용도 (c) HRU분포도  
그림 1. 경안천 유역의 DEM, 토양도, 토지이용도, HRU분포도

### 2.2 모형의 민감도 분석

민감도 분석 매개변수 및 그 범위는 표 1과 같다. 각 매개변수의 하한치와 상한치는 임의의 기준값을 기준으로 10개 등급으로 구분하였고, 각 매개변수의 변화에 따른 모의치 반응을 분석하여 그림 2 ~ 그림 7에 나타내었다.

표 1. 민감도 분석 매개변수

기호	매개변수		범위			
	설명	단위	기준치	하한치	상한치	변동폭
K	투수계수	m/d	1.0	0.01	2.0	0.2
S	저류계수	-	0.1	0.001	0.2	0.02
K/M	하천바닥층의 수리전도도	1/d	0.5	0.01	1.0	0.1

그림 2와 그림 3은 투수계수  $K$  변화에 따른 SWAT-MODFLOW 모형으로부터 산정된 연 평균 지하수유출량의 반응을 비교하여 나타낸 것이다. 투수계수는 등방 균질로 가정하였다. 저류계수가 매우 작은 경우를 제외하고는 투수계수가 증가함에 따라 지하수유출량이 증가하며 그 변화폭이 커지는 경향을 나타내고 있다. 저류계수가  $S=0.001$ 인 경우 변화가 둔감한 것으로 나타났는데, 이는 저류계수가 매우 작은 값일 때에는 투수계수보다는 저류계수에 모형이 지배를 받기 때문인 것으로 판단된다. 그림 3에서 음의 값은 하천에서 대수층으로의 유입을 의미하고 반대로 양의 값은 대수층에서 하천으로 지하수유출을 의미한다. 홍수기 하천수위가 높은 일부 시계열 구간을 제외하고는 대수층에서 하천으로 지하수유출이 발생하고 있다. 투수계수가  $K=2.0$  m/d와  $K=0.2$  m/d인 경우를 비교해보면, 투수계수가 클수록 더 많은 양의 지하수유출이 일어나고 있으며, 두 경우 간에 연중 지하수유출 편차가 거의 일정하게 나타났다.

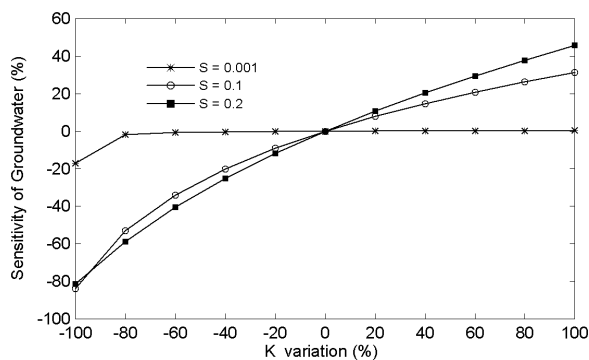


그림 2. 투수계수에 따른 지하수유출의 민감도

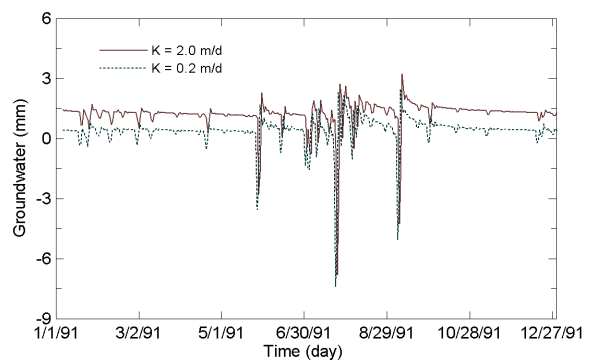


그림 3. 투수계수에 따른 지하수유출 시계열

저류계수  $S$  변화에 대한 모의치의 반응을 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 3에 제시된 바와 같이 저류계수가 감소함에 따라 연 평균 지하수유출이 증가하는 경향을 보이고 있다. 투수계수가 작은 경우에는 저류계수 변화에 따라 지하수유출의 민감도가 지수 함수적으로 변하는 것을 알 수 있으며, 투수계수가 커짐에 따라 저류계수 변화에 대한 민감도가 점차 선형적으로 변하고 그 변화폭이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 그림 4에서 보이는 바와 같이  $S$  값이 작을수록 지하수위의 시간에 대한 변화가 커져서 풍수기 함양에 의한 지하수위의 가파른 상승에 따른 지하수유출의 증가에서 기인한 것으로 보인다. 그림 4를 보면 함양기 7월 ~ 9월에는 저류계수가 작을수록 지하수위의 상승으로 하천수의 대수층으로의 유입이 줄어들어 따라 일부 홍수발생 일을 제외하고는 전반적으로 양의 값을 유지하고 있으며, 최대와 최소치간의 진폭 또한 줄어들었다. 갈수기에는 그림 4의 시계열 모의 결과에서 알 수 있듯이 저류계수가 작을수록 갈수기 지하수유출과 하천유출의 감소율이 더 커짐을 알 수 있다. 따라서 저류계수는 지하수유출의 크기뿐만 아니라, 갈수기 기저유출의 감소율에도 영향을 미치는 것으로 보인다.

