

SWAT-MODFLOW모형을 이용한 표선 지역 지하수 이용량 분석

Analysis on the groundwater usage in Pyoseon area by using the integrated SWAT-MODFLOW model

김남원¹⁾, 정일문²⁾, 유상연³⁾, 이정우⁴⁾

Nam Won Kim, Il Moon Chung, Sang Yeon Yoo, Jeongwoo Lee

요 지

우리나라의 대표적인 도서지역인 제주도는 일반 내륙지역과 달리 지표수-지하수에 대한 연구가 지하수계에 대한 연구에 비해 미미한 실정이다. 제주도의 경우 내륙과 달리 대부분의 하천이 평상시 건천의 형태로 유지되며, 일정한 강우가 도달해야만 지표유출이 발생하는 경우가 많다. 이와 같은 하천특성은 내륙과 매우 상이하여 일반적으로 사용되는 유역 수문해석 방법으로는 수문성분의 정확한 산정을 기대하기 어렵고 이로 인해 지하수 해석에 있어서도 불확실성이 크게 증가하는 요인이 된다. 따라서 지표수의 정확한 거동과 지하수 해석의 불확실성을 줄이기 위해 유역개념의 물순환을 해석할 수 있는 지표수-지하수 연계 해석기술이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 ‘삼다수 먹는샘물 환경영향조사’가 수행되어 비교적 정확한 지하수위 관측 자료가 확보되어 있고, 매우 제한적이기는 하나 하천의 유출량 조사가 수행된 바 있는 제주 표선 유역에 완전연동형 지표수-지하수 해석 프로그램인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 지표수 유출성분과 지하수 유동변화를 동시에 고려한 분석을 수행하였다. 특히 MODFLOW의 Well 패키지와 SWAT의 물이동 옵션을 결합하여 표선유역의 198개 관측공의 양수를 동시에 모의하였다. 모의결과 지하수위는 비교적 양수에 비해 안정되게 유지되는 것을 알 수 있었고 이를 통해 현재 삼다수 공장의 양수량은 현재로서는 과다양수가 아닌 것으로 판단되었다. 현재의 양수량의 10배를 가정하여 모의를 한 결과, 지하수위는 함양에 의해 다시 회복되는 결과를 보이고 있어 이 지역의 실제 개발가능량에 대한 보다 심도있는 논의가 필요한 것으로 판단되었다. 나아가 이와 같은 분석을 통해 제주 지역의 전체의 지하수 개발가능량을 산정할 경우 제주지역의 지하수 관리방안이 새롭게 제시될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 지하수 이용, 표선유역, SWAT-MODFLOW

1. 서 론

우리나라의 대표적인 도서지역인 제주도는 일반 내륙지역과 달리 지표수-지하수에 대한 연구가 지하수계에 대한 연구에 비해 미미한 실정이다. 제주도의 경우 내륙과 달리 대부분의 하천이 평상시 건천의 형태로 유지되며, 일정한 강우가 도달해야만 지표유출이 발생하는 경우가 많다. 이와 같은 하천특성은 내륙과 매우 상이하여 일반적으로 사용되는 유역 수문해석 방법으로는 수문성분의 정확한 산정을 기대하기 어렵고 이로 인해 지하수 해석에 있어서도 불확실성이 크게 증가하는 요인이 된다. 따라서 지표수의 정확한 거동과 지하수 해석의 불확실성을 줄이기 위해 유역개념의 물순환을 해석할 수 있는 지표수-지하수 연계 해석기술이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 제주 표선유역에 대한 지표수-지하수 연계해석을 수행하였으며 이를 위해 완전연동형 유역단위

1) 정회원 · 한국건설기술연구원 수문연구실 · E-mail : nwkim@kict.re.kr
2) 정회원 · 한국건설기술연구원 수문연구실 · E-mail : imchung@kict.re.kr
3) 정회원 · 한국건설기술연구원 수문연구실 · E-mail : syyoo77@kict.re.kr
4) 정회원 · 한국건설기술연구원 수문연구실 · E-mail : ljw2961@kict.re.kr

