

개선된 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 토양수-지하수 상호작용 해석

Analysis of Soil Water and Groundwater Interaction Using Improved SWAT-MODFLOW model

김남원*, 이정우**, 정일문***, 원유승****

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

요 지

지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW는 토양수가 침투과정을 거쳐 지하수로 유입되는 일방향 구조를 갖고 있어 지하수위 상승 및 하강에 따른 토양수량, 침투량, 중간유출량 등 수문성분량의 변화를 고려할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 지하수위 변화에 따른 토양수의 분포양상 변화를 고려할 수 있도록 토양수-지하수간의 연결 구조를 양방향으로 개선하여 두 영역간의 연결성을 강화하였다. 지하수위가 상승할 경우 토양대와 지하수대간의 중첩 영역이 생기게 되는데, 이 중첩 영역을 지하수대로 간주하여 영역 내 흐름거동이 지하수 유동 메커니즘을 따르는 토양수-지하수 결합루틴을 새롭게 제시하였다. 이 결합루틴은 지하수 상승, 하강에 따라 토양수대의 두께가 변하는 가변 토양층 방식(variable soil layer method)으로 계산을 수행할 수 있도록 코드를 구성하였다. 개선된 SWAT-MODFLOW 모형을 무심천 유역에 적용하여 토양수와 지하수간의 상호작용을 해석하고 하천저지대와 같이 지하수위 상승지역에서의 수문성분량의 분포를 보다 현실적으로 구현할 수 있음을 입증하였다.

핵심용어 : 지표수-지하수 통합모형, SWAT-MODFLOW, 토양수-지하수 상호작용

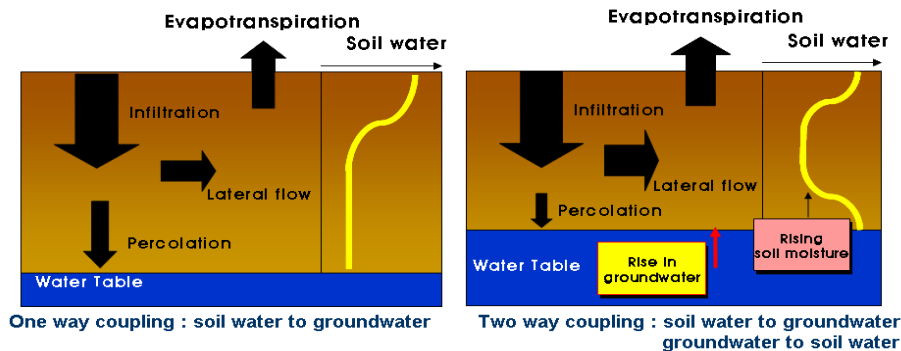
1. 서 론

준분포형 유역수문모형인 SWAT과 지하수 유동해석모형인 MODFLOW의 결합은 Sophocleous 등 (1997)에 의해 처음으로 시도되었으며, 최근 들어 순차적 혹은 완전연동형 방식으로 두 모형을 결합하여 지표수-지하수 통합 유출모의에 활용한 연구가 다수 수행되었다(Perkins와 Sophocleous, 1999; Conan 등, 2003; Menking 등, 2003; 김남원 등, 2004a, b; Galbiati 등, 2006; Kim 등, 2008). 특히, 김남원 등(2004a, b)에 의해 개발된 SWAT-MODFLOW는 국내외 최초로 완전연동형 방식으로 결합된 모형으로서 하천-대수층 상호작용 해석, 지하수 함양의 공간분포 해석, 양수에 의한 지하수계와 하천유량의 변화 해석 등 지표수, 지하수와 관련된 다양한 현안 문제를 해결하는데 유용하게 활용될 수 있는 도구이다.

SWAT-MODFLOW 모형에서 토양수와 지하수간의 결합은 그림 1(a)와 같이 토양수가 침투과정을 거쳐 지하수대로 유입되는 일방향 구조를 갖고 있어 지하수위 상승 및 하강에 따른 토양수량, 침투량, 중간유출량 등 수문성분량에 미치는 영향을 고려할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 지하수위 변화에 따른 토양수의 분포양상 변화를 고려할 수 있도록 그림 1(b)와 같이 토양수와 지하수간의 연결 방식을 양방향 구조로 개선하였다. 개선된 SWAT-MODFLOW 모형을 무심천 유역에

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원 · E-mail : nwkim@kict.re.kr
** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : lhw2961@kict.re.kr
*** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : imchung@kict.re.kr
**** 정희원 · 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 연구사 · E-mail : yswon@kict.re.kr

적용하여 개선 효과를 검토하였다.

