

# 제주 표선유역의 지하수 개발을 고려한 수문성분해석 Analysis on the Hydrologic Components Considering Groundwater Development of the Pyoseon Watershed in Jeju Island

김남원\* 정일문\*\* 나한나\*\*\* 유상연\*\*\*\* 양성기\*\*\*\*\*

Nam Won Kim, Il Moon Chung, Han Na Na, Sang Yeon Yoo, Sung Kee Yang

## 요 지

우리나라 대표적인 도서지역인 제주도는 대부분의 하천이 평상시 건천의 형태로 유지되며, 일정한 강우가 도달해야만 지표유출이 발생하는 경우가 대부분이다. 이와 같은 하천특성은 내륙과 매우 상이하여 일반적으로 사용되는 유역 수문해석 방법으로는 정확한 수문성분의 산정을 기대하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 완전연동형 지표수-지하수 결합모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 지표수 유출성분과 지하수 유동변화 및 지하수 개발까지 고려한 제주 표선유역의 통합수문성분 해석을 수행하였다. 특히 SWAT-MODFLOW에 포함된 양수모듈(MODFLOW의 well package 와 SWAT의 물이동 옵션 결합)을 이용하여 198개의 현 양수정 자료를 모의하였고, 현재 양수량, 현재양수량의 10배, 20배로 증대시켜 가며 수문성분 변화를 살펴보았다. 양수를 통해 지하수를 개발하여 사용하면 실질적으로 기저유출량의 감소가 발생하는 것으로 나타났고, 이러한 영향은 상류부 보다는 하류부에서 크게 작용할 것으로 판단된다. 그러나 제주도 지형적인 특성상 자연적으로 대수층으로 함양된 지하수가 대부분 바다로 유출, 손실되고 있으나 지하수를 양수할 경우, 손실량의 일부는 지하수 개발을 통해 효과적으로 사용됨으로써 제주 수자원의 추가 수자원확보량으로서 활용될 수 있을 것이다.

**핵심용어 : 지하수 개발, SWAT-MODFLOW, 양수, 기저유출량**

## 1. 서론

제주도의 경우 대부분의 하천은 평상시 건천의 형태로 유지되며, 일정한 강우가 도달해야만 지표면 유출이 발생하는 경우가 많다. 이와 같은 하천특성은 내륙과 매우 상이하여 일반적으로 사용되는 유역 수문해석 방법으로는 정확한 수문성분의 산정을 기대하기 어렵다. 제주도와 한국수자원공사(2003)에서는 제주지역의 수자원평가를 위해 제주도수문지질 및 지하수자원 종합조사를 실시한 바 있으며, 이에 의하면 제주지역의 유출률은 강수대비 21%로 내륙에 비해 매우 낮은 특성을 보이며 지하수 함양량은 강수대비 54%로서 역시 내륙과는 상이하게 높은 지하수 함양률을 나타내고 있다. 이와 같이 일반적으로 알려진 제주도 지하수 함양량의 추정에 있어서 지표수-지하수 통합모형을 적용하여 지표수 유출성분과 지하수 유동변화를 동시에 고려한 보다 신뢰성 있는 함양량 추정이 기대된다. 또한 제주 표선유역에 대해 SWAT-MODFLOW(김남원 등, 2004a, 2004b; Kim et al., 2008)를 적용하여 유역내 지하수 개발자료를 입력한 후 양수량을 변화시켜가며 지하수의 적정 개발이 수자원확보와 어떤 관계가 있는지를 평가하였다.

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부 수자원연구실 연구위원 · E-mail : nwkim@kict.re.kr

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부 수자원연구실 연구위원 · E-mail : imchung@kict.re.kr

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부 수자원연구실 연구원 · E-mail : hydromama@kict.re.kr

