

SWAT-MODFLOW 결합모형의 토양수-지하수 연결성 개선

Enhancement of Coupling between Soil Water and Groundwater in Integrated SWAT-MODFLOW Model

김 남 원* / 이 정 우** / 정 일 문*** / 원 유 승****

Kim, Nam Won / Lee, Jeongwoo / Chung, Il Moon / Won, Yoo Seung

Abstract

This study presents the effects of temporally varied groundwater table on hydrological components such as surface runoff, evapotranspiration, and soil water content. To this end, the SWAT-MODFLOW model in which the groundwater module of SWAT is replaced with MODFLOW model has been used with a modification to enhance the coupling between the water content in soil profile and the groundwater in shallow aquifer. The variable soil layer construction technique (VSLT) is developed in the present work to represent the direct interaction of soil water and groundwater more realistically, and then the VSLT is incorporated into SWAT-MODFLOW model. In VSLT, when the simulated groundwater table rises within the soil zone, the soil layers below the water table is regarded as a portion of the shallow aquifer, so that those layers are excluded from the initially defined soil zone and are governed by the MODFLOW. From the simulation tests for the Musim river basin, the improved SWAT-MODFLOW model with VSLT is found to correctly evaluate the spatial distributions of overland flow, soil moisture, evapotranspiration according to the groundwater table variation.

keywords : hydrological components, SWAT-MODFLOW, interaction of soil water and groundwater

요 지

본 연구는 지하수위의 시간적인 변화가 지표수 유출, 증발산, 토양 수분 등 다른 수문성분에 미치는 개별적 영향을 평가한 것이다. 이를 위하여 기 개발된 완전연동형 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW 모형에서 토양층의 수분과 얇은 대수층의 지하수의 결합과정을 새롭게 개선하여 토양수분과 지하수간의 보다 현실적인 상호작용이 가능하도록 가변 토양층 구조 기법(The variable soil layer construction technique, VSLT)을 개발, SWAT-MODFLOW에 탑재시켰다. 이 기법에서는 모의된 지하수위가 토양 영역내로 상승하면, 토양층 아래의 지하수위를 얇은 대수층의 일부로 간주함으로써 해당하는 토양층들이 초기에 정의된 토양 영역에서 배제되어 MODFLOW모형의 지배를 받게 된다. 무심천 유역에 대한 시험 적용을 통해 본 연구에서 VSLT를 고려하여 개선한

* 한국건설기술연구원 수문연구실 책임연구원
Researcher fellow, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, 411-712, Korea

** 한국건설기술연구원 수문연구실 선임연구원
Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, 411-712, Korea

*** 교신저자, 한국건설기술연구원 수문연구실 선임연구원
Corresponding Author, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, 411-712, Korea
(e-mail: imchung@kict.re.kr)

**** 국토해양부 한강홍수통제소 하천정보센터 연구사
Researcher, River Information Center of Han River Flood Control Office, MLTM, Seoul 137-049, Korea

SWAT-MODFLOW 모형은 토양층내 지하수위의 변동 영향을 보다 현실적으로 고려할 수 있을 뿐 아니라 지하수와 변동에 따른 지표면 유출, 토양수분, 증발산 등 수문성분의 공간분포에 미치는 영향의 정량적 평가에도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 가변 토양층 구조 기법(VSLT), SWAT-MODFLOW, 토양수-지하수 상호작용