지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW(Kim et al., 2008)를 적용하였다. SWAT-K 모형은 미국 농무성에서 개발된 준분포형 장기유출 및 수질해석 모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 우리나라 특성에 맞게 개선한 것으로, 농업과학기술원에서 조사한 국내 토양통 DB가 탑재되고, 지하수 해석을 보완하기 위한 MODFLOW모형과의 결합이 이루어져, 토지이용과 토양특성, 기상 특성 등을 반영하여 강수로 부터 지표유출량, 측방유출, 지하수 유출성분을 계산하고, 토양수분, 지하수 함양, 증발산 등의 성분을 산정할 수 있다(그림 3.2.1). 장래의 수자원 부족을 극복하기 위한 대안으로 지표수와 지하수의 연계운영방안을 모색하는 시점에서 지표수와 지하수의 물순환을 유역단위에서 파악할 수 있는 해석 시스템의 도입은 매우 시기 적절하며 본 연구를 통해 다각적인 지표수-지하수의 연계운영 시나리오가 제시될 수 있을 것이다.

2. 대상 유역 현황

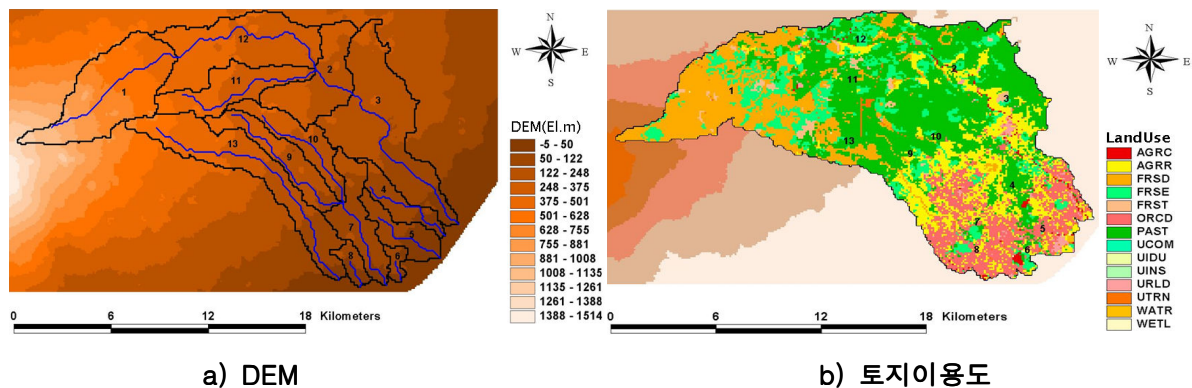
대상 유역은 지방 2급 하천인 천미천, 송천, 가시천, 진평천, 안좌천을 포함하는 표선유역으로 이 지역은 삼다수 먹는샘물 환경영향조사가 수행되어 비교적 정확한 지하수위 관측 자료가 확보되어 있고, 매우 제한적이기는 하나 하천의 유출량 조사가 수행된 바 있다. 표선유역의 총 유역면적 216.11km²이고 천미천의 하천연장은 25.0km, 송천은 15.0km, 가시천은 14.0km, 진평천은 8km, 안좌천은 10.0km이다.