\*\*\*\* 정회원 · (주)삼안 수자원부 · E-mail : regiri77@hanmail.net

\*\*\*\*\* 정회원 · 제주대학교 · 토목공학과 · 교수 · E-mail : skyang@cju.ac.kr

## 2. 연구방법

본 연구에서는 완전연동형 지표수-지하수 결합모형인 SWAT-MODFLOW를 이용한 제주 표선유역의 수문성분해석을 수행하고자 한다. 대상 유역은 표선유역 내에 위치한 천미천 유역(면적: 207.3 km<sup>2</sup>)으로 13개의 소유역으로 나누어 해석을 수행하였다. 이 지역은 삼다수 먹는샘물 환경영향조사가 수행되어 비교적 정확한 지하수위 관측 자료가 확보되어 있고, 매우 제한적이기는 하나 하천의 유출량 조사가 수행된 바 있다(한국농촌공사/제주특별자치도개발공사, 2007). 선행강우가 있을시에만 유출이 발생하는 이 유역 유출량의 수문성분은 대부분 지표면 유출(surface runoff)로 추정되는데 이는 제주지역의 경우 함양률이 매우 높고, 중간유출 성분은 상대적으로 적고, 지하수 유출은 해안 근처에서 집중되어 바다로 흘러가는 형태를 나타낼 것으로 판단되기 때문이다. 따라서 일반적인 유출모형에서 계산되는 기저유출 성분이 제주 유역에서는 하천 유출에 기여하지 못할 것으로 예측되며, 이 경우 지표수-지하수 통합 해석이 매우 의미가 있을 것이다(한국건설기술연구원, 2006). 또한 이 지역의 유출은 대부분 바다로 유출되므로 지하수 개발로 인해 바다로의 유출이 줄어들게 되며 이에 해당하는 양만큼의 담수자원이 확보된다고 볼 수 있다. SWAT-K 모형을 구동하기 위해서는 수치표고모형(DEM)외에 토지이용도, 토양도 정보가 입력되며(그림 1)

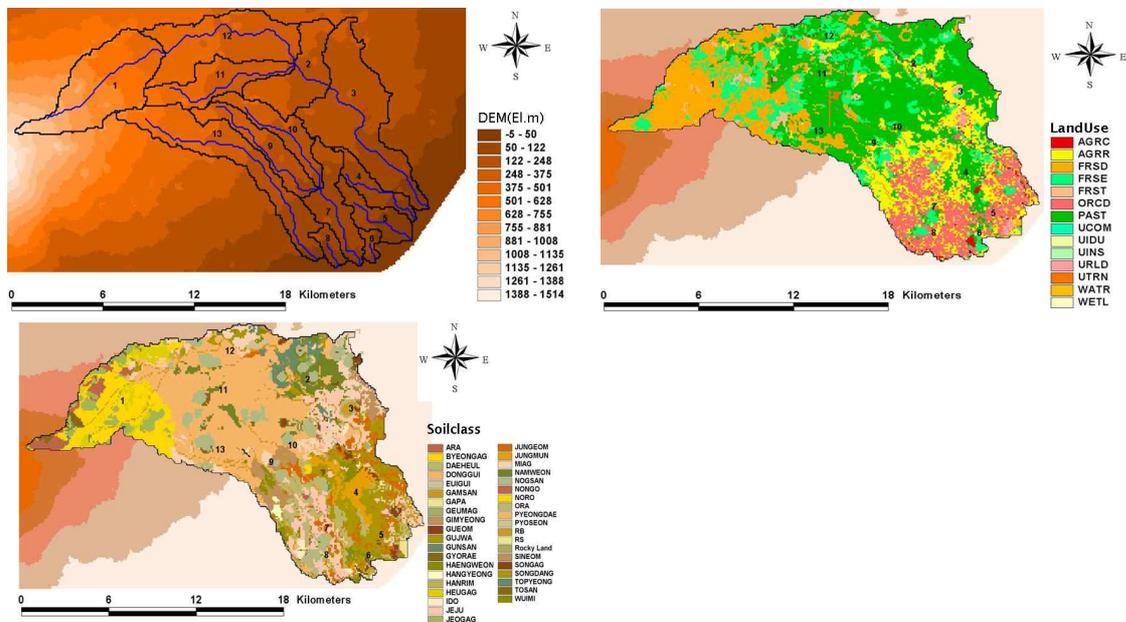


그림 1. 표선유역의 DEM, 토지이용도, 정밀토양도

본 연구에서는 제주도 표선 유역에 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 적용하여 연계해석을 하였다. MODFLOW의 입력을 위한 대상유역의 수리지질은 효율적인 모델링을 위해 1개의 층적층 및 1개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 모델영역은 가로 29,900 m, 세로 16,700 m로 면적 499.33 km<sup>2</sup>이고, 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려한 216.11 km<sup>2</sup>, 모델 격자는 167행, 299열, 2층으로 구성되며 수평방향 격자 한 개의 크기는 100 m×100 m이다. 수평격자의 크기는 지표수 해석과 동일하게 적용되어야 하는데 지표수 유출해석을 위한 DEM 및 토지이용도, 토양도를 구성함에 있어서 100m격자를 사용하였기에 지하수 역시 이와 동일하게 적용되었다. 이와 같이 설정된 모델을 통하여 이 지역의 지하수 개발가능량 및 수자원 확보량을 알아보기

위하여 실제 표선유역에서 사용하고 있는 지하수량을 이용하여 지하수 이용량을 모의하였다. 제주도는 용천수와 지하수에서 대부분의 수자원을 조달하고 있기 때문에 지하수 이용량이 매우 크므로(전체 수자원 이용량의 45%) 모델링에서도 양수정의 이용량을 198개의 양수정에 각각 입력하여 실제 지하수 유동과 비슷한 양상을 보이도록 하였다(그림 2).