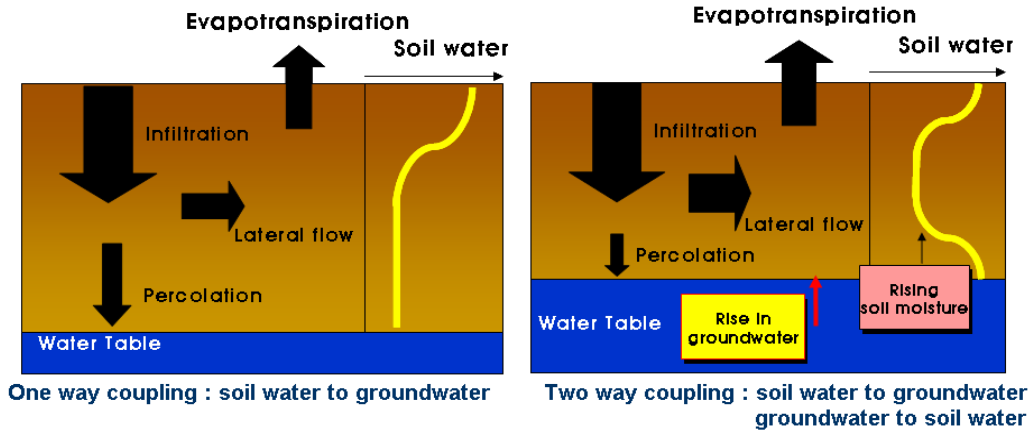
1. 서 론

지표수와 지하수의 통합관리의 중요성이 국내외적으로 강조되기 시작하면서 다양한 형태의 지표수-지하수 통합모형이 개발되었다. 대표적인 통합모형으로 덴마크의 DHI (Danish Hydraulic Institute, 1999)에서 개발된 MIKE SHE 모형, 미국의 HydroGeologic에서 개발된 MOD-HMS 모형, SDI Environmental Service에서 개발된 ISGW 모형(SDI, 1997), Sophocleous *et al.*(1997)에 의해 개발된 SWATMOD 모형, 일본에서 개발된 WEP(Jia *et al.*, 2001) 등 여러 물리적 혹은 개념적 모형이 있으며 수자원의 이용과 관리를 위해 유용하게 활용되어 오고 있다. 이러한 모형들 중에서 SWATMOD 모형(Sophocleous *et al.*, 1997)은 준분포형 유역수문모형인 SWAT과 3차원 지하수 유동해석모형인 MODFLOW가 결합된 모형으로, 미국 Kansas주에서 지하수 과다양수로 인해 하천유출량이 감소하는 현상을 평가하는데 활용되었다(Sophocleous *et al.*, 1999). SWAT과 MODFLOW 각 모형은 공개모형으로 사용자 목적에 따라 코드의 수정이 가능한 이점이 있어 최근 들어 보다 진보된 형태의 순차적 혹은 완전연동형 방식의 SWAT과 MODFLOW의 결합모형이 개발되었다(Sophocleous and Perkins, 2000; Conan *et al.*, 2003; Menking *et al.*, 2003; 김남원 등, 2004a, b; Galbiati *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2008).

Sophocleous and Perkins(2000)는 유역경계와 지하수경계가 일치하며 토양수대와 지하수대간의 상호작용이 없는 경우, 유역경계내에 지하수경계가 위치하며 토양수와 지하수간의 상호작용이 없는 경우, 유역경계내에 지하수경계가 위치하며 토양수와 지하수간의 상호작용이 있는 경우 세 가지로 구분하여 지표수계와 지하수계의 결합방식을 확장하여 SWATMOD 모형을 개선하였다. 특히 세 번째 경우는 지하수위가 토양수대의 근권 깊이 내에 위치하여 얇은 대수층으로부터 토양수대로의 물 이동을 추가로 고려할 수 있게 하였다. 개선된 SWATMOD를 이용하여 북중양 Kansas 주에 있는 Republican River 하류 유역에 적용하여 관개의 영향이 하천수량과 지하수위에 미치는 영향을 분석하였고, 그

의 남중양 Kansas 주의 Rattlensnake Creek 유역, 서중양 Kansas 주의 Walnut Creek 유역에 대해 지표수와 지하수의 상호작용을 모의해석 하였다. Conan *et al.*(2003)은 SWATMOD에 지하수 용질수송모형인 MT3D(Zheng, 1990)를 순차적 구동방식으로 결합하여 프랑스 Brittany의 Coet-Dan 유역의 질산 농도 등 수질을 예측, 평가하였다. Menking *et al.*(2003)과 Menking *et al.*(2004)은 SWAT과 호수 에너지 수치 모형 LEBM(Hostetler and Bartlein, 1990) 그리고 MODFLOW의 LAK2 패키지를 순차적으로 결합하여 호수가 유역의 상당부분을 차지하고 있는 미국 Estancia 유역의 물수지를 분석하였다. 김남원 등(2004a)은 세계 최초로 SWAT과 MODFLOW를 일 단위의 완전연동형 방식으로 결합한 SWAT-MODFLOW 모형을 개발하고, 경안천 유역(김남원 등, 2004b; 김남원 등, 2006), 무심천 유역(김남원 등, 2007; Kim *et al.*, 2008), 미호천 유역(정일문 등, 2007) 등에 결합모형을 적용하여 하천-대수층 상호작용 해석, 지하수 함양의 공간분포 해석, 양수에 의한 지하수계와 하천유량의 변화 해석 등 지표수, 지하수와 관련된 다양한 현안 문제를 해결하는데 유용하게 활용될 수 있음을 입증하였다. Galbiati *et al.*(2006)은 SWAT, MODFLOW, MT3D 모형에 하천수질모형 QUAL2E를 결합한 ISSM(Integrated Surface-Subsurface Model)을 개발하고 이를 이탈리아 Bonello 유역에 적용하여 하천수와 지하수의 상호작용, 영양물 이동을 모의하였다.

