

완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의

An Integrated Surface Water-Groundwater Modeling by Using Fully Combined SWAT-MODFLOW Model

김남원* · 정일문** · 원유승***

Kim, Nam Won · Chung, Il Moon · Won, Yoo Seung

Abstract

This paper suggests a novel approach of integrating the quasi-distributed watershed model SWAT with the fully-distributed groundwater model MODFLOW. Since the SWAT model has semi distributed features, its groundwater components hardly considers distributed parameters such as hydraulic conductivity and storage coefficient. Generating a detailed representation of groundwater recharge, head distribution and pumping rate is equally difficult. To solve these problems, the method of exchanging the characteristics of the hydrologic response units (HRUs) in SWAT with cells in MODFLOW by fully combined manner is proposed. The linkage is completed by considering the interaction between the stream network and the aquifer to reflect boundary flow. This approach is provisionally applied to Gyungancheon basin in Korea. The application demonstrates a combined model which enables an interaction between saturated zones and channel reaches. This interaction plays an essential role in the runoff generation in the Gyungancheon basin. The comprehensive results show a wide applicability of the model which represents the temporal-spatial groundwater head distribution and recharge.

Keywords : SWAT, MODFLOW, groundwater recharge, groundwater head, river-aquifer interaction

요 지

본 연구는 준분포형 장기유출모형인 SWAT과 3차원 분포형 지하수 모형인 MODFLOW를 통합한 새로운 시도에 관한 것이다. SWAT모형은 준분포형 특성상 지하수 성분중에서 투수계수나 저류계수등의 분포형 매개변수를 고려할 수 없으며 지하수 함양량, 수두와 양수량 분포 등을 고려하는데에도 어려움이 있다. 이와같은 문제점을 극복하기 위해 SWAT의 수문반응단 위인 HRU와 MODFLOW의 기본단위인 셀간의 특성치들을 주고받을 수 있는 완전연동형 기법을 제시하였다. 이러한 결합은 하천망과 대수층간의 상호작용을 경계흐름으로 고려함으로써 완성되었다. SWAT-MODFLOW 결합모형을 우리나라 경안천 수위관측소 유역에 시험적으로 적용한 결과, 포화대와 하천지류간의 상호작용이 경안천 유역의 유출량 산정에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 이와 함께 결합모형은 지하수두 및 함양량의 시공간적 변동성을 재현하는 등 광범위한 적용가능성을 보여주었다.

핵심용어 : SWAT, MODFLOW, 지하수 함양, 지하수두, 하천대수층 상호작용

1. 서 론

최근 하천 주변의 지하수 이용에 따른 수리권 문제, 지하수 함양량 및 적정 개발량 산정 문제, 하천 유지유량 문제 등 여러 가지 현안에 대한 논란이 가중되고 있다. 한편, 수자원 상위계획에서 수문성분의 정확한 파악이 우선적으로 이루어지지 못하면 하위계획에도 혼란이 야기되며 수자원 확보 측면에서도 부적절한 예측을 초래한다. 그러나 지금까지의 유역 유출모형은 주로 지표수 관리문제에만 적용되어 왔

고 지하수 문제는 깊이 다루어 지지 않았다.

지하수 모형 역시 지표수 해석에는 제한적인 접근만이 가능했으므로 대수층 관리문제만을 중점적으로 다루었다. 예를 들면 강우에 의한 함양, 증발산, 지표면 유출 등이 수문학적 과정 차원에서 다루이지 못했고 주로 기지의 입력 값으로 정하거나 검정을 위한 시행착오용 매개변수로 간주돼 왔다. 따라서 지표수 관리에 있어서 지하수 모형의 역할은 미미했다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 여러 방안 중 가장 우선적인 것은 지표수와 지하수를 통합해석할 수 있는 장기 유

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

**정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원(E-mail : imchung@kict.re.kr)

***건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 연구사(E-mail : yswon@moct.go.kr)

출 모형의 구축이다. 이러한 모형의 선결 조건은 토지이용, 지표유출, 기후인자 등을 고려한 수문학적 영향을 검토할 수 있는 동시에 지표수와 지하수의 수리학적 상호작용을 제대로 다룰 수 있어야 한다는 점이다. 또한 지하수 거동의 경우 회귀수의 영향이나 기타 결과치의 공간분포를 설명할 수 있어야 한다. 이를 위해 개발된 모형이 완전연동형 SWAT-MODFLOW모형이다(김남원 등, 2004a, b). 이 모형은 유역기반의 유출해석에서 정확한 양을 산정할 수 없었던 지하수 유출량의 해석을 위해 SWAT(Arnold 등, 1993; Arnold 등, 1995)모형과 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1988) 모형을 결합시킨 것으로서 통합수문성분 해석에 이용될 경우 기존 해석 수준에서 큰 진보를 기대할 수 있다.

SWAT모형은 널리 사용되는 장기유출모형으로 CREAMS(Knisl, 1980)와 SWRRB(Williams 등, 1985)로 부터 단순화된 하도추적과 대유역의 지하수 성분을 첨가함으로써 발전했다. SWAT자체로도 지하수 성분을 계산하고 있으나 모형이 준분포형이므로 투수계수를 포함한 분포형 매개변수의 공간적 변동성을 고려하기 어려우며 계산된 지하수위의 공간적 분포를 제대로 표현할 수 없는 단점을 가지고 있다. 또한, MODFLOW모형을 이용한 기존의 지하수 유동해석에서 입력자료 중 매우 큰 비중을 차지하는 함양량의 정확성이 간과되어 왔으며 지표수 유출성분과의 연계가 이루어지지 못하여 유출모의결과에 많은 불확실성을 포함할 수밖에 없었다.