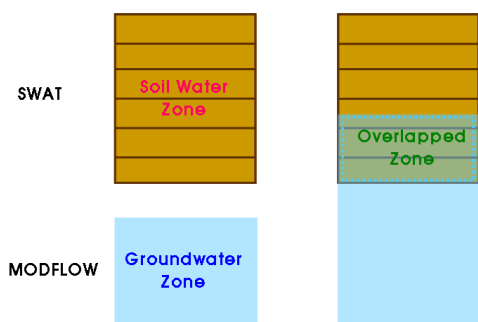


(a) 개선 전 (b) 개선 후

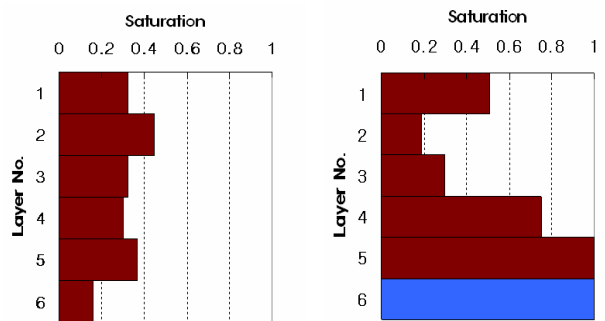
그림 1 토양수-지하수 연결성 개선

2. SWAT-MODFLOW 모형의 토양수-지하수 연결성 개선 및 효과분석

지하수위가 토양수대 최하단부 보다 높게 형성되었을 경우에는 지하수대로 유입되는 침투량을 억제하는 루틴을 새롭게 제시하여 SWAT-MODFLOW에 모형에 추가하였다. 그림 2와 같이 지하수위가 상승할 경우 토양대와 지하수대간의 중첩영역(overlapped zone)이 생기게 되는데, 본 연구에서는 이 영역을 지하수대로 간주하여 이를 기존 토양수대에서 배제하는 가변 토양층 방식(variable soil layer method)을 개발하였다. 이 방식에서는 지하수위 상승 하강에 따라 토양층 개수 및 두께가 변하며, 중첩역의 흐름거동은 MODFLOW에 의해 지배되도록 계산처리 과정을 코딩하였다.



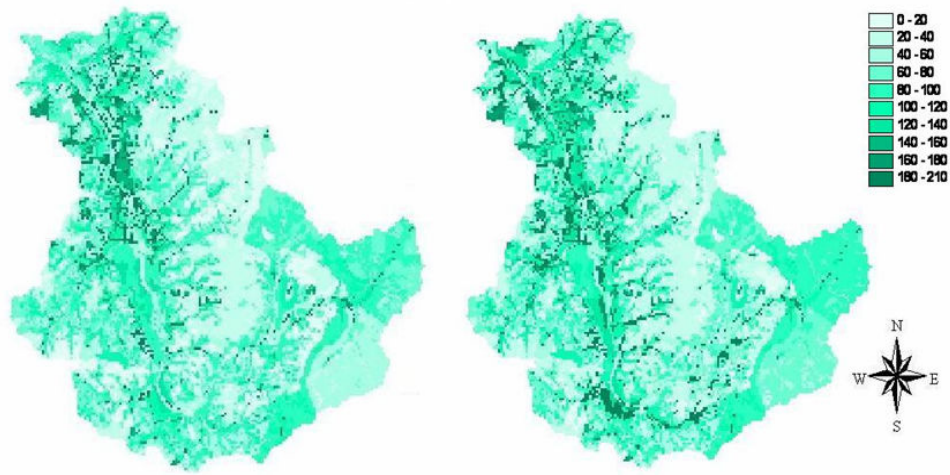
(a) 개선 전 (b) 개선 후
그림 2. 지하수위 상승에 따른 중첩역



(a) 개선 전 (b) 개선 후
그림 3. HRU No.735의 토양층의 포화도

개선 후의 효과를 분석하기 위하여 모형을 청주시를 관통하는 무심천 유역에 적용하였다. 무심천 유역의 유역 현황 및 입력자료 등은 기발표된 보고서(한국건설기술연구원, 2007)에 수록되어 있다. 그림 3은 가변 토양층 방식 사용 유무에 따른 결과로서 무심천 유역의 HRU 번호 735번의 토양수의 포화도를 나타낸 것이다. 그림 3(b)와 같이 지하수위 상승의 영향으로 침투량이 제한됨에 따라 토양수가 적체되어 하부 토양층의 포화도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 개선 전후의 지표면 유출성분(2003년 9월)의 공간적 분포도로서 모형 개선 후에는 하천 저지대에서 지하수 상승의 영향으로 지표면 유출성분이 다소 증가한 것을 확인할 수 있으며, 그림 5와 같이 토양대의 포화도(2003년 9월)를 보면 개선 전, 후에 따른 확연한 차이를 볼 수 있다.