이상과 같이 SWAT과 MODFLOW 결합모형은 추가로 다른 모형을 결합하거나 결합방식이 개선되는 등 활용성을 높이는 방향으로 모형이 발전되어 오고 있다. 그러나, Sophocleous and Perkins (2000)의 방식을 제외하고는 기존 SWAT과 MODFLOW 결합모형에서의 토양수와 지하수간의 물 교환 방식은 Fig. 1과 같이 토양수가 침투 과정을 거쳐 지하수대로 유입되는 일방향 구조를 갖고 있어 지하수위 상승 및 하강에 따른 토양수량, 침투량, 중간유출량 등 수문성분량에 미치는 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다. Kim *et al.*(2008)은 SWAT의 HRU와 MODFLOW의 Cell을 연결시키는 인터페이스를 통해 완전연동을 설명하고, 근권역에서 지



(a) before modification

(b) after modification

Fig. 1. Improvement of Interaction between Soil Water and Groundwater

하수위와의 중첩부분을 토양수 영역관점, 얇은 지하수 대 관점의 두 가지 종류로 간주하여 해결하는 방식을 언급하고, 식물뿌리를 통한 대기중 배출방식과 얇은 지하수층이 모세관을 통해 토양층으로 흡수되는 방식으로 구분하여 설명하였다. 한편, Sophocleous and Perkins (2000)가 얇은 대수층에서 토양수대로의 물이동을 고려해서 토양수와 지하수간의 상호작용을 해석하려는 시도를 하였지만, 유역 평균 지하수를 기준으로 지하수와 토양수간의 물 이동을 모사하였기 때문에 유역내 공간적인 지하수위 변화에 의한 영향은 반영하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 공간 뿐만 아니라 시간적인 지하수위의 변화에 따른 토양수의 분포양상 변화를 고려할 수 있도록 Fig. 1(b)와 같이 토양수와 지하수간의 연결 방식을 양방향 구조로 개선하였으며, 개선된 SWAT-MODFLOW 모형을 무심천 유역에 적용하여 개선 효과를 검토하였다.

2. SWAT-MODFLOW 모형의 토양수-지하수 연결성 개선

SWAT-MODFLOW 모형으로 계산된 지하수위가 토양수대내에 위치하였을 경우에 Fig. 2와 같이 토양수대와 지하수대간의 중첩영역(overlapped zone)이 생기게 되는데, 이 영역을 지하수대로 간주하여 이를 기존 토양수대에서 배제하는 가변 토양층 구조 기법(variable soil layer construction technique)을 개발하였다.

이 기법은 지하수위 상승 및 하강에 따라 토양층 개수 및 두께가 변하고, 중첩역의 흐름거동은 SWAT이 아닌 MODFLOW에 의해 지배되도록 계산하는 처리 과정으로 구성된다. 보다 구체적으로 계산처리 과정을 기술하면, 중첩역은 토양수대가 아닌 것으로 간주되었으므로 이 영역내에서는 침투 및 중간유출이 발생하지 않

도록 처리하였고, 중첩역 직상부 토양층 즉, 변경된 최하단부 토양층은 지하수면 위치를 고려하여 토양층 두께를 조정하고 위조점 수분량, 포장용수량, 포화수분량, 현재 토양수분량 등의 토양 물성치는 기존 두께에 대한 변경된 두께의 비에 비례하여 조정되게 알고리즘화 하였다. 특히 변경된 최하단부 토양층은 아래 지하수가 인접하여 존재하므로, 토양층이 포화될 때까지 연직방향으로의 물 이동이 제한되게 하였고 토양수대가 보수할 수 있는 최대 능력을 초과하게 되면 초과분만 지하수대로 침투되도록 처리하였다.

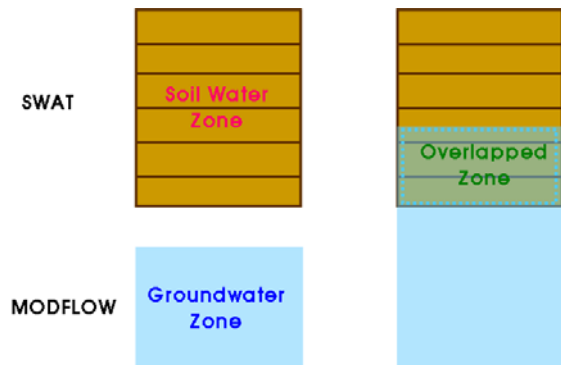


Fig. 2. Occurrence of Overlapped Zone between Soil Water Zone and Groundwater Zone

한편, 지하수면이 토양수대에 위치한 경우는 지하수 증발산이 기작되도록 MODFLOW의 증발산 패키지(EVT Package)와 연동되도록 코딩하였다. MODFLOW EVT 패키지는 포화대수층으로부터 지하수가 직접 대기로 증발하거나 식물에 의해 증산되는 현상을 모사하기 위해 고안된 것으로서 지하수면이 보통 지표면으로 설정되는 ET표면보다 높거나 같은 지점에 위치해 있을 경우에는 보통 잠재증발산량(PET)으로 설정되는 최대증발산량만큼 지하수면으로부터 증발산량