이러한 단점을 극복하기 위해 SWAT의 HRU(Hydrologic response unit)와 MODFLOW의 기본단위인 셀(cell)간의 특성치들을 주고받을 수 있는 부프로그램들을 개발하였고, 이와 같은 안정된 플랫폼을 기반으로 SWAT모형의 지하수 모형을 MODFLOW모형으로 대체시킴으로써 두 모형간의 연계가 시간단계별로 이루어지는 완전연동형 모형을 구축할 수 있었다. 이같은 방식은 Sophocleous등(1997)이 SWAT과 MODFLOW를 순차적으로 결합시킨 SWATMOD와는 다소 차별화된 시도로서 불안정한 플랫폼에 의해 분리된 모델링을 수행한 기존 연구의 단점을 극복한 사례라고 할 수 있다. 결합모형에서 MODFLOW의 함양량은 SWAT 모형이 구동될 때 토양층을 거쳐 침투된 수분이 비포화대를 지나면서 지체되어 대수층으로 유입되는 것을 의미한다.

SWAT모형의 지하수 모듈은 집중형이므로 투수계수를 포함한 분포형 매개변수와 지하수위의 변화 등을 고려하지 못하지만 SWAT-MODFLOW에서는 SWAT의 지하수 모듈 대신 보다 세부적이고 복잡한 MODFLOW를 사용해서 모의함으로써 함양량의 시공간 분포 및 하천네트워크와 대수층간의 상호작용도 고려할 수 있다. 또한 MODFLOW의 지하수 성분은 3차원 지하수 유동방정식으로 해석되므로 복잡한 지층 구조, 경계조건, 다양한 수리특성 등에 대한 고려가 가능하며 결과적으로 지하수위의 공간적 분포를 파악할 수 있다. MODFLOW 모형으로부터 산정된 지하수 유출량과 SWAT 모형으로부터 산정된 지표유출량이 합해져서 총 유출량이 산정된다.

김남원 등(2004a, b)은 SWAT-MODFLOW의 개발과정을 설명하고 오산천 유역에 대해 모형을 테스트하였으나 당시 실제 관측 유출량자료 및 지하수위 자료와의 비교는 수행하

지 않았다. 본 연구는 SWAT-MODFLOW를 경안천 유역에 시험적용함으로써 모형의 적용가능성을 평가하는 것을 주된 목적으로 하며 이를 위해 SWAT모형만을 고려한 경우와 결합모형 구동결과를 비교하였다. 아울러 결합모형을 통해서만 얻어질 수 있는 일련의 결과치들을 시공간적으로 표현함으로써 기존 연구와의 차별성을 강조하고자 한다.

2. SWAT-MODFLOW 결합모형의 개요

본 연구에서 개발된 모형은 MODFLOW가 SWAT내에서 호출되는 형식으로 결합되었으며 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT모형으로부터 추출하여 MODFLOW모형에 입력시키고, 하천과 대수층의 상호작용을 모의하기 위해 MODFLOW의 하천(river)패키지를 사용하였다.

SWAT모형은 상대적으로 느린 흐름인 지하수 흐름해석에 문제점을 가지고 있으며, MODFLOW는 지하수 흐름 해석을 제외한 나머지 물 순환성분에 대한 해석방법이 포함되어 있지 않아 주요 입력자료인 지하수 함양량의 결정에 어려움이 많다. 따라서 두 모형간의 장점은 유지하면서 단점을 상호 보완한다면 수문순환성분을 요소별로 정량화시킬 수 있을 것이다. 이를 위해 SWAT에서 HRU별로 발생하는 지하수 함양량을 MODFLOW의 입력자료로 이용하여 지하수 흐름을 산정하고 지하수 유출량을 다시 SWAT으로 교환할 수 있다면 유역의 시·공간 특성을 적절히 반영할 수 있을 것이다. 이에 대한 개념도를 그림 1에 나타냈다. SWAT과 MODFLOW결합모형에서의 수문성분은 강수, 증발산, 침투, 함양, 하도수위, 지하수 유출 등이다.

그림 2에서 나타낸 바와 같이 기존 SWAT모형은 지하수 부분을 전후로 두 부분으로 나뉜다. 해당되는 부프로그램은 각각 MODFLOW의 실행 전후로 구분되어 수행되며 SWAT으로부터 지하수 함양, 하천수위, 대수층 증발산 등의 정보를 가져온다. MODFLOW를 실행한 후에는 셀 기반 함양량, 대수층-하천 물교환량, 지하수위 변화, 대수층 증발산등의 결과를 추출한다.

SWAT을 통해 계산되는 HRU기반의 지하수 함양량은 HRU-GRID 변환모듈에 의해 MODFLOW의 셀기반 함양으로 변환된다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 HRU별 대수층의 함양량은 같은 HRU에 해당하는 셀의 개수로 나뉘어져서 MODFLOW에 입력된다.

SWAT-MODFLOW는 하천과 대수층의 상호작용을 모의하

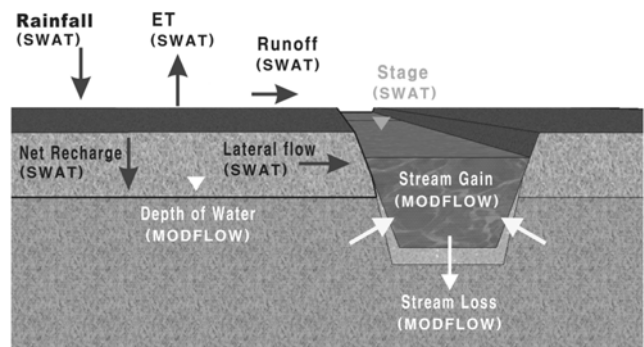


그림 1. 지표수-지하수 연계의 개념도(한국건설기술연구원, 2006)

