

SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 유역내 양수효과 모의

Simulation of pumping effect in a watershed by using

SWAT-MODFLOW model

김남원*, 원유승**, 정일문***

Nam Won Kim, Yoo Seung Won, Il Moon Chung

요 지

본 연구는 SWAT-MODFLOW에 포함된 양수모듈 (MODFLOW의 well package와 SWAT의 결합)을 경안천 유역에 시험적으로 적용한 것이다. SWAT-MODFLOW 모형에서 SWAT 모형의 대수층과 MODFLOW 모형의 Well Package의 연계는 함양우물과 배출우물 모두 사용이 가능하며 이 중 얇은 대수층에서의 배출우물에 관한 적용을 수행하였다. 물이동의 목적지는 하천, 저수지일 수도 유역외일 수도 있는데 양수된 물이 유역 밖으로 소비되는 경우로 국한하였다. 이를 위해서 소유역내 MODFLOW의 셀에 배출정을 위치시키고 두 가지 경우의 양수량에 대해 지하수위 변화와 물수지 변화를 살펴보았다. 양수 후 일정기간이 지난 시점에서 양수정 영향권내 유역 단면(남-북방향)에서의 지하수위 변화를 살펴본 바 개선된 양수모듈은 유역내 물이동을 효과적으로 묘사하고 있으며 지하수 유출량의 감소분은 하천으로 옮겨져 지표수 증가분으로 계산되고 있음을 물수지 변화를 통해 확인할 수 있었다.

핵심용어 : SWAT-MODFLOW결합모형, 양수모듈, 물이동, 영향권

1. SWAT-MODFLOW에서 양수에 의한 물이동

SWAT 모형에서 유역 내·외로의 물이동은 관개(irrigation), 물이동(water transfer), 점원 또는 유입량(point source or inlet discharge), 소비수량(consumptive water use) 등 4가지 방법을 이용할 수 있다. 수원형태는 크게 대수층(얇은대수층, 깊은대수층), 하천, 저수지, 유역외 등이 있으며, 물의 도착지 형태는 HRU(관개), 하천, 저수지, 대수층, 유역외 등이 있다. 본 고에서는 각각의 수원형태에 대하여 물의 도착지 형태별 물 이동 방법과 이와 관련된 SWAT 모형의 소스코드 및 수량, 수질 고려여부 등과 원래 SWAT 모형에서는 고려되지 않는 부분의 개선하였다. SWAT 모형의 물 이동 부분 개선에 관련하여 이용된 물 이동 방법은 모두 "water transfer"이고, 이에 관련된 서브루틴인 transfer.f 파일에서 소스코드가 수정되었다.

수원형태가 대수층인 경우, MODFLOW 모형의 Well Package와 모두 관련되어 있고, 다른 수원형태의 대하여 물의 도착지 형태가 대수층인 경우가 MODFLOW 모형의 Well Package와 관련되어 있다. 수원형태가 대수층인 경우는 MODFLOW 모형에서 배출우물이며, 물의 도착지 형태가 HRU거나 대수층인 경우는 MODFLOW 모형에서 함양우물이다. 한편, SWAT 모형의 관개와 MODFLOW 모형의 Well Package와 관련된 부분은 수원형태가 대수층이고, 물의 도착지 형태가 HRU인 경우로 MODFLOW 모형에서 이 우물은 배출우물이다. 수원형태가 대수층, 하도, 저수지이고, 물의 도착지 형태가 유역외인 경우는 원래 SWAT 모형에서 소비수량(consumptive water

* 정회원·한국건설기술연구원 수석연구원·E-mail : nwkim@kict.re.kr

** 정회원·건설교통부 하천정보센터 연구사 E-mail : yswon@moct.go.kr

*** 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원·E-mail : imchung@kict.re.kr

use)으로 처리될 수 있고, 월별 일정량만을 이용하여 물을 유역외로 제거할 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 "water transfer" 명령으로 유역내 물을 유역외로 제거할 수 있는 방법이 추가되었다. 이 추가된 방법을 이용하면 월별 일정량뿐만 아니라, 수원에 남아 있는 물의 양의 일정량, 일정률, 최소만 남기고 모두 제거, 일별, 월별, 년별 등의 옵션을 이용하여 수원내 물을 제거할 수 있다.