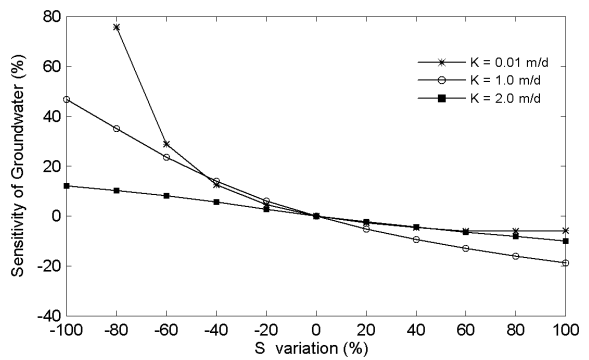


그림 4. 저류계수에 따른 지하수유출의 민감도

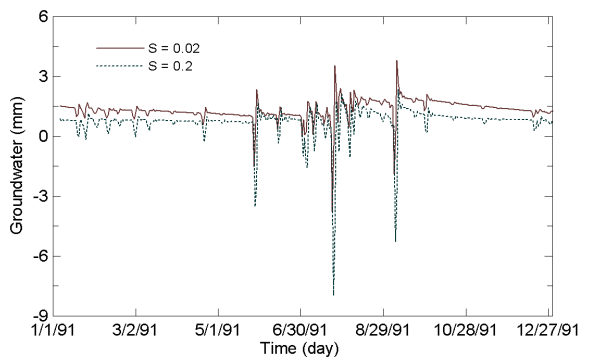


그림 5. 저류계수에 따른 지하수유출 시계열

하천바닥층의 투수계수를 하천바닥층 두께로 나눈 값인  $K_{Riv}/M$ 에 따른 모형의 민감도 분석 결과를 그림 6과 그림 7에 나타냈다. 그림 6에 제시된 바와 같이  $K_{Riv}/M$  변화가 80%를 초과할 때를 제외하고는 지하수유출량 변화폭은 10% 미만으로 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 연 단위 지하수유출량의 변화는 크지 않더라도 그림 7에서 보이는 바와 같이 지하수유출고 시계열은  $K_{Riv}/M$ 에 따라 시간적으로 큰 편차를 보이고 있다.  $K_{Riv}/M=1$ 과 같이 그 값이 비교적 큰 경우는 하천-대수층간 유동량이 크게 발생하여 지하수유출의 진폭이 증가한 것을 알 수 있다. 반면에 하천바닥층의 수리전도도  $K_{Riv}/M$ 가 작은 경우에는 연중 거의 일정한 지하수유출이 일어나고 있다. 하천바닥층의 수리전도도의 변화는 지하수유출고의 시간적인 분포 양상을 결정하는 주요 인자임을 확인할 수 있다.

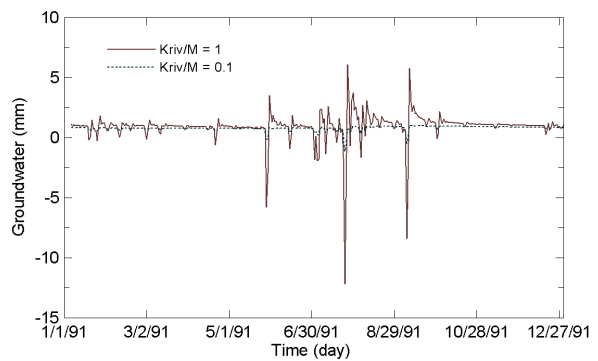
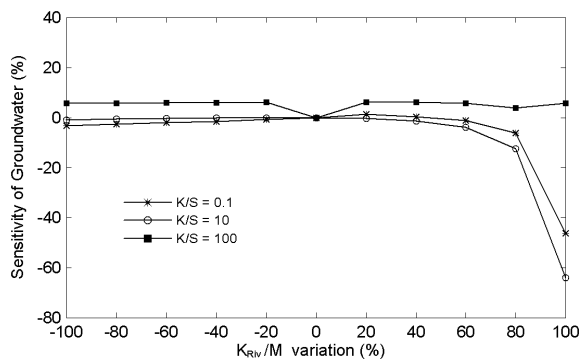


그림 6. 하상수리전도도에 따른 지하수유출 민감도    그림 7. 하상수리전도도에 따른 지하수유출시계열

#### 4. 결 론

SWAT-MODFLOW모형을 이용한 지표수 지하수 연동해석을 중소규모 유역인 경안천에 적용하여 투수계수, 저류계수, 하상수리전도도 등의 주요 수리지질 매개변수가 지하수유출에 미치는 증감과 변화율 등을 정량적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 투수계수 변화에 따른 지하수 유출의 민감도를 분석한 결과, 투수계수의 변화는 연 단위 지하수 유출량의 크기에 지배적인 역할을 하며, 투수계수 증감에 따른 일 단위 지하수유출 편차는 연중 거의 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 저류계수 변화에 따라 지하수유출의 민감도가 지수 함수적으로 변화했으나, 투수계수가 커짐에 따라 저류계수 변화에 대한 민감도가 점차 선형적으로 변하고 그 변화폭이 줄어드는 양상을 나타내었다. 또한, 저류계수는 지하수유출량의 크기뿐만 아니라 갈수기 기저유출의 감소율에도 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
- (3) 하상수리전도도 변화에 따른 연 단위 지하수유출량의 변화는 크지 않으나, 일 단위 지하수 유출량에는 큰 편차를 보여 지하수 유출고의 시간적인 분포 양상을 결정하는 주요 인자인 것으로 분석되었다.

#### 감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). 완전 연동형 SWAT- MODFLOW 결합모형, (I)모형의 개발, 한국수자원학회 논문집, 제37권 제6호, pp. 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). 완전 연동형 SWAT- MODFLOW 결합모형, (II)모형의 적용, 한국수자원학회 논문집, 제37권 제6호, pp. 509-515.
- Arnold, J. G., P.M. Allen, and G. Bernhardt (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*. Vol. 142. pp.47-69.
- Arnold, J. G., J. R. Williams and D. R. Maidment (1995). Continuous-time water and sediment-routing model for large basin. *Journa. of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 121. No. 2, pp. 171-183.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh. (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, 528 p.