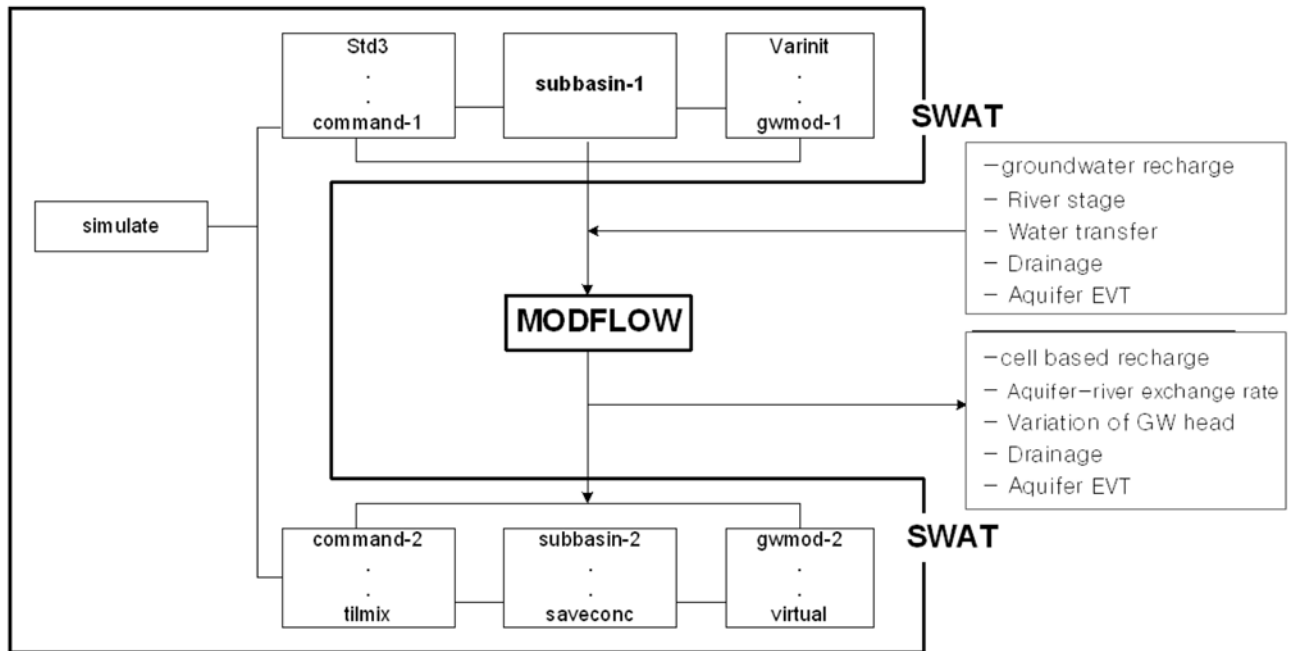


그림 2. SWAT-MODFLOW의 코드 연결(한국건설기술연구원, 2006)

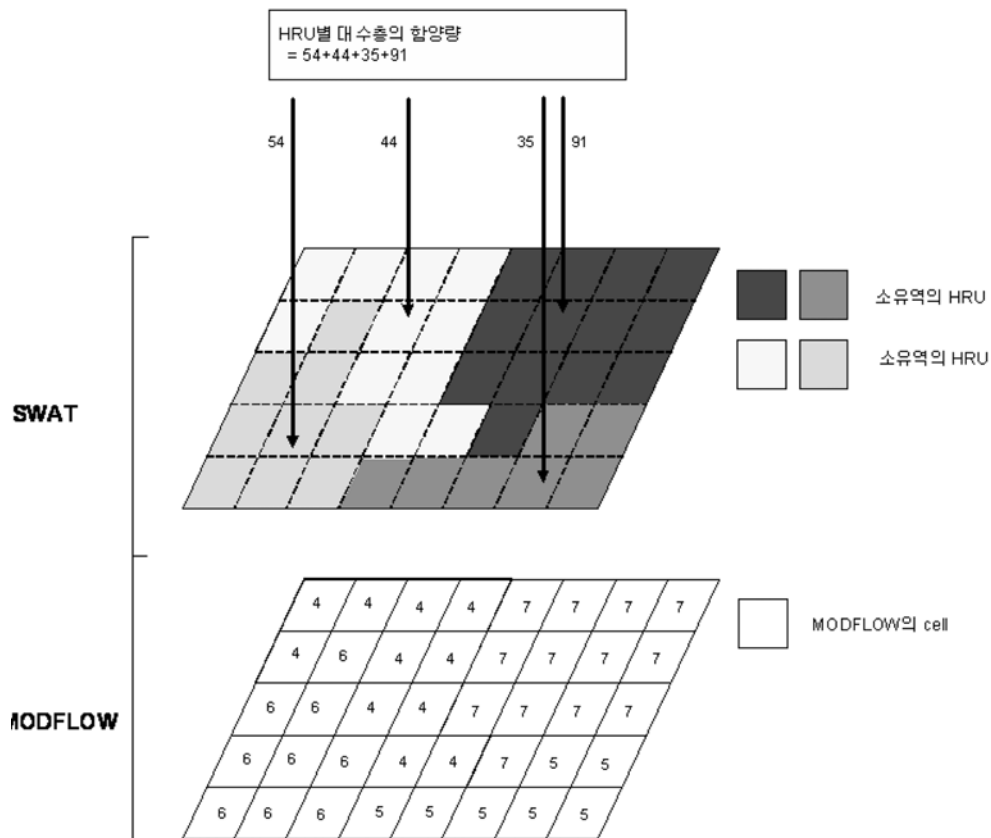


그림 3. SWAT-MODFLOW의 합양량 계산(한국건설기술연구원, 2006)

기 위해 MODFLOW의 river패키지를 이용하며 이때 하천 수위 정보는 SWAT으로부터 만들어진다. 하천과 대수층의 물교환량이 계산되면 이를 다시 SWAT모형으로 보내며 소유역의 유출량과 함께 합산되어 SWAT의 하천 유입량으로 결정된다.

3. SWAT-MODFLOW모형의 입력자료 구축

결합모형의 시험적용을 위한 분석 대상유역은 그림 5에 나

타난 바와 같이 경안천 유역 중 경안수위관측소를 기준으로 한 259.2 km²이며, 표 1에 나타난 것처럼 9개의 소유역별 면적은 대략 7~60 km², 하천길이는 5~20 km, 평균경사는 0.017~0.067 m/m, 주 하천의 평균 폭은 4~15m 이다(표 1).