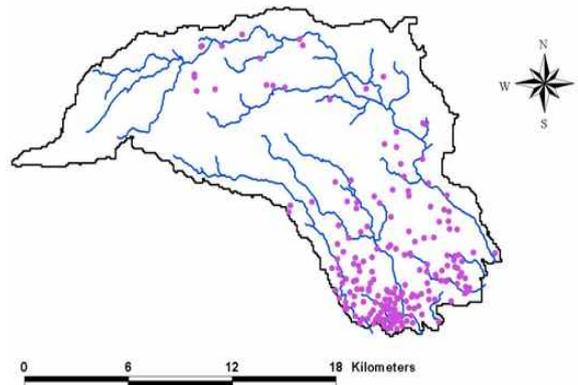


그림 2. 표선유역 실제 양수정 분포

표선 유역은 강수의 대부분이 지하수대로 함양되어 유역 출구점이 바다로 유출이 진행되며 중간에 대규모 양수가 진행되고 있다. 이를 개념도로 나타내면 그림3과 같다. 그림3에서 보는 바와 자연적으로는 대수층으로 함양된 지하수가 대부분 바다로 유출, 손실되고 있다. 따라서 양수를 통해 지하수를 개발하여 사용하면 실질적으로 바다로 손실되는 수자원을 확보하는 셈이 된다(한국 건설기술연구원, 2009).

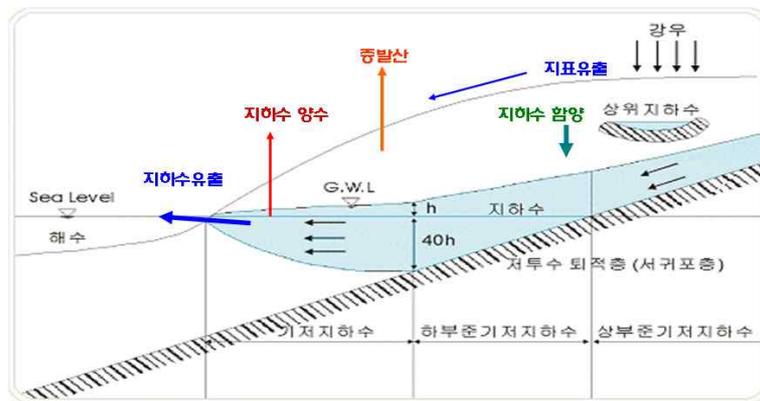


그림 3. 제주지역의 통합 유출 해석 및 개발량의 개념도

먼저 지하수 양수량을 현재 양수량 대비 10, 20배로 증가시켰을때의 유황곡선을 살펴본 바, 그림 4에서 보는 바와 같이 양수량이 증가함에 따라 유출량은 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 상류부 보다는 바다와 인접한 하류부에서 크게 작용할 것으로 판단되는데 그 이유는 상류부는 대수층과 하천의 깊이 차이가 커서 양수의 영향에 대해 하천유출이 크게 영향을 받지 않을 것으로 판단되기 때문이다. 이와 같은 사실은 소유역별 물수지 결과에서 확인이 가능한데 상류유역에 위치한 13번 소유역은 지하수 유출량은 상대적으로 미미하므로 지하수 개발량이 증대해도 지하수 유출량의 변화는 적은 반면 하류 유역에 위치한 3번 소유역의 경우 양수량 증대에 따른 지