(a) 개선 전

(b) 개선 후

그림 4. 개선 전, 후 지표면 유출량의 공간분포도 비교



(a) 개선 전

(b) 개선 후

그림 5. 개선 전, 후 토양 포화도의 공간분포도 비교

그림 6은 무심천 유역에 대하여 2002년부터 2005년까지 모의된 수문 성분량의 개선 전, 후의 크기를 비교 도시한 것으로 침투량의 제한으로 함양의 감소로 인한 지하수유출이 작아지고 토양 수분량 증가에 따라 지표면 유출이 증가한 것을 알 수 있다.

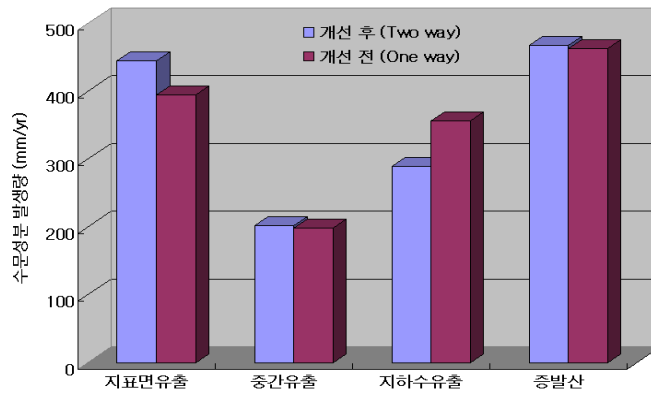


그림 6. 개선 전, 후 무심천 유역의 수문성분량 비교

3. 결론

지표수-지하수 결합모형인 SWAT-MODFLOW의 토양수-지하수간의 연결 구조를 양방향으로 변경하여 지하수위 상승이 수문성분에 미치는 영향을 고려할 수 있게 모형을 개선하였으며, 이를 무심천 유역에 적용한 결과는 다음과 같다.

- 1) 지하수위가 토양수대 최하단부보다 높게 위치해 있는 경우 토양수대로부터 지하수대로의 침투량이 제한됨에 따라 토양수가 적체되어 하부 토양층의 포화도가 증가하는 것을 구현할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 하천저지대와 같이 지하수위 상승지역에서의 수문성분량의 분포를 보다 현실적으로 나타낼 수 있음을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). "완전 연동형 SWAT- MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발." 한국수자원학회 논문집, 제37권 제6호, pp. 499-507.
2. 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). "완전 연동형 SWAT- MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용." 한국수자원학회 논문집, 제37권 제6호, pp. 509-515.
3. 한국건설기술연구원 (2007). 지표수 수문성분 해석시스템 개발, 21세기 프론티어 연구사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업 2단계 연구보고서.
4. Conan, C., F. Bouraoui, N. Turpin, G. de Marsily, and G. Bidoglio (2003). "Modeling flow and nitrate fate at catchment scale in Brittany (France)." *J. Environ. Qual.*, 32(6): 2026-2032.
5. Council, G.W. (1999). *A Lake Package for MODFLOW (LAK2): Documentation and User's*

Manual, Version 2.2, HSI Geotrans, Sterling, Virginia, USA.

6. Galbiati, L., F. Bouraoui, F.J. Elorza, and G. Bidoglio (2006). "Modeling diffuse pollution loading into a Mediterranean lagoon: Development and application of an integrated surface-subsurface model tool." *Ecol. Model*, 193(1-2): 4-18.
7. Kim, N.W., I.M. Chung, Y.S. Won., and J.G. Arnold (2008). "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *Journal of Hydrology* (in press).
8. Menking, K.M., K.H. Syed, R.Y. Anderson, N.G. Shafike, and J.G. Arnold. (2003). "Model estimates of runoff in the closed, semiarid Estancia basin, central New Mexico, USA." *Hydrol. Sci. J.*, 48(6): 953-970.
9. Perkins, S.P., and M. Sophocleous. (1999). "Development of a comprehensive watershed model applied to study stream yield under drought conditions." *Groundwater*, 37(3): 418-426.
10. Sophocleous, M.S., S.P. Perkins, N.G. Stadnyk, and R.S. Kaushal (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.