SWAT모형은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 모형이므로 토양층자료를 구축하는 것이 핵심이다. 이를 위해 1:25000의 정밀토양도로부터 얻어진 경안수위관측소를 중심으로 한 38개 토양층을 실제 분석에 이용했다. 토양층에 연결되어 있는 DB는 농업과학기술원에서 구축관련 연구를 진

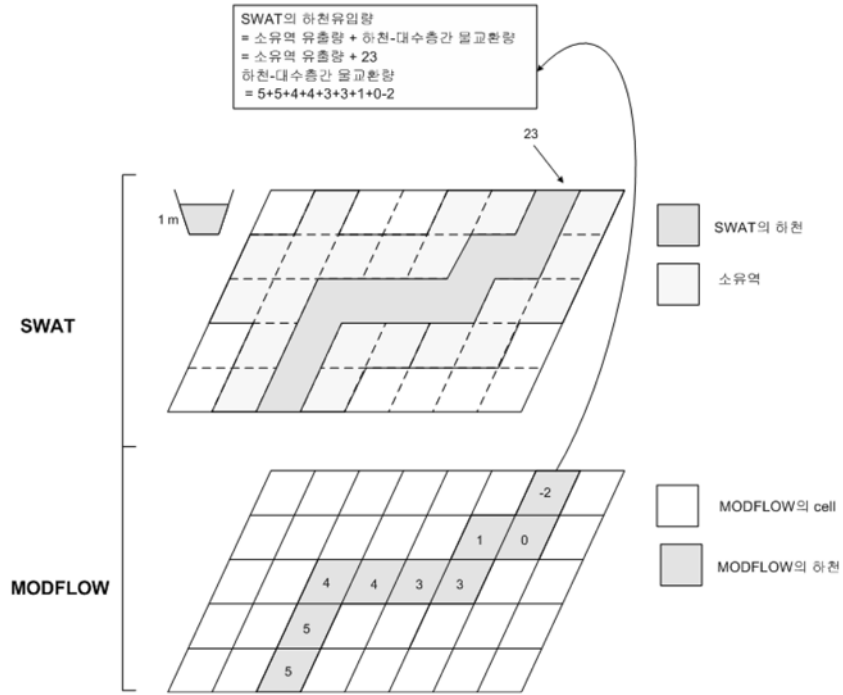


그림 4. SWAT-MODFLOW의 하천-대수층 물교환 방식(한국건설기술연구원, 2006)

표 1. 소유역 특성(김남원 등, 2005)

소유역	구간	면적 (km ²)	길이 (km)	경사 (m/m)	폭 (m)
1	직리천	16.91	8.226	0.043	7.038
2	직리천-오산천	29.38	10.322	0.050	9.833
3	오산천	47.44	15.194	0.017	13.070
4	오산천-대대천	59.29	19.446	0.026	14.941
5	대대천-양지천	6.96	5.484	0.067	4.132
6	대대천	20.01	8.295	0.039	7.789
7	대대천-상류	38.74	12.809	0.025	11.575
8	양지천	22.62	12.264	0.029	8.380
9	직리천-경안수위표	17.68	10.167	0.030	7.229

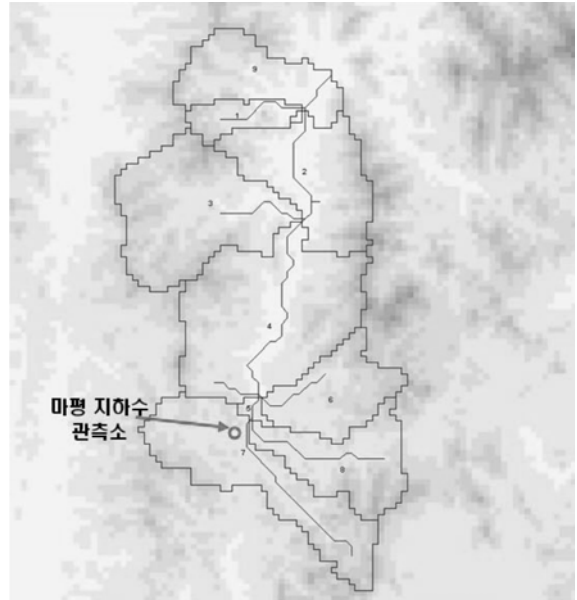


그림 6. 경안수위관측소 유역의 수치표고모형(DEM)



그림 5. 소유역 구분(김남원 등, 2005)

행하고 있으므로 본 연구에서는 기존에 농업과학기술원에서 제시한 농업토양 정보 시스템(<http://asis.rda.go.kr>)의 토양 구성비 등의 자료를 바탕으로 토양구성비로부터 함수량과 포장용수량 등을 산정하기 위해 Saxton 등 (1986)이 제안한 일반화된 토양-물의 특성치 추정방법(<http://www.bsyes.wsu.edu/saxton>)을 이용하여 독자적인 토양층 DB를 구축했다.

SWAT모형은 그림 6에 나타난 수치표고모형(DEM)을 이용하여 하천망생성, 소유역분할, 소유역경사등이 유역특성인자를 결정한다. 기본적으로 30 m의 격자크기를 이용하나 SWAT-MODFLOW모형에서는 DEM의 격자망을 기반으로 MODFLOW격자망을 구성하므로 해석영역에 맞도록 300m의 DEM을 구축하였다.

