

제주 지역 지표수-지하수 연계 해석

김남원 · 정일문 · 유상연* · 이정우 · 양성기**

한국건설기술연구원 수자원연구실, *(주)삼안 수자원부, **제주대학교 토목공학과
(2009년 7월 6일 접수; 2009년 8월 13일 수정; 2009년 9월 21일 채택)

Integrated Surface-groundwater Analysis in Jeju Island

Nam-Won Kim, Il-Moon Chung, Sangyeon Yoo*,
Jeongwoo Lee and Sung-kee Yang**

Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do 411-712, Korea
Saman Corporation, Gyeonggi-do 427-040, Korea

**Department of Civil Engineering, Jeju University, Jeju 690-756, Korea

(Manuscript received 6 July, 2009; revised 13 August, 2009; accepted 21 September, 2009)

Abstract

In Jeju island, the surface runoff characteristics are quite different from those of inland. Most of streams show dried characteristics by means of large portion of recharge which goes to the deep aquifer. For this reason, the accurate estimation of hydrologic components by using watershed model like SWAT is very difficult. On the other hand, the integrated SWAT-MODFLOW model is able to simulate the complex runoff structure including stream-aquifer interaction, spatial-temporal groundwater recharge and so on. The comprehensive results of Pyoseon region in Jeju island show that the amount of groundwater discharge to stream is very small, but it might be added to the discharge into the sea. Statistical analysis shows that SWAT-MODFLOW's results represent better than SWAT's. Also, SWAT-MODFLOW produces a reasonable water budget which shows a quite similar pattern of observed one. This result proves that the integrated SWAT-MODFLOW can be used as a proper tool for hydrologic analysis of entire Jeju island.

Key Words : Integrated surface-groundwater analysis, Jeju, Pyoseon, SWAT-MODFLOW

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 산정

을 기대하기 어렵다. 고 등¹⁾은 제주 동부지역의 수문지질과 관련하여 심부관측 및 개발공에 대한 시추코아 지질검층, EC 및 수온검층, 지하수위 관측, 수질조사 자료를 근거로 제주 동부 해발 200 m 이하 지역은 투수성이 매우 좋아 담수 지하수의 확산과 해수 유입이 잘 일어날 수 있다고 추정하였다. 문²⁾은 제주도의 주요 하천에 대해 지하수의 기저유출 현상을 수문학적 관점에서 정량화하기 위해 4대 하천을 대상으로 수위관측 및 기저유출 성분에 대한 유속측정 자료를 기초로 기저유출특성을 파악하였다. 제주도와 한국수자원공사³⁾에서는 제주 지역

Corresponding Author: Il Moon Chung, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do 411-712, Korea
Phone: +82-31-910-0334
E-mail: imchung@kict.re.kr

의 수자원평가를 위해 제주도수문지질 및 지하수자원 종합조사를 실시한 바 있으며, 이에 의하면 제주 지역의 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 제주 지역 수자원은 강수로부터 하천으로 유출되기 보다는 지하공극을 통해 대수층으로 유입되는 양이 커서 전체 수자원 관리에 있어서 지하수의 중요성이 매우 크다.

한편, 제주도 지하수 함양량의 추정에 있어서 지표수-지하수 통합모형을 적용할 경우 지표수 유출 성분과 지하수 유동변화를 동시에 고려한 보다 신뢰성 있는 함양량 추정이 기대된다.

본 연구에서는 완전연동형 지표수-지하수 결합모형인 SWAT-MODFLOW^{4~6)}를 이용한 제주 표선유역의 수문해석을 수행하고자 한다. 대상 유역은 표선유역내에 위치한 천미천 유역으로 3개의 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 있다⁷⁾. 현장 조사에 따르면, 유역내에서 80~100 mm를 기록해도 선행강우가 없을 경우에는 유출이 일어나지 않았으며, 1일 100 mm 이상의 강우가 나타날 경우에만 유출이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 1). 이와 같은 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.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 SWAT-MODFLOW 결합모형을 이용한 연계모델링을 수행하였으며 모형에 관한 내용은 다음과 같다. SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형⁸⁾은 미국 농무성에서 개발된 유역수문모형으로 다양한 토양, 토지이용 등의 상태를 반영한



(a) upstream



(b) midstream



(c) downstream

Fig. 1. Dried condition in Cheonmicheon stream(2008. 7. 21).

물순환, 토사 및 화학물질 이동 해석이 가능한 장기 유출모형이다. 이 모형에서는 유역을 여러 개의 소유역으로 분할하고, 또 다시 소유역을 동일한 수문 응답특성을 가지며 토지이용도와 토양도를 중첩시켜 만들어진 다수의 HRU (Hydrologic Response Unit)로 분할하여, 개개의 HRU에 대해 지표면, 지표

하, 지하수 등 각각의 수문성분을 산정하게 된다. SWAT에서는 식물의 뿌리깊이까지의 영역인 토양수대, 비포화대, 포화대로 구분하여 다음 식 (1)과 같이 토양수를 기준으로 표현된 물수지 식을 기본 개념으로 사용하고 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서 SW_t 는 시간 t 일의 토양수분량, SW_0 는 초기토양수분량, R_{day} 는 일강수량을 나타내고 있으며, Q_{surf} 는 지표면 유출량, E_a 는 증발산량, w_{seep} 는 토양층의 특성을 반영한 침투량, Q_{gw} 는 하천으로의 회귀수이다. 식 (1)의 각 항별 단위는 모두 mm이다.