이 발생하고, 사용자에 의해 지정된 식물뿌리대가 서식하는 지점인 고엽심도(extinction depth) 아래로 지하수면이 하강하면 지하수면으로부터 지하수 증발산이 일어나지 않는 것으로 처리하고 있다. ET표면과 고엽심도 사이에서는 지하수면고에 따라 지하수 증발산량이 선형으로 감소하게 된다. 본 연구에서는 SWAT의 Penman-Monteith 방식으로부터 계산된 잠재증발산량에서 식물의 엽면적이나 토양수대로부터의 증발산을 감한 값을 지하수 증발산 계산을 위한 최대증발산량 값으로 설정하였고, 고엽심도는 토양층 레이어의 총두께로 지정하였다. 잠재증발산량과 관련, 미국 Florida Institute of Phosphate Research(FIPR)에서는 EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발된 준분포형 유역수문모형 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)와 지하수 유동해석모형 MODFLOW를 결합한 FHM (FIPR hydrological model) 모형을 개발하였는데, 이 모형에서도 상기와 같은 지하수 증발산량 계산 방식을 취하고 있다. HSPF와 MODFLOW 결합모형의 증발산 모델 개념화는 Ross *et al.*(2005)에 자세하게 제시되어 있다.

이상과 같이 지하수대와 토양수대간 중첩역 발생시 메카니즘 수정사항을 정리하면 다음 Table 1과 같다.

SWAT 모형은 HRU를 기작의 최소단위로 하고 있고 MODFLOW 모형은 3차원 셀 구조를 기반으로 하고 있으므로, 계산 지하수위가 토양수대내에 위치하는 지

를 판별하기 위해서 Fig. 3과 같이 셀별 지하수위를 평균 과정을 거쳐 HRU별 지하수위로 환산하여 토양층 바닥고와 비교하는 루틴을 탑재하였다.

Table 2에는 토양수-지하수 결합 알고리즘을 정리하여 단계별로 나타내었다.

3. 무심천 유역에 대한 토양수-지하수 연결성 개선 효과 분석

3.1 대상유역 및 모형의 입력자료

SWAT-MODFLOW 모형의 토양수-지하수 연결성 개선 후의 효과를 분석하기 위하여 김남원 등(2007)이 기존에 분석했던 무심천 유역에 개선된 모형을 적용하였다. 무심천 유역은 Fig. 4와 같이 동고 서저형으로 유역면적이 약 179km², 유로연장이 약 35km이며, 모형의 구동을 위해서 소유역을 34개로 구분하였다. 지표수 및 지하수 관측소의 위치도 Fig. 4에 함께 도시하였다.

(1) SWAT 입력자료

모형의 입력자료인 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등의 기상자료는 무심천 유역 내에 위치한 청주기상대의 자료를 이용하였고, 수문자료로서 하천유출량 자료는 청주수위표의 자료를 이용하였다. 대상유역에 대하여 정밀한 분석을 위해서 Fig. 4와 같이 100m×100m의 DEM을 구축하여 활용하였다.

Table 1. Modification of Hydrological Mechanism for Soil Water-Groundwater Interaction

Domain	Mechanism
within overlapped zone	<ul style="list-style-type: none"> - no vertical and lateral subsurface flows - groundwater evapotranspiration
soil water layer on the overlapped zone	<ul style="list-style-type: none"> - no vertical flow - adjustment of layer depth - adjustment of wilting point, field capacity, water content