또한 SWAT모형은 그림 7a, 7b에 나타난 토양도와 토지이용도, 그리고 이 두 자료를 중첩시켜 구한 HRU분포를 수

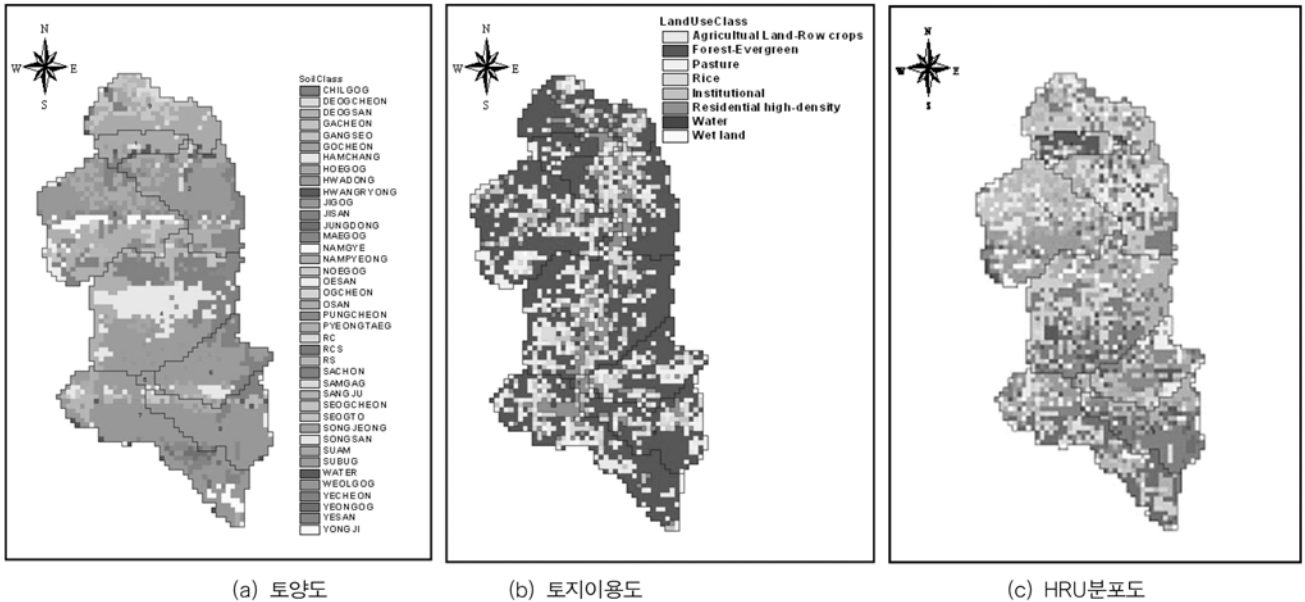


그림 7. 경안천 유역의 DEM, 토양도, 토지이용도, HRU분포도

문응답의 기본단위로 사용하는데, 이 HRU에 대한 정보가 SWAT의 입력자료로 이용될 때 SWAT의 준 분포형 특성으로 인해 소유역내의 HRU의 공간적인 주소는 소멸된다. 따라서 소멸되기 전의 수문응답 단위특성을 MODFLOW에 반영하기 위해서는 DEM자료를 이용한 HRU의 공간분포도(그림 7c)를 구한 후 이를 다시 MODFLOW의 격자에 배치시키는 작업이 필요하다. 이를 위해 독자개발한 HRU-GRID 변환모듈을 사용하였으며 이때 MODFLOW의 한 격자크기는 300 m×300 m로 하여 총 123×126개의 격자망을 생성하였다.

대수층 특성치를 입력 매개변수로 결정하기 위해 국가지하수 정보센터(www.gims.go.kr)에서 제공하는 경안수위관측소 유역내 국가 지하수 관측망인 마평 지하수 관측소 정보를 이용하였다. 충전층은 하상퇴적물기원인 자갈로 구성돼 있으며 그 아래 층은 풍화암층으로 호상 혹은 편마암의 풍화암과 연암층이 자리잡고 있다. 따라서, 충전층

의 투수계수값인 2.113×10^{-3} cm/sec를 충전층의 투수계수로 결정하였고 비피압 대수층의 비저유율인 S_y 값은 Freeze와 Cherry의 문헌을 참고하여 0.1~0.3범위내에서 결정하였다(Freeze and Cherry, 1979). 또한 하천과 대수층의 상호작용을 결정하는 매개변수인 CRIV(=CLW/M)값은 하천구간의 길이(L), 하폭(W)과 하상바닥두께(M), 하상바닥의 수리전도도(C)으로 결정되는 변수로서 본 연구에서는 하상바닥의 투수성에 대한 정보가 없어 충전층의 1/10로 추정하여 적용하였다.

4. SWAT-MODFLOW모형의 시험적용 결과분석

본 연구는 지표수-지하수 통합모의의 적용성을 확인하는 것을 목표로 하며 이를 위해서는 정확한 유량자료가 요구된다. 이를 위해 비교적 정확한 유량자료를 보유한 1989년

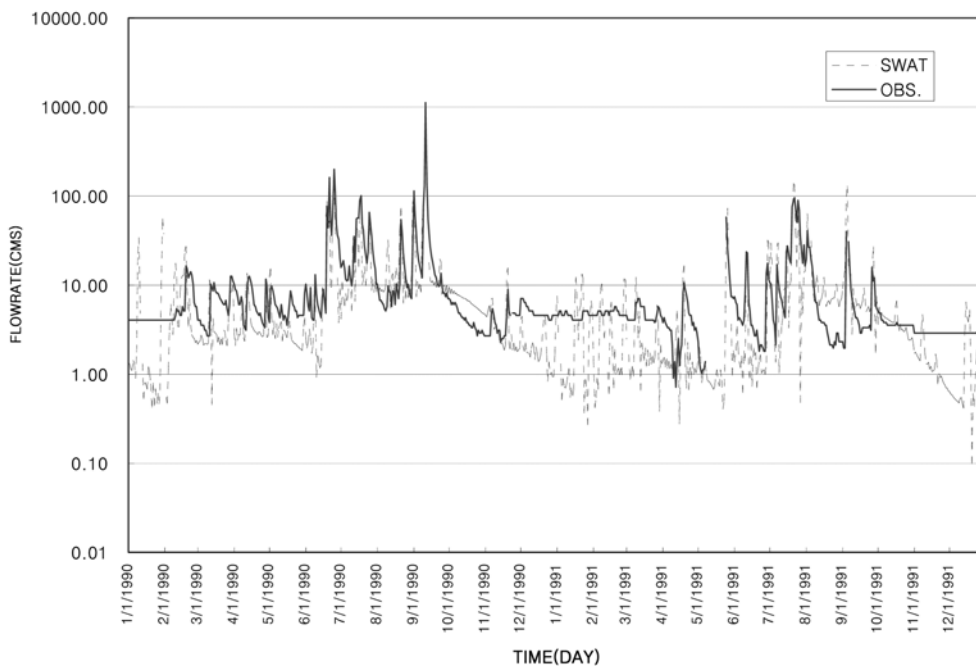


그림 8. SWAT모형을 이용한 경안수위표 지점의 관측값과 모의값(1990년-1991년)