지표면 유출량을 산정하기 위해서 SCS-CN, Green-Ampt 방법이 사용되고 있으며, 증발산량은 Penman-Monteith 식 등의 다양한 경험공식이 사용된다. 침투량은 저류추적식, 중간유출량은 운동학적 저류모델, 하도추적은 변동저류법, Muskingum 추적법 등이 사용되고 있다. 침투량과 함양량의 관계는 지수형 가중함수로 표현하고 있으며, 지하수 유출량은 HRU별 알은 대수층을 제어체적으로 하여 저류방정식의 해석해로부터 얻어진 지하수유출량과 함양량간의 관계식을 이용한다. 그러나, SWAT의 지하수 해석모델은 HRU간에 상호간 연결성이 없어 지하수의 수평흐름에 의한 동적인 거동을 반영할 수 없어 양수에 의한 지하수리시스템의 변화 등을 모의하는데 어려움이 있는 단점이 있다⁹⁾. MODFLOW¹⁰⁾는 전세계적으로 널리 사용되는 3차원 지하수유동모델로서, SWAT의 지하수 모듈을 MODFLOW로 교체한 것이 SWAT-MODFLOW모형이다. Fig. 2는 모형의 수문순환 개념도를 나타낸 것이다.

통합모형은 MODFLOW가 SWAT내에서 호출되는 형식으로 결합되었으며, 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT으로부터 추출하여 MODFLOW에 자동적으로 입력시켜 지하수 흐름을 모의하고, 하천과 대수층간의 수위차에 비례하는 순 유출입량으로부터 지하수유출량을 계산하여 다시 SWAT으로 전달함으로써 두 모형간의 연계가 매시간단계별로 이루어지게 된다. 또한 대수층내 우물의 함양과 배출, 지하수의 증발산으로 인한 손실 등도 상호 연동되도록 결합하였다. SWAT으로부터 HRU별로 계산된 함양량을 MODFLOW의 셀값에 분배시키기 위해서

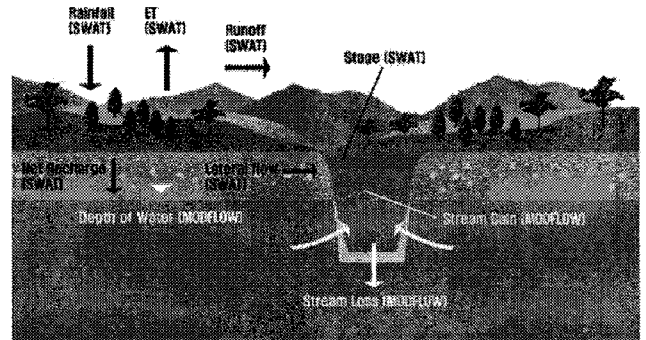


Fig. 2. Diagram for interaction of water hydrological components in SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2008).

HRU-GRID 변환 틀을 만들어 활용하였다. MODFLOW의 RIVER PACKAGE를 이용하여 하천셀별로 하천-대수층간의 순 유출입량을 계산후 합산하여 SWAT의 하도로 유입되도록 구성하였다. 양수모의는 MODFLOW의 WELL PACKAGE를 이용하였는데, MODFLOW의 함양 또는 배출량을 SWAT에서 받고, SWAT의 Water Transfer라는 물 이동 명령에 의해 하천, 다른 HRU, 다른 소유역, 유역의 등의 원하는 목적지로 전이되도록 구성되었다⁶⁾. SWAT-MODFLOW의 계산 순서도는 Fig. 3과 같다.

3. 표선 유역의 지형, 지질 및 수문 특성

본 연구에서는 SWAT-MODFLOW모형을 적용하기 위한 대상유역으로 표선유역을 선정하였다. 표선유역의 면적은 207.3 km²이며 13개의 소유역으로 구분하여 분석을 수행하였다.

SWAT-K모형을 구동하기 위해서는 수치표고모형(DEM)외에 토지이용도, 토양도 정보가 입력되며 (Fig. 4) 토지이용 정보와 토양정보가 결합되어 수문 응답단위(Hydrologic Response Unit: HRU)가 생성되고 이 HRU를 기본단위로 하여 토양통을 기준으로 물수지를 계산하며, 또한 HRU는 MODFLOW 모형의 셀과 연결되는 중요한 역할을 한다. 제주도 표선유역의 지하수 유동현황을 살펴보면 제주의 일반적인 특성과 마찬가지로 지하수는 바다쪽으로 유출되는 방사형 등수위선을 형성하고 있다. 지형고도별 면적분포현황⁷⁾을 Table 1에 나타냈다.