수원형태가 유역외이고, 물의 도착지 형태가 저수지인 경우, 원래 SWAT 모형의 점원 또는 유입량을 이용하면 저수지가 위치한 소유역의 하도에 물을 추가할 수 있다. 그러나 저수지의 체적에 유역외에서 유입된 물을 직접 추가할 수 있는 방법은 없었다. 이러한 단점을 보완하고 점원 또는 유입량(point source or inlet discharge) 명령을 사용하지 않고 "water transfer"에서 하도, 저수지, 대수층으로의 물 이동을 직접 고려할 수 있도록 소스코드를 수정하였다. 소비수량과 유역외에서 유역내로의 물 이동은 원래 SWAT 모형의 소비수량(consumptive water use) 점원 또는 유입량(point source or inlet discharge)과 본 연구에서 추가된 "water transfer" 중 사용자가 선택하여 이용할 수 있음을 부연한다. 단, 소비수량 자료가 월별 일정량이 아닌 경우와 점원 또는 유입량이 하도와의 다른 곳에서 물이 도착한다면 본 연구에서 추가된 "water transfer" 명령을 이용해야 한다.

Well Package는 주어진 스트레스 기간 동안 특정율(specified rate)만큼 대수층으로부터 물을 배출(또는 대수층으로 물을 더함)하는 우물과 같은 특징들을 모의하기 위해 설계되었고, 특정율은 셀에서 셀 면적과 수두에 독립적이다. 우물은 모의의 각 스트레스 기간 동안, 대수층으로 물이 더해지는 또는 대수층으로부터 물이 제거되는 개개 우물의 특정율 Q 에 의해 Well Package에서 처리된다. 양의 Q 값이 함양 우물을 나타내는 반면, 음의 Q 값은 배출우물을 나타내기 위해 이용된다. Well Package는 각 스트레스 기간의 시작에서, 각 우물에 대해 우물이 위치한 셀의 행, 열, 층 번호와 스트레스기간 동안 우물의 배출 또는 함양률(Q) 등 4개 값을 읽어 실행된다.

SWAT 모형의 경우, 물 이동은 소유역에 기초하여 이루어진다. 대수층을 함양하거나 대수층에서 배출될 때, 특정 HRU의 얇은 대수층 또는 깊은 대수층에서 함양 및 배출이 이루어지는 것이 아니라 HRU가 위치한 소유역에서 모든 기작이 이루어지며, 하천의 경우 역시 소유역에 한 개의 하도만이 존재하므로 소유역에 기초하고, 저수지는 사용자가 저수지를 지정하게 되면 소유역으로 자동분류되므로 이 역시 소유역에 기초한다. 다만, 관개의 경우 물의 도착지 위치가 HRU라는 것만이 예외일 뿐이다. MODFLOW 모형의 우물은 격자의 좌표인 행과 열 번호 및 우물의 스크린이 설치된 층에서 기작이 이루어진다. 따라서 SWAT 모형에서 대수층의 함양 및 배출과 MODFLOW 모형의 Well Package를 연결하기 위해서는 SWAT 모형의 대수층의 위치에 대한 공간정보와 MODFLOW 모형의 우물에 대한 공간정보의 연결이 이루어져야 한다.

SWAT-MODFLOW 모형에서 SWAT 모형의 대수층과 MODFLOW 모형의 Well Package의 연계는 함양우물의 경우 사용자에게 의해 입력된 대수층으로부터의 물 이동량 파일로부터 모의의 현재 일에 이루어져야 할 물 이동량을 SWAT 모형에서 결정한다. 이 물 이동량은 모의의 전날에 파악되는데, "water transfer" 명령이 나타나면 사용자에게 의해 입력된 대수층으로부터의 물 이동량이 기록된 파일로부터 다음 일에 이동되는 물의 양을 미리 읽어 변수에 저장된다. 이 물 이동량이 MODFLOW 모형의 함양량으로 인식되고, 이 값을 이용하여 MODFLOW 모형이 실행된다. MODFLOW 모형에서 포화 대수층에 대한 모의가 모두 끝난 후, MODFLOW 모형에서 실제로 함양된 양이 SWAT 모형으로 넘어간다. SWAT 모형 실행시 "water transfer" 명령이 현재 일에 다시 실행되면 MODFLOW 모형에서 받은 실제 함양량을 도착지 위치로 물을 이동시키고, 다음날 이동되어야 할 물의 양을 파일로부터 읽는다. 이러한 절차가 모의기간 동안 반복적으로 일어난다.