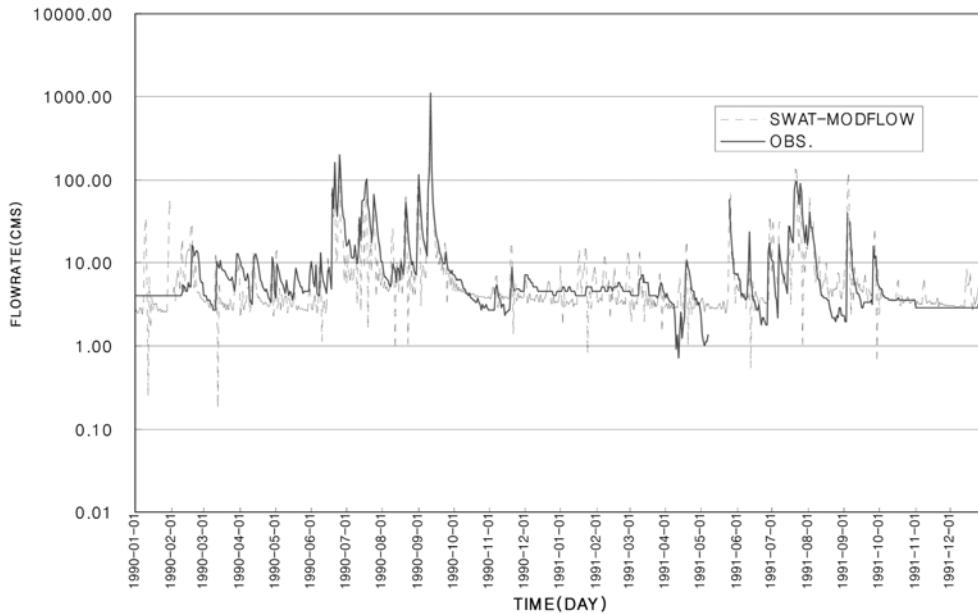


그림 9. SWAT-MODFLOW모형을 이용한 경안수위표 지점의 관측값과 모의값(1990년-1991년)

~1991년의 유출량을 모의하였으며 이 중 1989년은 모형의 초기수위 안정화 및 SWAT모형의 워밍업기간으로 결과분석에서는 제외하였다.

그림 8은 SWAT모형을 이용한 1990년부터 1991년까지 2년간의 경안 수위표 지점에서의 관측 유출량과 모의유출량을 도시한 것이다. 비교적 관측 유출량과 모의 유출량의 경향은 잘 일치하고 있으나 1991년 상반기의 갈수기간에서 SWAT모형은 유출량이 매우 저조한 것으로 계산되고 있다. 반면 그림 9에 나타난 SWAT-MODFLOW의 모의결과를 보면 갈수기에도 유출량이 급감하지 않고 실측유출량에 접근하는 양상을 보이고 있음을 볼 수 있었다. 이 같은 차이는 근본적인 모형의 형태에 기인한다. 그림 10에 나타난 두 모형의 결과치에 대한 상관관계수에 있어서도 SWAT-MODFLOW의 경우가 SWAT모형에 비해 좀 더 향상된 결과를 보이고 있다.

잘 알려진 바와 같이 SWAT모형은 준분포형 모형이며, 그 중에서 지하수 유출은 수조모형(tank model)식의 개념

적(conceptual)모형을 따르고 있다. 다시 말해서 갈수시 지하수 유출성분은 지수함수적으로 감소하는 특성을 가진 식에 의존한다. 이럴 경우 갈수시에는 급감하는 형태를 나타내므로 경안천과 같이 지하수 유출이 전체 유출에 큰 부분을 형성하는 경우에는 실제 관측치와 차이를 보일 수밖에 없다. 하지만 SWAT-MODFLOW의 경우는 SWAT모형의 지하수 성분을 분포형 모형인 MODFLOW로 대체하여 하천과 대수층간의 수위차이에 따른 물교환량으로 지하수 유출량을 결정하므로 보다 현실적인 모델링 결과를 제시하고 있다.

SWAT-MODFLOW의 또 한 가지 장점은 지하수 함양량의 시공간적 분포를 일단위, 구역공간별로 보여줄 수 있다는 점이다. 그림 11은 모의시작 후 500일, 1000일이 지난 시점에 대수층으로의 함양량 공간분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 MODFLOW의 셀별 특성값에 대응하는 SWAT의 HRU에 따라 토지이용과 토양특성이 반영되어 대수층으