표선 유역에는 주로 조면현무암류, 현무암류, 분석구가 분포하고 있다. 조면 현무암류는 유역면적

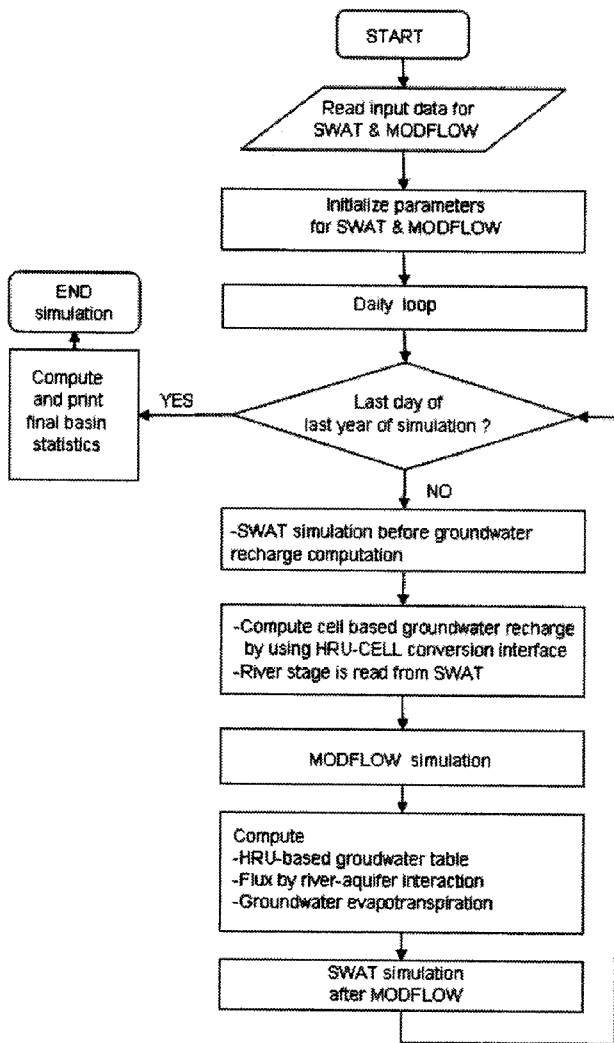


Fig. 3. Flowchart of computation of combined SWAT and MODFLOW models (Kim et al., 2008)

의 약 70%를 차지하고 있으며, 현무암류는 약 15.7%, 그리고 분석구가 약 12.9%의 면적에 걸쳐 분포하고 있다. 그 외에 조면암류가 1.1%, 사구층이 0.16%, 퇴적층이 0.01% 정도의 면적에 걸쳐 분포한다⁷⁾.

표선 유역의 모의기간(2004년-2007년)중 연평균 강수량은 약 2,714 mm이며, 과거 보고서³⁾에 의하면 연간 약 30%의 유출률을 보이고 있다. 이와 같은 천미천의 유출은 선행강우에 따른 토양수분변화, 토지이용의 변경에 따른 CN값의 변화 등에 좌우된

다. 표선 유역의 정확한 유출해석을 위해서는 관측 유량의 확보가 절실한 상황이며 이에 대한 조사는 점차 확대될 것으로 판단된다.

4. 결과 및 고찰

4.1. SWAT / SWAT-MODFLOW의 유출량 비교

지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 표선유역에 적용하였으며, SWAT모형만을 적용한 결과와 비교하여 그 차이점을 분석하였다. 다음 Fig. 5는 제한적으로 관측된 2006년의 유출사상에 대한 비교이다. 유출량이 관측된 기간은 2006년 8월 20일부터 2006년 11월 20일까지 93일간이다. Table 2에 나타낸 바와 같이 이 기간 중에는 100 mm이상의 강수가 발생한 사상이 3회 이상 기록되었으며, 50 mm를 상회하는 사상이 2회 관측되었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 SWAT모형은 기본적으로 토양층을 중심으로 유입된 물이 지하수대를 거쳐 하천으로 유출되는 구조로서 유출곡선의 감수부의 형태가 존재하며 일단 강우가 발생하면 그에 대해 반응하게 된다. 하지만 관측값을 보면 대체로 펄스 형태로 존재하며 선행강우 조건에 따라 하천에서의 유출여부가 결정되므로 SWAT의 결과는 관측값과 비교할 때 매우 큰 차이를 나타낸다. 이처럼 SWAT은 제주지역과 같이 하천유출에 기저유출성분이 기여하지 못하고 심부 지하수위로 공급되어 바다와 인접한 곳에서 집중적으로 배출되는 유출특성의 재현에는 근본적인 한계가 있다. 그에 비해 SWAT-MODFLOW는 지표수와 지하수의 상호작용을 통해 지하수 유출이 결정되므로 표선 유역과 같이 지하수위가 낮게 분포하는 경우에 대해서는 하천과 지하수가 분리됨으로써 펄스 형태의 유출이 계산 가능하며 이는 관측값과 매우 유사한 결과를 보인다. 다시 말해서 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 것임

Table 1. Area distribution according to topographical elevation

(unit : km²)

Area (km ²)	0~30 (El.m)	30~50 (El.m)	50~100 (El.m)	100~300 (El.m)	300~400 (El.m)	400~600 (El.m)	600~800 (El.m)	800~1320 (El.m)
207.3	10.3	7.1	25.8	76.3	31.7	36.7	13.1	6.3