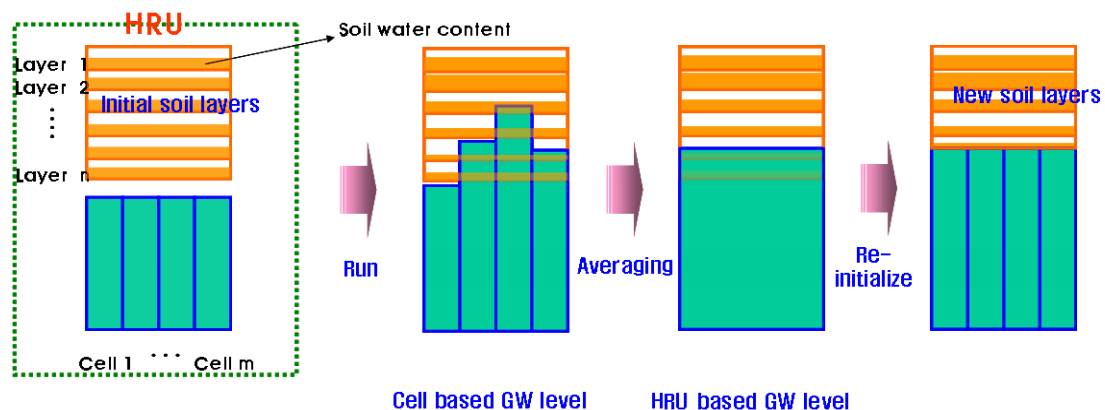


Fig. 3. Time Variant Soil Layer Construction Method

Table 2. Algorithm for Soil Water and Groundwater Interaction

Step 1. Initialize surface water and groundwater parameters
Step 2. Estimate HRU based hydrological components such as surface flow, evapotranspiration, lateral flow, percolation, groundwater recharge by SWAT
Step 3. Convert HRU based groundwater recharge to cell based one
Step 4. Impose cell based groundwater recharge to MODFLOW upper boundary condition
Step 5. Compute cell based groundwater level by MODFLOW
Step 6. Convert cell based groundwater level to HRU based by averaging
Step 7. Compare HRU based groundwater level and the bottom of each soil layer
Step 8. Start mechanism of Table 1 when HRU based groundwater level is within root zone
Step 9. Calculate maximum groundwater uptake for input data of MODFLOW EVT package by subtracting actual evapotranspiration from potential evapotranspiration simulated by SWAT
Step 10. Calculate groundwater uptake by linearly interpolating maximum groundwater uptake according to HRU based groundwater level (MODFLOW EVT package starting)
Step 11. Repeat Step 2 to Step 11 on a daily basis

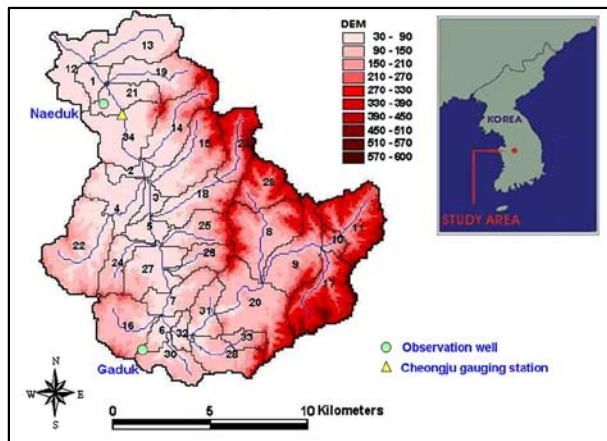


Fig. 4. DEM, Subbasins, Stream Network, and Gauging Stations for the Musim River Basin (Kim *et al.*, 2008)

Fig. 5는 사용한 토지이용도로서 15개의 토지이용현황으로 구분되었고, 산지가 51%, 농경지가 31%, 도시화 지역이 15%로 분포되어 있다. Table 3에 토지이용별 면적을 기록하였다. 토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다.

Fig. 6은 무심천 유역에 대한 정밀토양도를 DEM과 동일한 공간해상도로 가공한 것으로서, 토양통의 종류가 60개가 분포하였다. 각 토양통에 대한 면적은 Table 4와 같다. 토양의 물성치는 농업과학기술원과, 농업토양 정보시스템 등의 자료를 이용하였다.

(2) MODFLOW 입력자료

지하수 유동해석을 위하여 격자크기를 100m로 하여

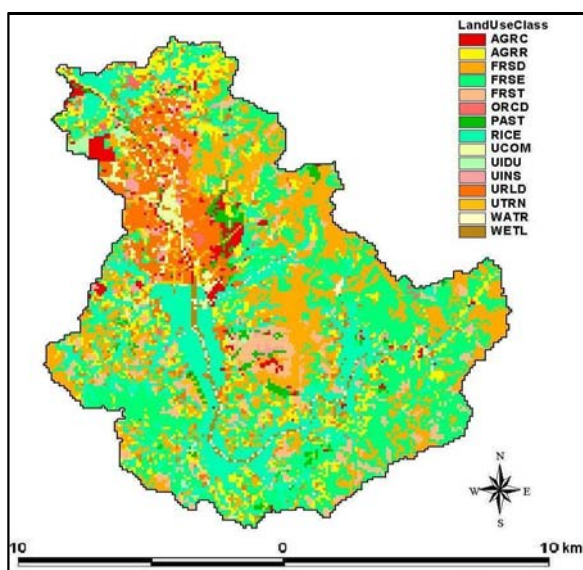


Fig. 5. Land Use Map of the Musim River Basin (Kim *et al.*, 2007)

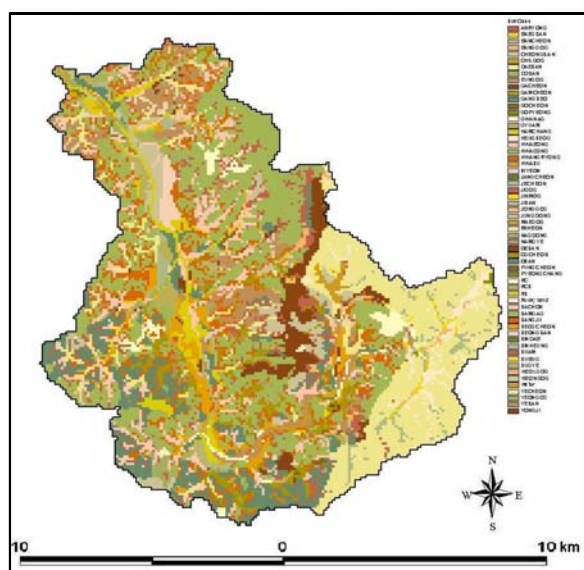


Fig. 6. Soil Map of the Musim River Basin (Kim *et al.*, 2007)