SWAT-MODFLOW 모형에서 SWAT 모형의 대수층과 MODFLOW 모형의 Well Package의 연계는 함양우물의 경우 사용자에게 의해 입력된 대수층으로부터의 물 이동량 파일로부터 모의의 현재 일에 이루어져야 할 물 이동량을 SWAT 모형에서 결정한다. 예를 들어 그림 1에 나타난

바와 같이 SWAT 모형에서 현재 물이동량이 15 m³/day라면, MODFLOW 모형의 특정셀 값에 -150 m³/day로 입력하여 이 우물에서 물을 배출시키고, 실제 배출량을 SWAT 모형의 물이동량으로 넘겨 water source location에 이 물이동량이 더해진다.

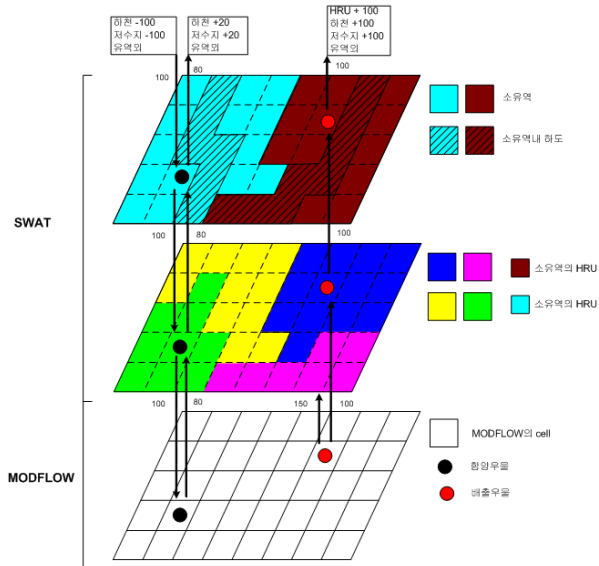


그림 1. SWAT-MODFLOW의 양수에 의한 물이동 개념도

2. SWAT-MODFLOW 양수모듈의 적용

SWAT-MODFLOW의 개선을 통해 추가된 양수모듈 (MODFLOW의 well package와 SWAT의 결합)을 경안천 유역(김남원 등, 2005)에 대해 시험 적용하였다. SWAT-MODFLOW 모형에서 SWAT 모형의 대수층과 MODFLOW 모형의 Well Package의 연계는 함양우물과 배출우물 모두 사용이 가능하며 이 중 얇은 대수층에서의 배출우물에 관한 적용을 수행하였다. 이를 위해서 수정된 transfer.f를 가지고 양수와 관련한 데이터 파일을 생성하고 MODFLOW의 *.wel파일과 대응시켜줘야 한다. 목적지는 하천, 저수지일 수도 유역외일 수도 있는데 양수된 물이 하천으로 이동하는 경우로 국한하였다. 이를 위해서 4번 소유역내 MODFLOW의 셀 하나(col=68, row=43)에 단일 배출정을 위치시키고 100 m³/day, 1000 m³/day의 두 가지 경우에 대해 지하수위 변화와 물수지 변화를 살펴보았다.

그림 2는 양수 시작후 1000일(2001년 9월 26일)이 지난 양수정 영향권내 유역 단면(남-북방향)에서의 지하수위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 100 m³/day의 경우 변화가 미미하나 1000 m³/day인 경우는 그 값이 명확하게 드러나고 있음을 알 수 있다. 지하수위 강하를 세부적으로 살펴보기 위해 같은 영향권내 유역 단면(남-북방향)에서의 지하수위 강하량을 그림 3에 나타냈다.