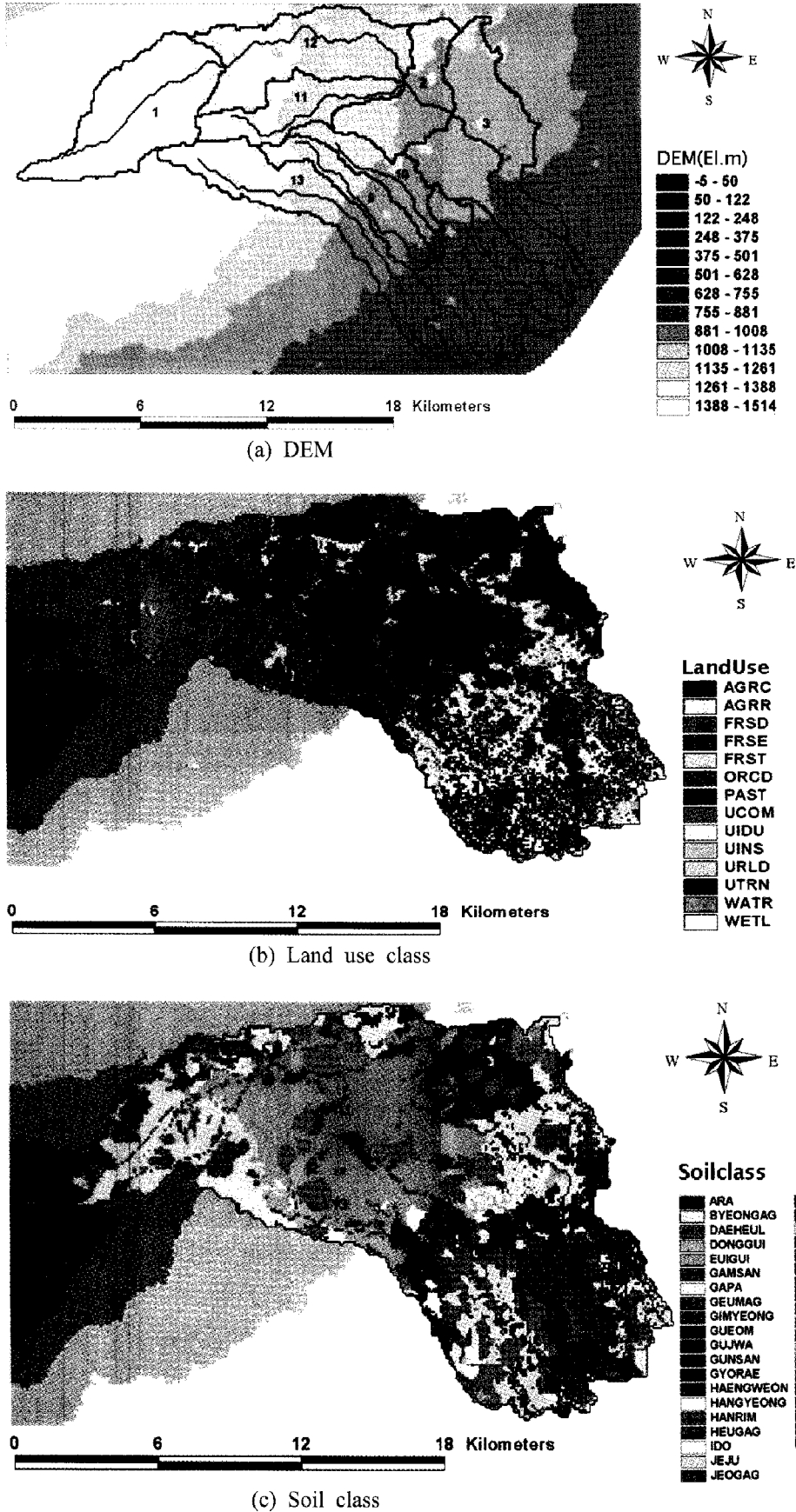


Fig. 4. The DEM, land use and soil class for Cheonmicheon watershed.

Table 2. Major rainfall events during observation period in 2006

Period	20 Aug. - 23 Aug.	25 Aug. - 31 Aug.	4 Sep. - 9 Sep.	11 Sep. - 18 Sep.	19 Oct. - 22 Oct.
Total rainfall (mm)	67.2	116.42	86.51	245.22	99.64