Table 3. Land Use Classes for Musim River Basin

Land use Item	Discription	Area (km ²)	Percentage (%)
AGRC	Agricultural Land-Close-grown	4.74	2.39
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	18.42	9.29
FRSD	Forest-Deciduous	38.80	19.58
FRSE	Forest-Evergreen	46.63	23.852
FRST	Forest-Mixed	12.68	6.40
ORCD	Orchard	0.71	0.36
PAST	Pasture	3.95	1.99
RICE	Rice	38.18	19.26
UCOM	Commercial	3.52	1.78
UIDU	Industrial	1.40	0.70
UINS	Institutional	3.34	1.68
URLD	Residential-Low Density	17.77	8.96
UTRN	Transportation	4.46	2.25
WATR	Water	1.79	0.90
WETL	Wetlands-Mixed	1.84	0.93

223행, 214열, 3층의 모델 격자를 구성하였다. 대상지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 2개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면대수층으로 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 충적층 및 암반층의 공간적인 분포는 해당 유역내 포함되는 국가지하수 관측공, 지자체 지하수 관측공, 해당 지역 내 시추 및 착정 조사자료 등을 이용하여 각 층의 바닥고를 크리깅 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰다. 크리깅 결과를 토대로 상위대수층(제1층)의 두께는 5m - 18m로, 하위대수층(제2층)의 두께는 48m - 145m로 결정하였으며, 지반고로부터 각층의 두께를 감하여 각층의 저면고도를 생성하여 모형의 입력자료로 활용하였다. 굴착 깊이까지의 충적층 및 암반층의 바닥고는 지층 구성별 심도로부터 산정할 수 있으나, 굴착심도 이상의 암반의 분포심도는 명확하지 않은 상황이므로 그 두께 및 각종 수리지질인자들의 값은 가정에 의존하였으며 모델을 수행하는 과정에서 이들을 보정의 인자로 사용하였다. 모델링을 위한 대수층의 수리전도도로서 제 1층의 수리전도도는 국가지하수관측망 2개소에서 제시한 값과 양수시험을 통하여 얻은 10개소의 측정값을 이용하여 크리깅을 통해 수리전도도 분포도를 작성하여 모형의 입력자료로 이용하였고, 제 2층의 수리전도도는 국가지하수관측망 2개소, 양수시험공 20개소 측정값을 역시 크리깅을 통해 격자별 수리전도도 값을 보간 생성하였다. 제 3층의 경우 수리전도도에 관한 자료가 없으므로 심도가 깊은 것을 고려하여 제 2층의 평균 수리전도도와 같거나 그 이하의 값을 부여하였다. 모델에 입력한 각 층의 수리전도도는 1층 충

적층에 대해서는 1.3 - 39 m/일, 2층 암반층에 대해서는 0.01 - 2.2 m/일의 값이며 Fig. 7에 공간분포도를 나타내었다. 또한, 수리전도도 입력시 이방성에 관한 자료는 전무하므로 수평방향으로 수리전도도는 등방성인 것으로 가정하였다. 수직 수리전도도는 전 구간에 대해 수평수리전도도의 1/10에 해당하는 것으로 가정하여 적용하였다(건설교통부, 2007).

경계조건으로 유역경계를 기준으로 바깥쪽은 무흐름으로 간주하여 분수령을 따라 불투수경계로 설정하였다. 지하수 함양이 모사영역 내에서 수직 방향의 모든 최상위 활성 셀에 함양이 일어나도록 함양플럭스 경계조건을 부여하였다. 함양량 값은 SWAT으로부터 일 단위로 모의 되어 MODFLOW의 지하수 활성셀에 자동으로 입력되게 하였다. 하천경계는 지하수 유출입이 일어나는 무심천 분류와 제 1지류를 하천셀로 지정하였다. 이 하천셀에서 시간중속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위 차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다.