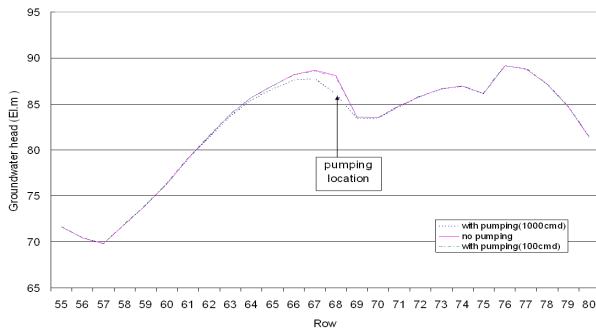


그림 2 남북방향 단면의 양수량 별 지하수위 변화

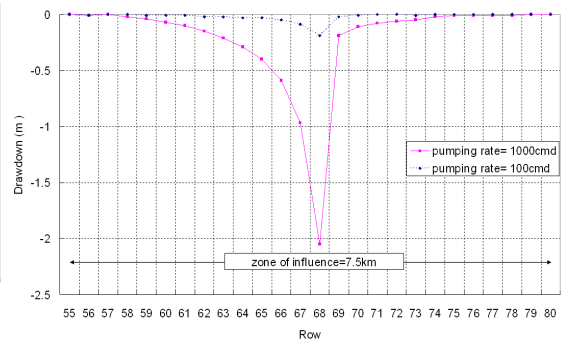


그림 3 남북방향 단면의 양수량 별 수위 강하

100 m³/day의 경우 최대 수위강하는 0.19m정도 었으나 1000 m³/day로 양수할 경우 수위강하량은 현저히 증가하여 2.05m의 수위강하를 나타냈다. 동서방향의 영향권은 약 7.5km에 달하는 것으로 나타났다. 그림 4-그림 5는 양수정의 영향권내 동-서 방향의 유역단면에 대해 도시한 것이다. 그림 6-그림 7은 각각 100 m³/day, 1000 m³/day에 해당하는 지하수위 강하 등고선도를 도시한 것이다. 이와같은 그림에서 보는 것처럼 개선된 양수모들은 유역내 물이동을 효과적으로 묘사하고 있으며 지하수 유출량의 감소분은 하천으로 옮겨져 지표수 증가분으로 계산되고 있음을 그림 8의 물수지 변화를 통해 살펴볼 수 있다.