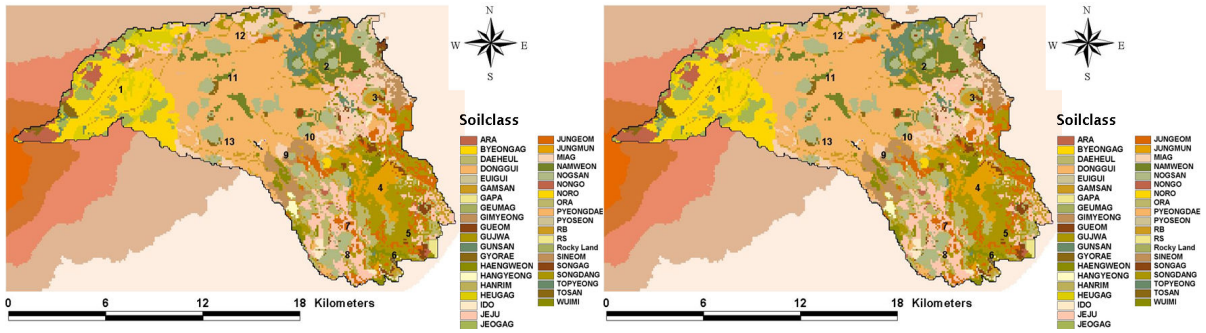
(그림 첨부)-상연

그림 1 연구대상지역

현장 조사에 따르면, 유역내에서 80~100mm를 기록해도 선행강우가 없을 경우에는 유출이 일어나지 않았으며, 1일 100mm 이상의 강우가 나타날 경우에만 유출이 발생하는 것으로 나타났다(제주도지방개발공사, 2005). (그림 내용, 기상 및 지형 내용 추가예정)-상연

SWAT-K모형을 구동하기 위해서는 수치표고모형(DEM)외에 토지이용도, 토양도 정보가 입력되며 토지이용 정보와 토양정보가 결합되어 수문응답단위(Hydrologic Response Unit: HRU)가 생성되고 이 HRU를 기본단위로 하여 토양통을 기준으로 물수지를 계산하며, 또한 HRU는 MODFLOW모형의 셀과 연결되는 중요한 역할을 한다(그림 2).





c) 토양도

d) HRU 분포도(교체)-상연

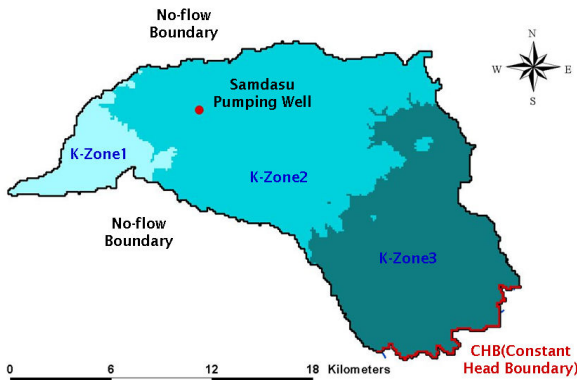
그림 2 대상구역의 공간정보 자료

3. 연구 방법

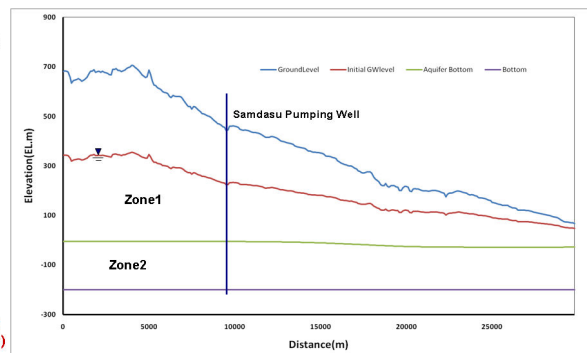
본 연구에서는 제주도 표선 유역에 국내에선 처음으로 지표수-지하수 완전연동형 모델인 SWAT-MODFLOW를 적용하여 지표수-지하수 연계해석을 하였다. SWAT-MODFLOW는 SWAT에서 HRU별로 발생하는 지하수 함양량을 MODFLOW의 입력자료로 이용하여 지하수 흐름을 산정하고 지하수 유출입량을 다시 SWAT으로 교환하여 해석한다. 또한 SWAT에서 계산되는 지하수 유출입량의 경우 하도에 유수가 발생하거나 대수층의 깊이가 특정값 이하일때는 하도에서 지하로 유입되는 양을 산정하지 못하였는데 이를 MODFLOW의 river package를 이용함으로써 지표수와 지하수간에 상호 기여된 양을 산정할 수 있게 하였다(Kim et al, 2008).

MODFLOW의 입력을 위한 대상지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 1개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면대수층, 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 설정하였다. 모델 영역은 가로 29,900m, 세로 16,700m로 면적 499.33km²이고, 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려한 216.11km², 모델 격자는 167행, 299열, 2층으로 구성되며 수평방향 격자 한 개의 크기는 100m×100m이다.