3.2 모형의 적용 및 개선 효과 분석

1999년부터 2005년까지 7년간 모의를 수행하였으며, 초기 2년은 모형의 안정화를 위한 워밍업 기간으로 설정하였다. 청주수위관측소에서의 일단위 관측유량과 일 단위 모의유량간의 비교, 유역내 관측지하수위와 모의 지하수위의 시계열 및 공간분포도의 비교를 통하여 모형의 검증을 수행하였으며, 이에 대한 자세한 내용은 기 발표된 논문(김남원 등, 2007)과 보고서(한국건설기

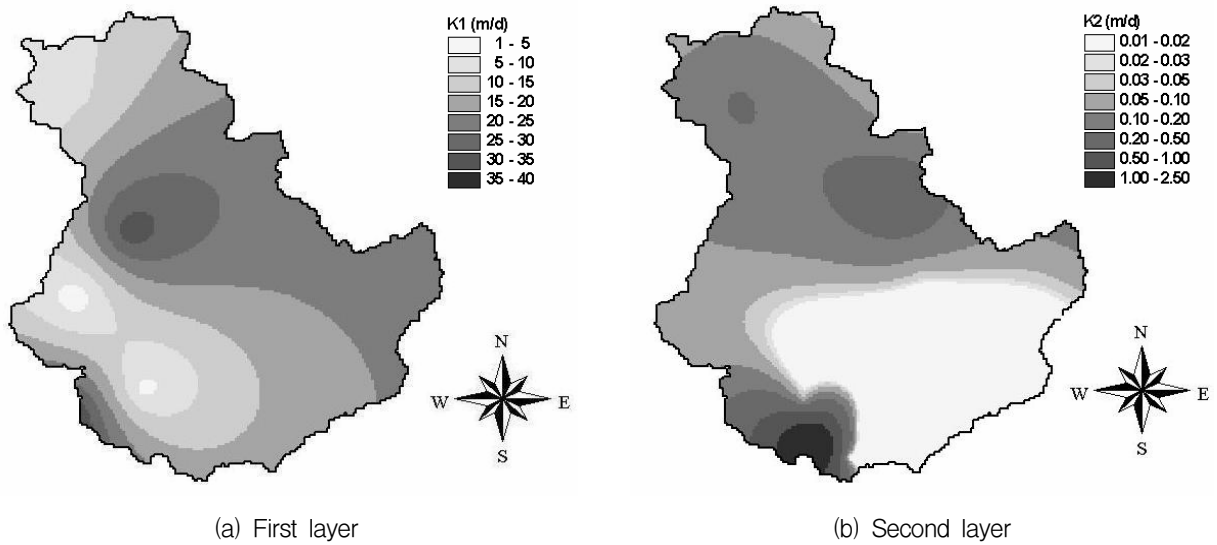


Fig. 7. Spatial Distribution of Hydraulic Conductivity

술연구원, 2007)에 수록되었으므로 검증 절차 기술은 본 고에서는 생략하였다. 한편, 토양수-지하수 연결구조의 개선 전후의 모의 결과의 상대 비교를 위해서 개선 후 매개변수 검토정 값은 개선 전과 동일한 값을 사용하였다.

Fig. 8은 토양수-지하수 연결성 개선 전후의 유역 출구부에서의 유출수문곡선을 나타낸 것이다. 개선 후 유출량은 개선 전에 비해 감수부는 작게 첨두부는 다소 크게 산정된 것을 알 수 있는데 이는 지하수위로 인한 각 수문성분량의 변화가 반영된 결과이다. Fig. 9에 관측 유출량과 모의 유출량을 비교하여 도시하였다. 2002년 이전에 비해 강우량이 많아 유출량과 함양량이 상대적으로 컸던 2003년 이후가 개선 후의 효과가 분명하게

나타나고 있다. 관측치와 모의치간 결정계수가 개선 전에 0.718, 개선 후에는 0.733으로 모의 결과의 정확도가 증가하였다.

지하수위로 인한 수문성분량의 변화를 살펴보기 위해서 지표면 유출성분량, 증발산량, 토양수분량 등을 그리드별로 출력하였고 Figs. 10 ~ 12와 같이 월별 공간적인 분포도를 도시하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 개선 전후의 지표면 유출량과 증발산량(2003년 9월)의 공간적 분포도로서 모형 개선 후에는 하천 저지대에서 지하수 상승의 영향으로 지표면 유출 및 증발산 발생량이 다소 증가한 것을 확인할 수 있으며, Fig. 12과 같이 토양대의 포화도(2003년 9월)를 보면 개선 전, 후에 따른 확연한 차이를 볼 수 있다.