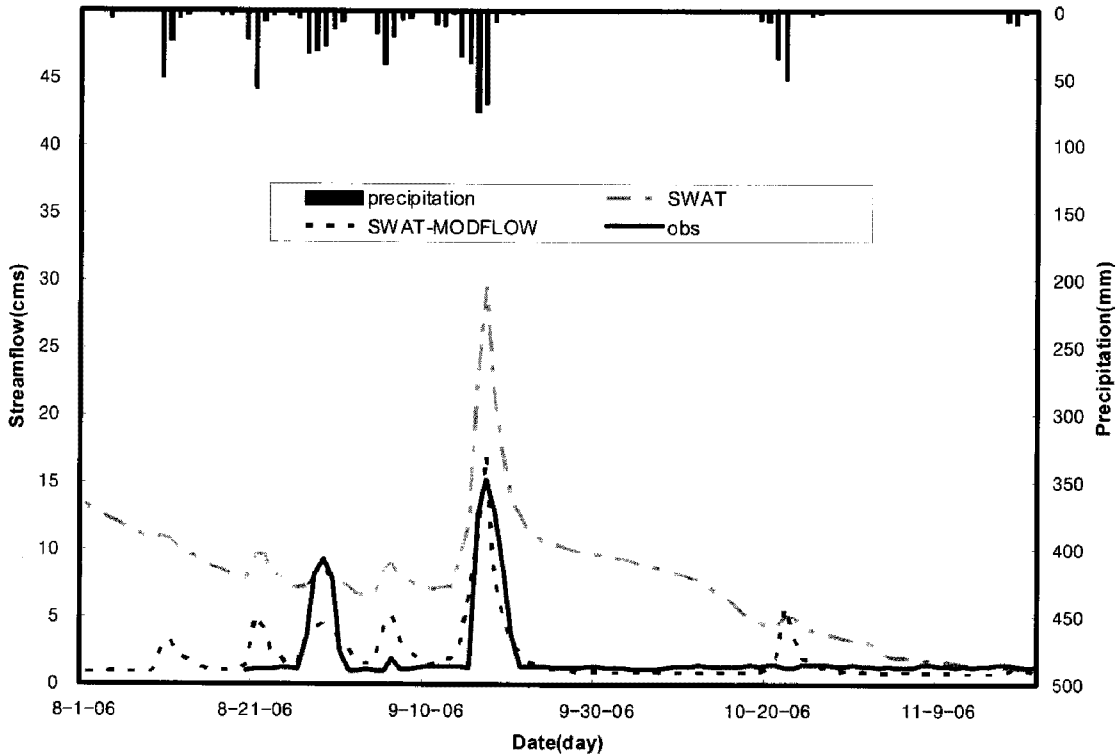


Fig. 5. Comparison between Simulated and Observed flow.

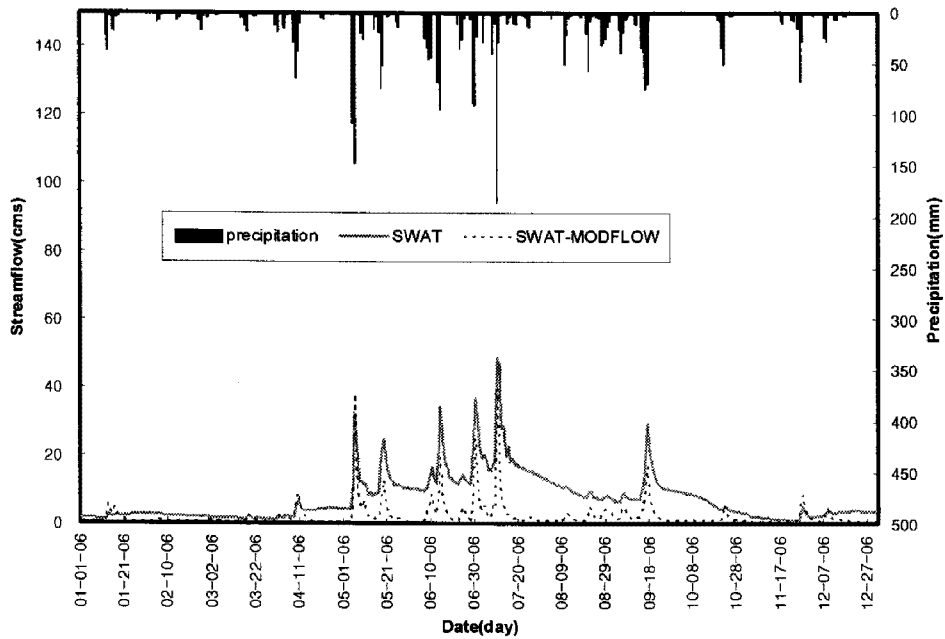
을 잘 보여준다. 그럼에도 10월 19일-10월 22일까지 발생한 강우에 대해서는 실제 유출이 발생하지 않았는데 이와 같은 현상은 제주의 독특한 수문현상으로 향후 추가적인 관측을 통해 현상규명을 해야 할 것이다.

관측치가 확보된 기간(2006년 8월 21일 - 2006년 11월 21일)에 대한 결정계수는 SWAT모형의 $R^2=0.46$, SWAT-MODFLOW의 경우는 $R^2=0.65$ 정도로 나타났다. 그러나 이 관측값의 기간이 매우 짧아 장기유출의 특성을 정확히 파악하기 위해서는 보다 장기간의 관측자료가 수집되어야만 한다. 본 연구에서는 모델링의 신뢰성을 판단하기 위한 충분한 관측값을 보유하고 있지 못한 관계로 모형의 보정과 검증에 대한 분석이 매우 제한적으로 기술될 수밖에 없으나 제주 지역의 특성상 유출해석을 수행하기 어려운 상황을 감안하여 SWAT-MODFLOW모형의 펄스형태 해석의 가능성을 제시하는데 목표를