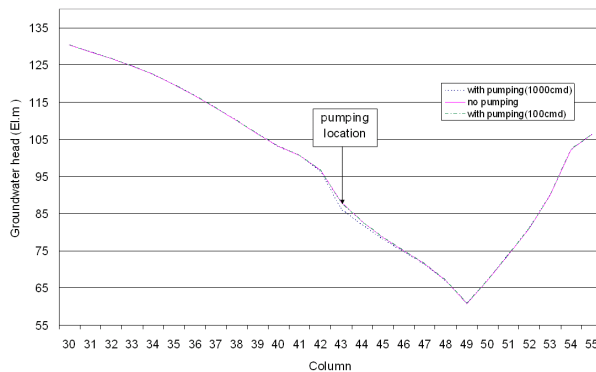


그림 4 동서방향 단면의 양수량별 지하수위변화

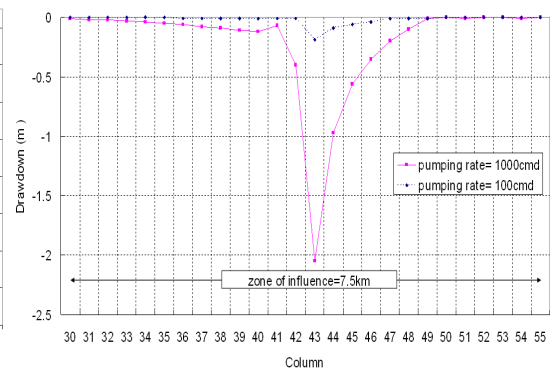


그림 5 동서방향 단면의 양수량별 수위강하

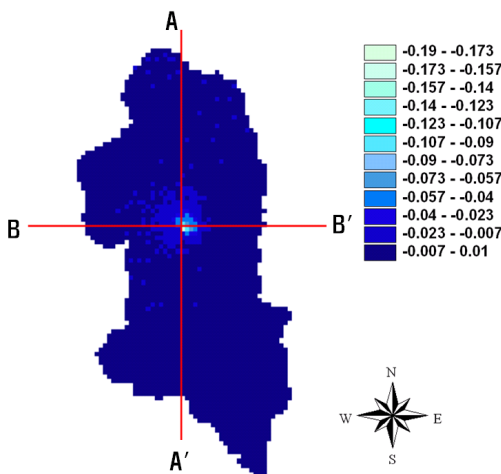


그림 6 양수시 지하수위 강하(Q=100CMD)

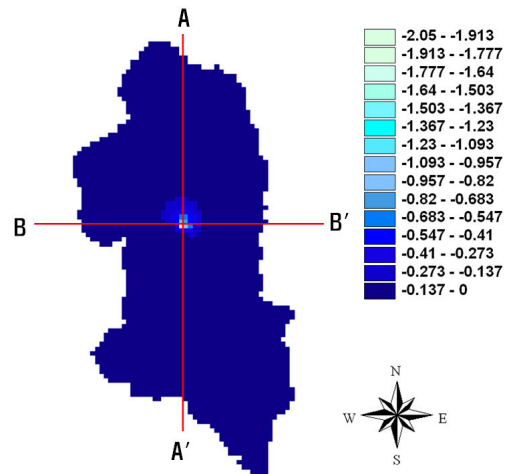


그림 7 양수시 지하수위 강하(Q=1000CMD)

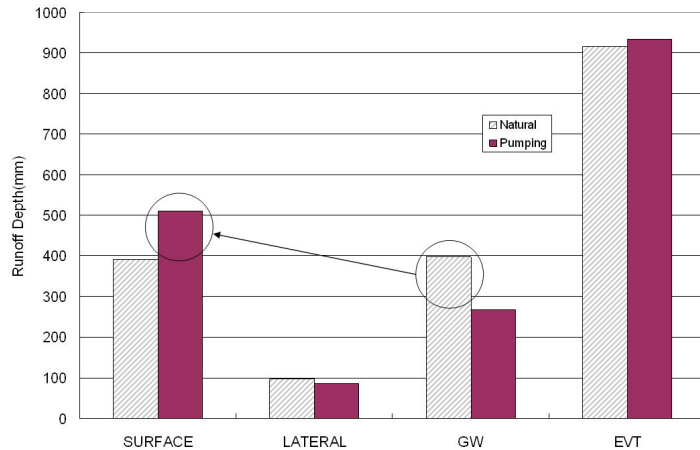


그림 8 양수에 의한 유역내 물수지의 변화

3. 결론

SWAT-MODFLOW의 개선을 통해 추가된 양수모듈 (MODFLOW의 well package와 SWAT의 결합)을 성공적으로 적용하였다. 경안천 유역의 얇은 대수층에서 양수시켜 소유역내 하천으로 이동하는 과정을 살펴본 바 본 연구에서 개발한 양수모듈은 실제 유역에서의 양수에 의한 물이동을 현실적으로 묘사할 수 있음을 알 수 있었으며 이는 지표수와 지하수의 실질적인 결합 모의가 가능해 짐을 보여준다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김남원, 정일문, 원유승(2004a). “완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 - (I) 모형의 개발”, **한국수자원학회 논문집**, Vol. 37, No. 6, pp. 499-507.
2. 김남원, 정일문, 원유승(2004b). “완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 - (II) 모형의 평가”, **한국수자원학회 논문집**, Vol. 37, No. 6, pp. 509-515.
3. 김남원, 원유승, 정일문(2005a). “SWAT-MODFLOW모형의 개선”, **2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**.
4. 김남원, 정일문, 원유승(2005b). “시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정 방안”, **한국수자원학회 논문집**, Vol. 38, No. 7, pp. 517-526.