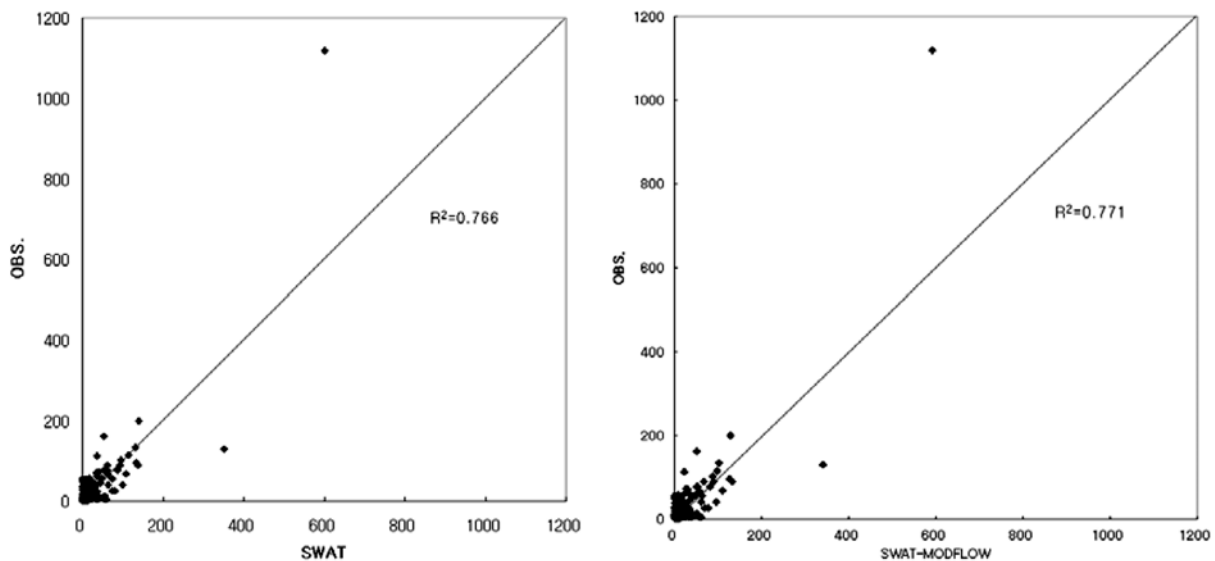
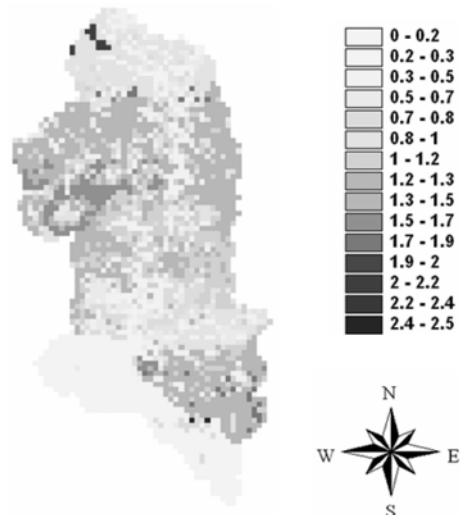
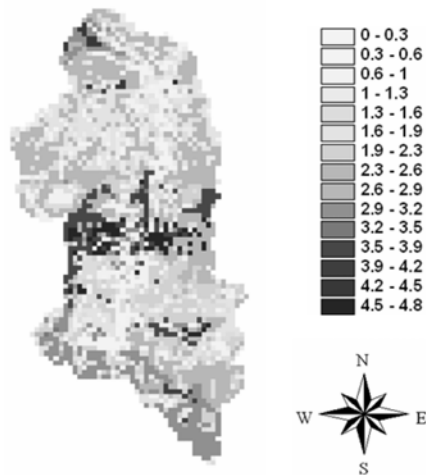


그림 10. 모형별 결정계수 비교



(a) 모의시작 500일 후



(b) 모의시작 1000일 후

그림 11. 경안천의 지하수 함양량 공간분포(단위 : mm)

로 함양되는 양은 공간적으로 변동성이 크게 나타남을 알 수 있다.

이와 함께 SWAT-MODFLOW는 그간 SWAT모형에서는 다루지 못했던 지하수위의 공간적 분포를 계산할 수 있다. 그림 12는 모의시작 후 각각 500일, 800일 그리고 1000일이 지난 지하수위 분포도로 계절에 따른 미소한 지하수위

변화를 확인할 수 있다. 한편, 용인 마평 지하수위 관측소 지점에서의 1990년과 1991년의 지하수위 변동을 시계열로 나타내면 그림 13과 같다. 그림 13에서는 참고로 2003년~2004년의 용인 마평 지하수위 관측소의 관측지하수위도 함께 도시하였다. 지하수위 관측은 1997년부터 이루어져 모의치와 직접적인 비교는 할 수 없으므로 지하수위 변동폭과 계절별 증감양상만을 확인하는데 주안점을 두었다. 그림 13에서 보는 바와 같이 계절별로 지하수위 증감양상이 잘 나타나고 있으며 변동폭의 경우, 관측값은 최대 El. 81.72m, 최소 El. 80.20m, 평균 El. 80.61m를 나타낸 반면, 계산값의 경우 최대 El. 82.32m, 최소 El. 80.05m, 평균 El. 81.78m를 나타내어 전반적으로 지하수위는 1m 내외로 변동폭에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 이와 같은 편차에도 불구하고 홍수시와 갈수시의 지하수위 상승과 하강의 경향은 분명하게 나타남으로써 결합모형을 통한 지하수위 예측에 본 모형이 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 유역기반의 지표수-지하수 통합모의를 위해 개발된 SWAT-MODFLOW의 시험적용을 수행하였다. SWAT모형은 준분포형 특성상 지하수 성분중에서 투수계수나 저류계수등의 분포형 매개변수를 고려할 수 없으며 지하수 함양량, 수두분포와 양수량 등의 세부적인 현황 등도 표현하지 못한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 SWAT의 수문반응단위인 HRU와 MODFLOW의 기본단위인 셀간의 특성치들을 주고받을 수 있는 완전연동형 기법을 제시하였다. 결과적으로 SWAT에서 얻어진 일별 함양량과 하천수위를 MODFLOW에 전달하고 MODFLOW에서 하천-대수층간의 물교환량을 계산함으로써 SWAT모형의 지하수 유출이 갖는 개념적 형태의 단점을 개선할 수 있었다. 나아가 MODFLOW만으로는 해결할 수 없는 일별 지하수 함양량의 분포와 SWAT만으로는 계산이 불가능했던 지하수위의 시공간 분포를 완벽히 재생함으로써 두 모형의 한계를 성공적으로 극복할 수 있음을 확인할 수 있었다.