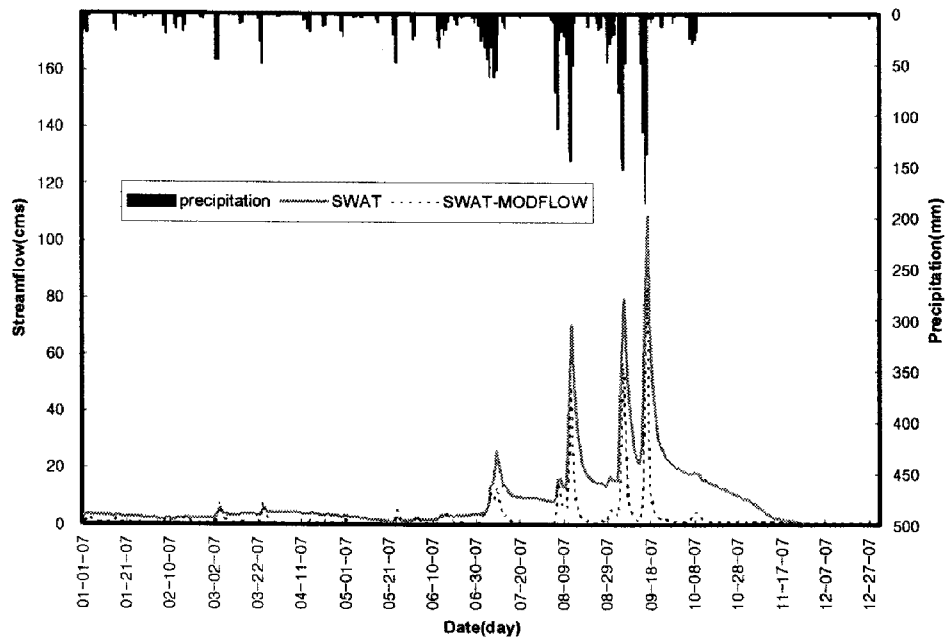
두고 있으며, 아울러 그 하부구조인 지하수 유동해석을 통해 전체적인 유출해석이 보완될 수 있다는 새로운 제안을 시도하는데서 그 의미를 찾고자 한다. Fig. 6에는 전체 모의기간에 대한 SWAT과 SWAT-MODFLOW의 결과를 나타냈다.

4.2. 지하수 유동분석

국내 최초로 시도되는 제주지역의 지표수-지하수 통합모의를 수행함에 있어서 지하수 유동해석은 주어진 자료를 최대한 활용하면서도 효율적인 모델링을 위해 대수층을 단순화하였다. 따라서 대수층의 경우 MODFLOW의 입력을 위한 대상지역의 수리지질은 1개의 총적층(화산암층) 및 1개의 투수성 암반층(서귀포 층)으로 단순화하였다. 모델 영역은 가로 29,900 m, 세로 16,700 m로 면적 499.33 km^2 이고, 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려한 216.11 km^2 , 모델 격자는 167행, 299열, 2층으로 구



(a) 2006



(b) 2007

Fig. 6. Simulated discharge results by SWAT and SWAT-MODFLOW.

성되며 수평방향 격자 한 개의 크기는 100 m×100 m 이다. 수평격자의 크기는 지표수 해석과 동일하게 적용되어야 하는데 지표수 유출해석을 위한 DEM 및 토지이용도, 토양도를 구성함에 있어서 100 m 격자를 사용하였기에 지하수 역시 이와 동일하게 적

용되었다.

각 지층의 수리 특성인자들의 경우 제주 삼다수 지하수 정밀조사 보고서⁷⁾의 자료를 이용하였으며 Table 3에 제시하였다. 특히 투수계수의 경우 해발 고도를 기준으로 그 특성이 다르게 나타난다고 알

Table 3. Hydrogeologic parameters for MODFLOW

Type	K(cm/sec)	S _s (m ⁻¹)	S _y
Alluvial	1.0~2.59×10 ⁻²	2.3×10 ⁻⁵	0.12-0.14
Bedrock	1.35~1.56×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁵	0.12

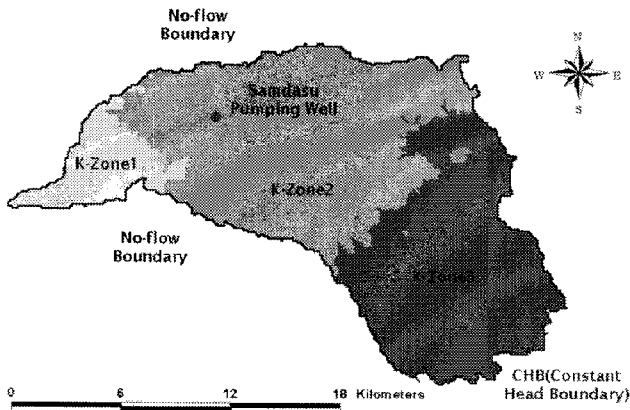


Fig. 7. Boundary condition and hydraulic conductivity zones.

려져 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 표선유역을 고도별로 3부분으로 구분하여 각각의 투수계수의 값을 산정하였다. 또한 저류계수 및 River Package에 사용되는 전도계수 C값의 경우 실측 지하수위와 모의 지하수위간 보정과정을 통해 모델링

에 적합한 값을 산정하였다. Fig. 8은 주 관측정인 삼다수 감시 1호정이 위치한 지역의 수직 단면도를 나타낸 것이다.