경계 조건의 경우 유역 외부는 No-flow Boundary로 설정하고 하류부의 해안과 맞닿은 지역은 CHB(Constant Head Boundary)로 설정하여 그 수위를 해수면 수위와 일치시켰다(그림 3a). 또한 각 지층의 수리 특성인자들의 경우 제주 삼다수 지하수 정밀조사 보고서(제주특별자치도개발공사, 2007)의 자료를 이용하였다. 또한 저류계수 및 River Package에 사용되는 전도계수 C값의 경우 실측 지하수위와 모의 지하수위간 보정과정을 통해 모델링에 적합한 값을 산정하였다. 그림 3b)는 주 관측정인 삼다수 감시 1호정이 위치한 지역의 수직 단면도를 나타낸 것이다.



a) 경계조건 및 투수계수



b) 삼다수 관측정의 수직 단면도

그림 3 대상구역의 지하수 모델링 입력자료

4. 분석 결과

지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 표선유역에 적용하여 제한적이거나 관측치가 존재하는 2006년의 지표수 유출사상에 대한 비교를 하였다(그림 4). SWAT모형을 이용할 경우 모형의 내재적인 특성상 함양된 지하수 성분은 기저유출을 통해 하천유출에 기여하는 결과를 나타내고 있다. 따라서 제주지역과 같이 하천유출에 기저유출성분이 기여하지 못하고 심부 지하수위로 공급되어 바다와 인접한 곳에서 집중적으로 배출되는 유출특성의 재현에는 근본적인 한계가 있다. 그러나 SWAT-MODFLOW의 경우는 유출이 강우시와 비강우시에 펄스형태로 진행되는 간헐천의 성격을 잘 표현하고 있으며, 지하수 유출 감소로 인해 하천 유출량은 SWAT결과에 비해 줄어들며 이 양은 함양성분에 포함되어 바다로 유출될 것임을 잘 보여준다.

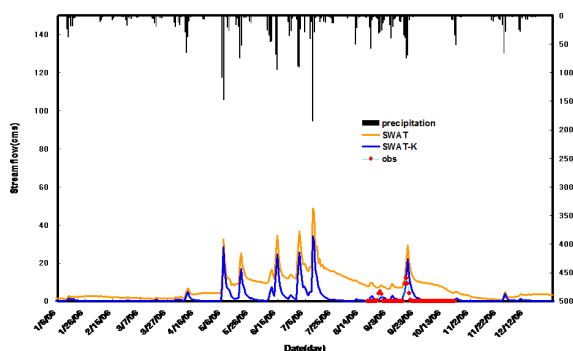


그림 4 유출량 비교(2006)

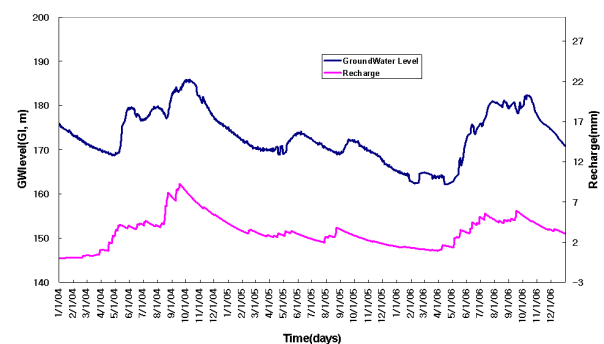
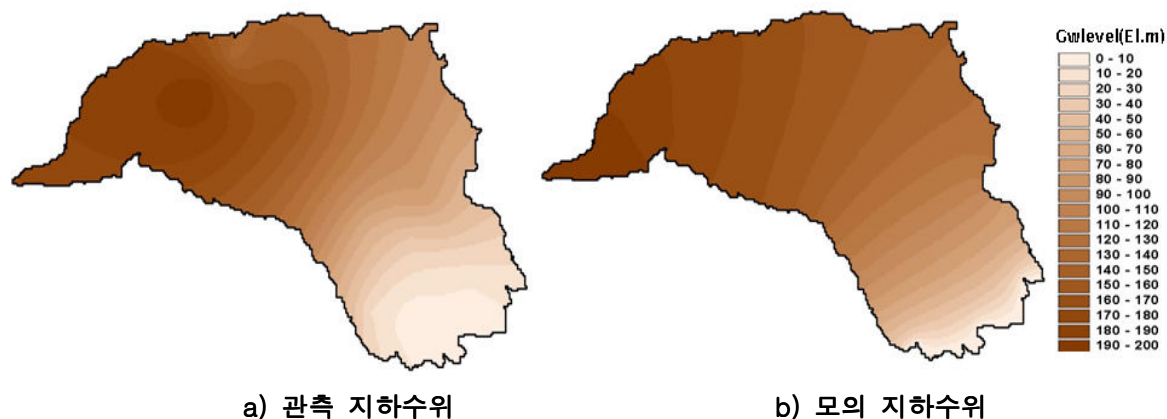