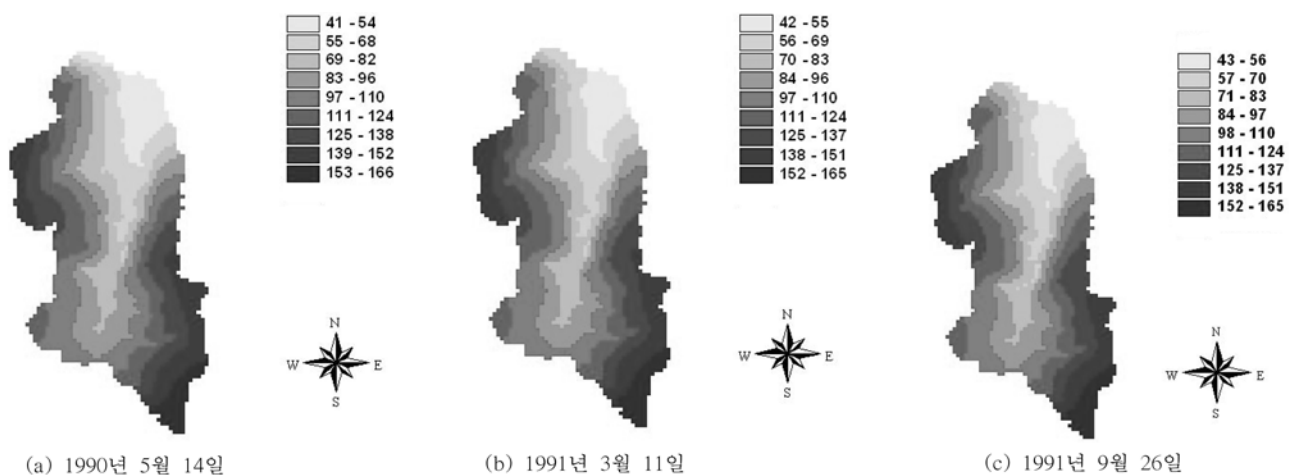


그림 12. SWAT-MODFLOW모형을 이용한 지하수위의 공간분포(단위 El.m)

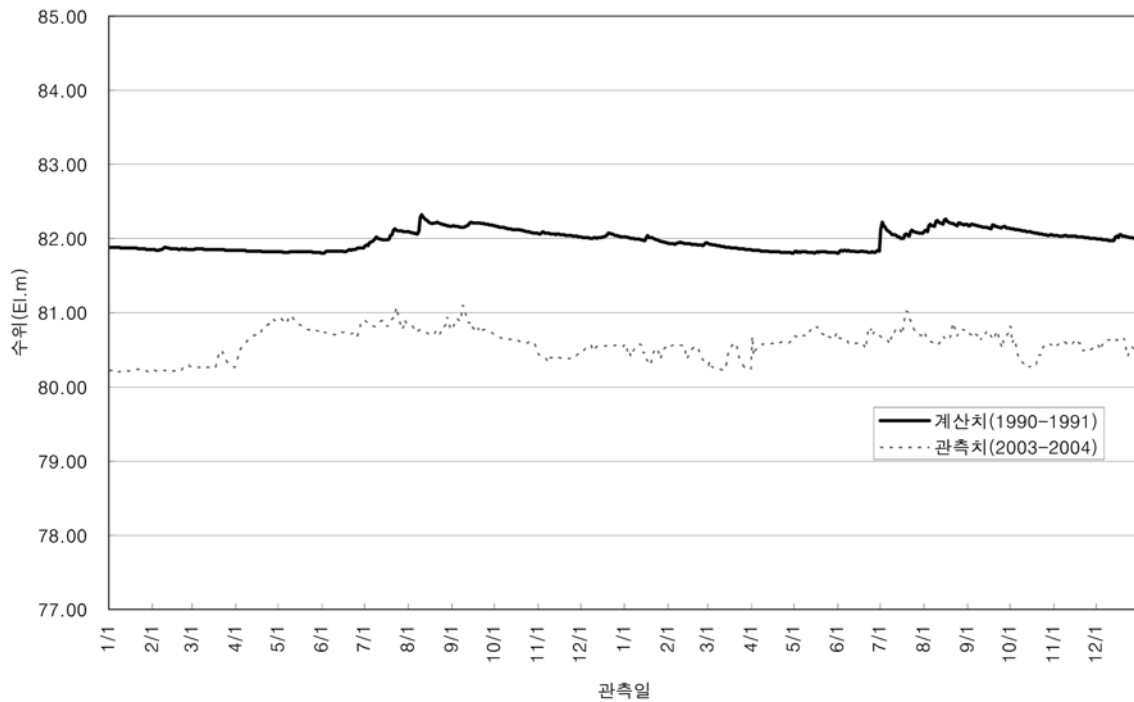


그림 13. SWAT-MODFLOW모형을 이용한 지하수위 시계열

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 2단계 연구비(과제번호 2-2-2) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

김남원, 정일문, 원유승 (2004a) 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제6호, pp. 499-507.

김남원, 정일문, 원유승(2004b) 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제6호, pp. 509-515.

김남원, 정일문, 원유승(2005) 시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정 방안, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권 제7호, pp. 517-526.

한국건설기술연구원 (2006). **지표수 수문성분 해석시스템 개발-2 단계 2차년도 연구보고서**, 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업 (2-2-2).

Arnold, J.G., Allen, P.M. and Bernhardt, G. (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*. Vol. 142. pp. 47-69.

Arnold, J.G., Williams, J.R. and Maidment, D.R. (1995) Continuous-time water and sediment-routing model for large basin.

Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, Vol. 121. No. 2, pp. 171-183.

Freeze R.A. and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater*. Prentice Hall.

Knisel, W.G. (1980) CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. *U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept.* No. 26.

McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988) A Modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey *Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6*, Chapter A1, pp. 528.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. and Papendick, R.I. (1986) Estimating generalized soil-water characteristics from texture, *Soil Sci. Soc. Amer. J.* Vol. 50, No. 4, pp. 1031-1036.

Sophocleous, M.S., Koelliker, J.K. Govindaraju, R.S. Birdie, T. Ramireddygar, S.R. and Perkins, S.P. (1999) Integrated Numerical Modeling for Basin-Wide Water Management: The Case of the Rattlesnake Creek Basin in South-Central Kansas. *Journal of Hydrology*. Vol. 214, pp. 179-196.

Sophocleous, M.S., Perkins, S.P. Stadnyk, N.G. and Kaushal, R.S. (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.

Williams, J.R., Nicks, A.D. and Arnold, J.G. (1985) SWRRB, Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 970-986.

(접수일: 2006.1.24/심사일: 2006.3.13/심사완료일: 2006.8.11)