SWAT-MODFLOW의 경우 기존의 MODFLOW와는 달리 함양량의 값을 공간적인 분포로 계산하여 MODFLOW의 입력자료로 사용하는 형식을 가진다. 따라서 SWAT에서 계산된 물수지를 바탕으로 산정된 함양량이 MODFLOW의 입력자료로 타당한지 살펴보기 위해 표선유역내 물수지를 살펴보고 실제 지하수위 시계열과 함양량의 시계열을 비교 분석하여 그 효율성을 살펴보았다. 제주도수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ³⁾에 보고된 제주도 표선유역의 물수지는 다음 Table 4와 같다.

이를 바탕으로 실제 삼다수 수위관측정에서 측정한 2004년~2007년의 실측 지하수위와 계산된 함양량과의 상관계수(Correlation)는 R=0.87로 비교적 양호하게 나타났다. 또한 삼다수 관측정에서의 실측 지하수위와 모의 지하수위 시계열을 비교하였다 (Fig. 9). 본 연구에서는 2004년~2007년까지 4년의 모의기간을 두고 모델링을 실시하였는데 제주도의 경우 지표면 아래로 평균 200 m(상류의 경우)지점에 지하수위가 형성되고 있어 모델링에서 지하수위가 안정되는데 꽤 오랜 기간이 필요하였다. 따라서

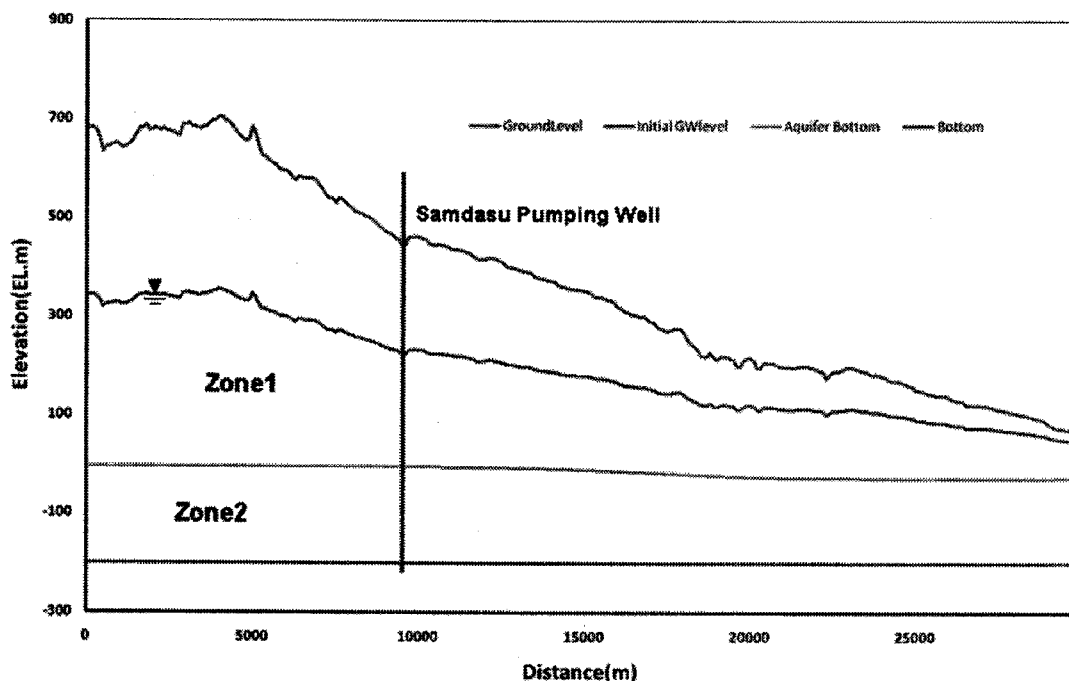


Fig. 8. Vertical section map for Samsasoo observation well in Pyoseon.

Table 4. Water budget result in Cheonmicheon watershed

Classification		Rainfall (10 ⁶ m ³ /year)	Evapotranspiration (10 ⁶ m ³ /year)	Runoff (10 ⁶ m ³ /year)	Recharge (10 ⁶ m ³ /year)
Report (2003)		497	127(25%)	109(21%)	261(54%)
This study	2006	591	182(30%)	98(17%)	310(53%)
	2007	637	180(28%)	118(19%)	338(53%)