그림 5 지하수위와 함양량 시계열 비교

지표에서 지하로의 함양과 지하수위의 상관관계를 모의하기 위해 삼다수 수위관측점에서 측정된 2004년~2007년의 실측 지하수위와 함양량간의 상관관계를 살펴 보았다. 그림 5에서 보는 바와 같이 지하수위와 함양량의 거동이 거의 비슷한 양상을 보이는 것으로 나타났고 상관계수(Correlation) $R=0.87$ 로 비교적 양호하게 나타났다.

또한 표선유역에서 이용하는 지하수량을 이용하여 SWAT-MODFLOW에 양수 module을 설치하여 지하수 이용량을 모의하였다. 제주도 지역의 경우 다른 지역과 달리 지하수 이용량이 매우 크므로(전체 수자원 이용량의 45%) 모델링에서도 양수관정을 설치하여 실제 지하수 유동과 비슷한 양상을 보이도록 하였다. 모델링에 사용된 양수관정은 표선유역에 위치한 198개 양수관정을 이용하여 표선유역의 실측 지하수위와 모의 지하수위의 경향을 비교하였다.



a) 관측 지하수위

b) 모의 지하수위

그림 6 표선유역 지하수위 비교

삼다수 관측정에서의 실측 지하수위와 모의 지하수위 시계열을 비교하였다(그림 7). 본 연구에서는 2004년~2007년까지 4년의 모의기간을 두고 모델링을 실시하였는데 제주도의 경우 지표면 아래로 평균 200m(상류의 경우)지점에 지하수위가 형성되고 있어 모델링에서 지하수위가 안정되는데 꽤 오랜 기간이 필요하였다. 따라서 비교적 지하수위가 안정된 2006년 6월 이후부터 2007년 12월까지의 지하수위를 비교하였다. (그림7-8 비교내용 추가)-정박사님

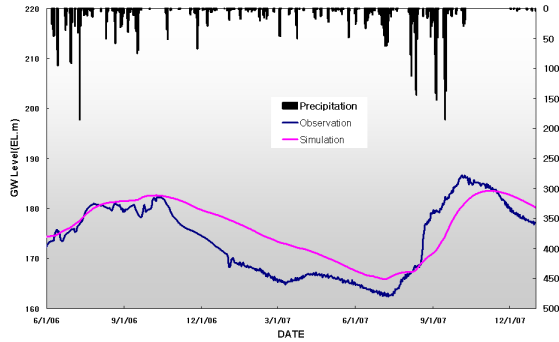


그림 7 지하수위 비교

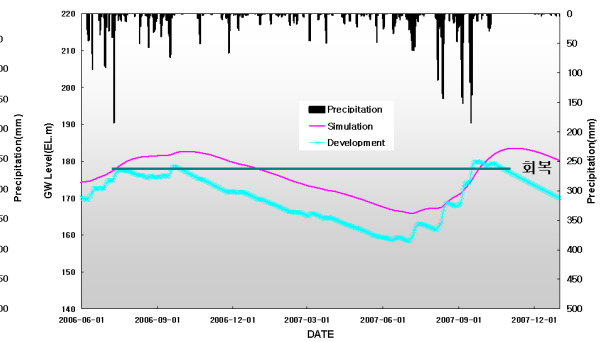


그림 8 양수량 10배 증가시 지하수위 변화

5. 결론

(내용 추가)-정박사님

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 제주도 지방개발공사 (2005). 제주 삼다수 먹는샘물 환경영향조사서
2. 제주특별자치도 개발공사, 한국농촌공사 (2007). 제주 삼다수 지하수 정밀조사 보고서.
3. Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.