하수 유출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

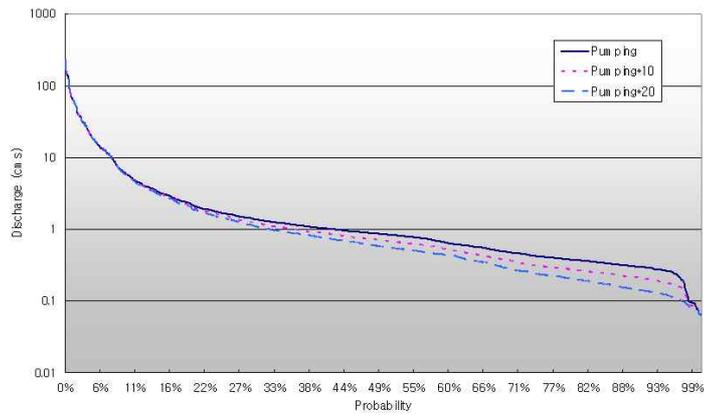
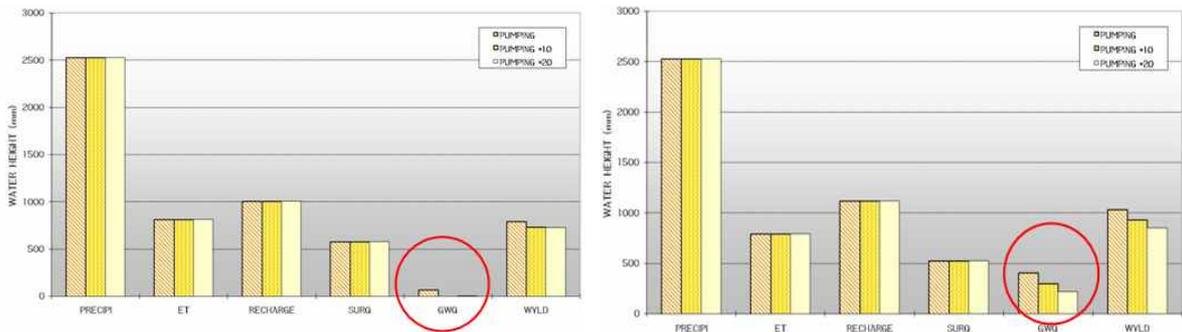


그림 4. 지하수 개발에 따른 유황곡선의 변화



13년 소유역

3년 소유역

그림 5. 상, 하류 소유역별 물수지 비교

그림 6은 바다로 유출되는 양을 시계열로 나타낸 것이다. 이와 같은 결과를 통해 유추할 수 있는 것은 현재양수량 대비 10배, 20배 양수시 해안으로 유출되어 소모되는 양을 그만큼 줄일 수 있다는 사실이며, 이때 추가로 확보가능한 수자원량은 연간 약 0.6억 $m^3$  /1.0억 $m^3$ 의 달할 것으로 추정된다.

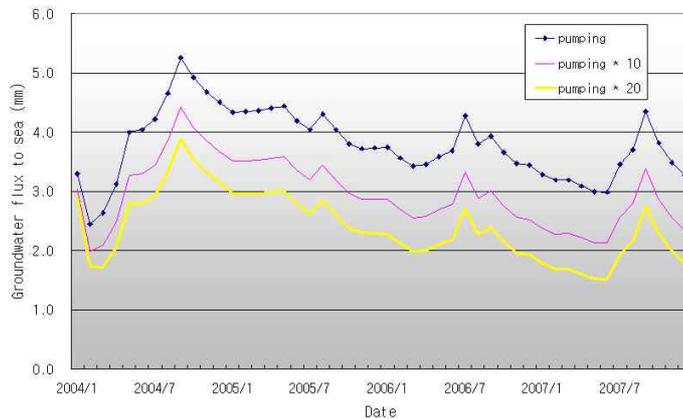


그림 6. 바다로 유출되는 양의 변화

### 3. 연구결과

완전 연동형 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 수문해석이 난해한 제주 표선지역에 대해 실제지표수 유출현상과 지하수 유동을 동시에 성공적으로 모의할 수 있었다. 또한 실제 양수자료를 구축하여 현재 양수량 대비 10, 20배까지로 증대시켰을 경우 하천으로의 유출이 감소하는 것으로 나타났으며 그로인해 그만큼의 양이 수자원으로 확보되는 것으로 판단되었다. 따라서 향후 제주도 전 지역으로의 수문해석을 수행하여 제주지역 수자원 관리에 있어 보다 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

### 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 평가, 한국수자원학회논문집, 2004. 6.
- 제주특별자치도개발공사, 한국수자원공사 (2003). 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III).
- 제주특별자치도개발공사, 한국농촌공사 (2007). 제주 삼다수 지하수 정밀조사 보고서.
- 한국건설기술연구원, 2006, 지표수 수문성분 해석 시스템 개발 -2단계 2차년도 연구보고서, 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업(2-2-2).
- 한국건설기술연구원, 2009, 지표수 수문성분 해석 시스템 개발 -3단계 3차년도 연구보고서, 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업(2-2-3).
- 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.