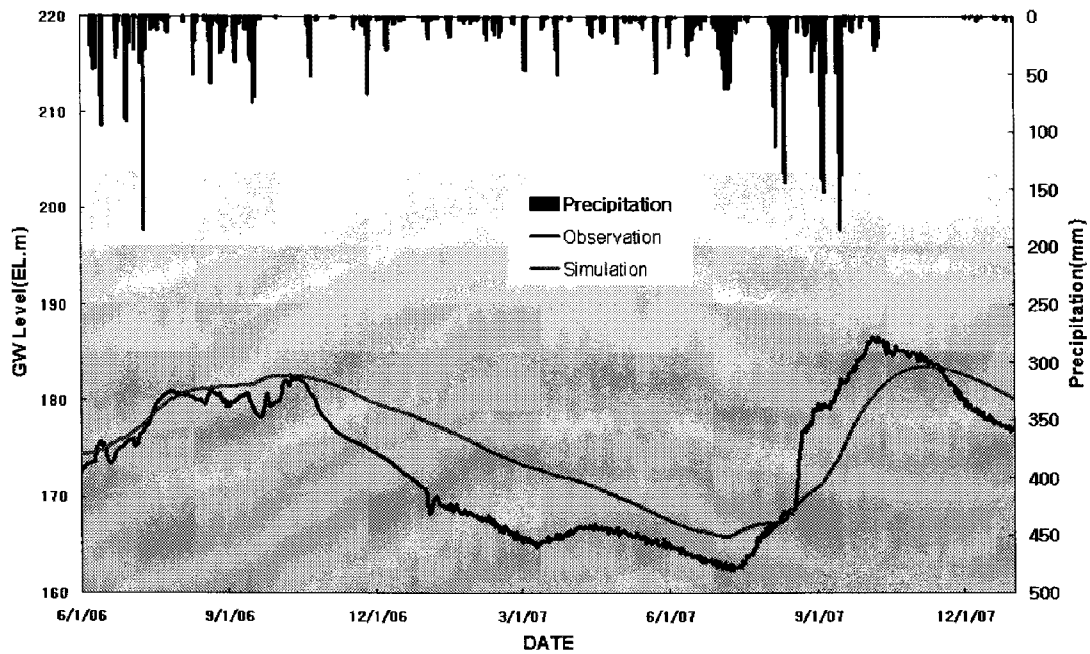


Fig. 9. Comparison between observed and simulated groundwater level.

비교적 지하수위가 안정된 2006년 6월 이후부터 2007년 12월까지의 지하수위를 비교하였다.

5. 결 론

제주도는 우리나라의 청정 수자원 보존 구역으로서 지속가능한 음용수 개발사업을 전략적으로 육성하는 한편, 물상품 브랜드 제고가 필요한 시점이다. 하지만 지금까지는 적정 지하수 개발가능량을 산정함에 있어서 많은 법적, 기술적 제약이 있었던 것이 사실이다. 본 연구에서는 완전연동형 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 수문해석이 난해한 제주 표선 지역에 대해 실증 적용하여 지표수 유출현상과 지하수 유동을 동시에 모의할 수 있었다. 내륙과는 매우 상이한 제주의 유출특성이 SWAT-MODFLOW에서는 현실적으로 모의가

가능함을 확인할 수 있어 향후 제주 전 지역으로의 수문해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 SWAT-MODFLOW를 통해 파악된 표선유역의 유출률은 약 17~19% 정도로 나타났으며, 지하수 함양량은 약 53%로 추정되어 기존 보고서와 유사한 결과를 보여주었다. 또한 관측치와 비교하여 모의된 지표수 유출량의 상관성은 $R^2=0.65$, 지하수위의 상관성은 $R=0.87$ 모두 관측치 대비 좋은 상관성을 보였다. 한편, 표선 유역의 적용을 통해 확인된 제주 지역의 독특한 수문현상에 대해서는 선행강우 조건과 결부시켜 보다 정확한 규명이 필요할 것으로 판단된다.

이와 같은 분석기술을 활용하면 보다 정확한 지하수 함양량의 산정 및 지표수 유출과의 비교를 통해 제주 지역의 적정 지하수 개발가능량을 산정하는데 중요한 기술적 판단기준이 수립될 수 있을 것

으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- 1) 고기원, 박윤석, 박원배, 문덕철, 2003, 제주도 동부 지역의 수문지질에 관한 연구(II), 한국지하수토양 환경학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, 67-72.
- 2) 문덕철, 2004, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 석사학위 논문, 75pp.
- 3) 제주도/한국수자원공사, 2003, 제주도수문지질 및 지하수자원 종합조사III.
- 4) 김남원, 정일문, 원유승, 2004a, 완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형(I): 모형의 개발, 한국수자원학회 논문집, 37(6), 499-507.
- 5) 김남원, 정일문, 원유승, 2004b, 완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형(II): 모형의 평가, 한국수자원학회 논문집, 37(6), 509-515.
- 6) Kim N. W., I. M. Chung, Y. S. Won and G. J. Arnold, 2008, Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, *Journal of Hydrology*, 356, 1-16.
- 7) 한국농촌공사/제주특별자치도개발공사, 2007, 제주 삼다수 지하수 정밀조사 보고서.
- 8) Arnold J. G., P. M. Allen and G. Bernhardt, 1993, A comprehensive surface-groundwater flow model, *Journal of Hydrology*, 142, 47-69.
- 9) 한국건설기술연구원, 2006, 지표수 수문성분 해석 시스템 개발 - 2단계 2차년도 연구보고서, 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업 (2-2-2).
- 10) McDonald M. G. and A. W. Harbaugh, 1988, *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model*, Techniques of Water Resources Investigations Report, U.S. Geological Survey, Book 6, Chapter A1, 528 pp.