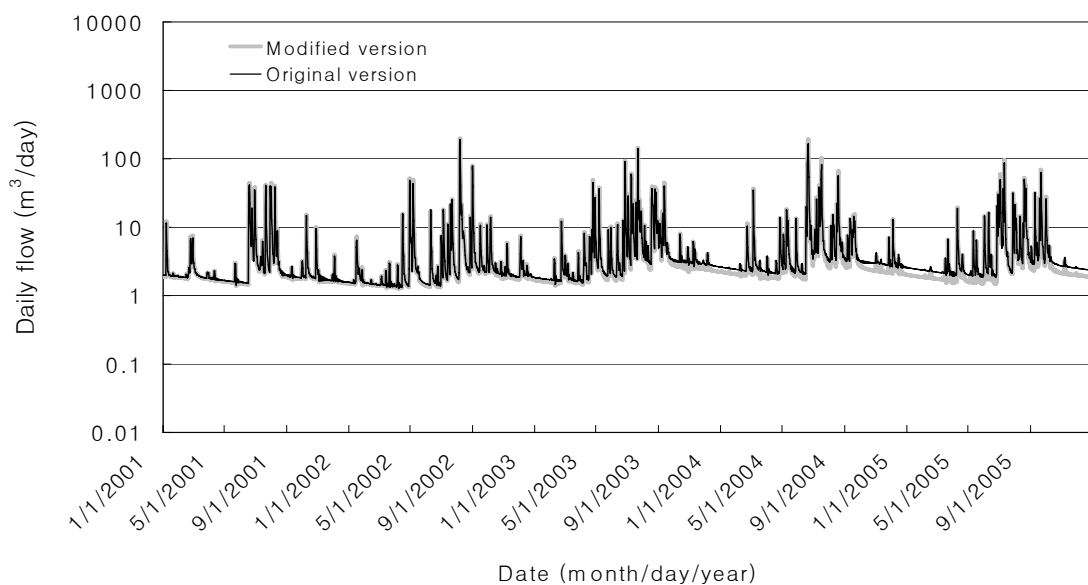
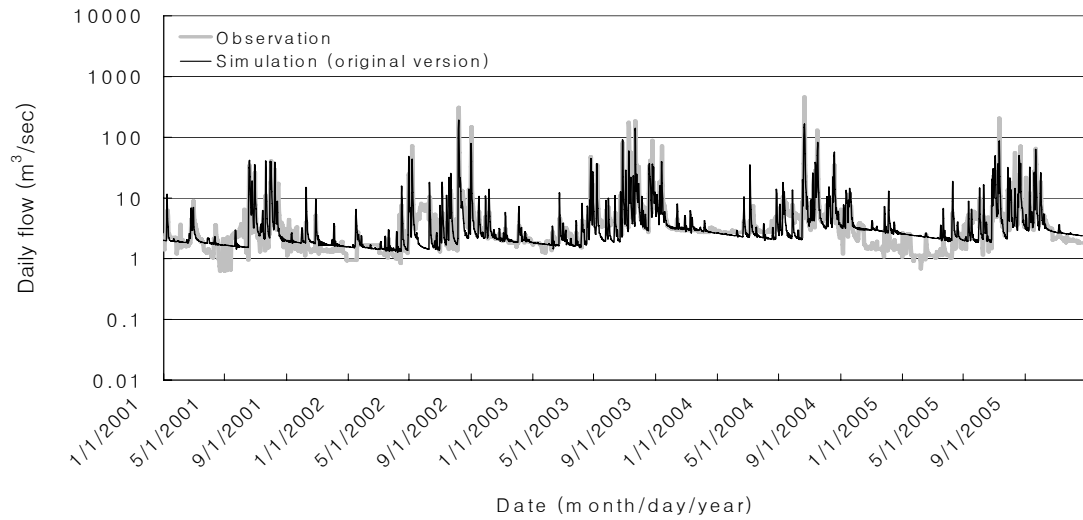
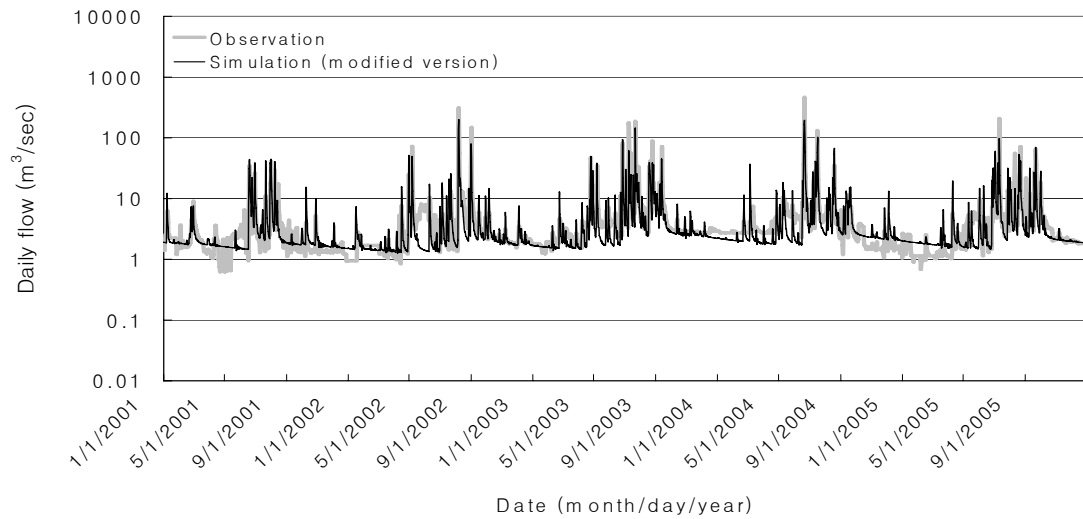


Fig. 8. Simulated Daily Streamflow

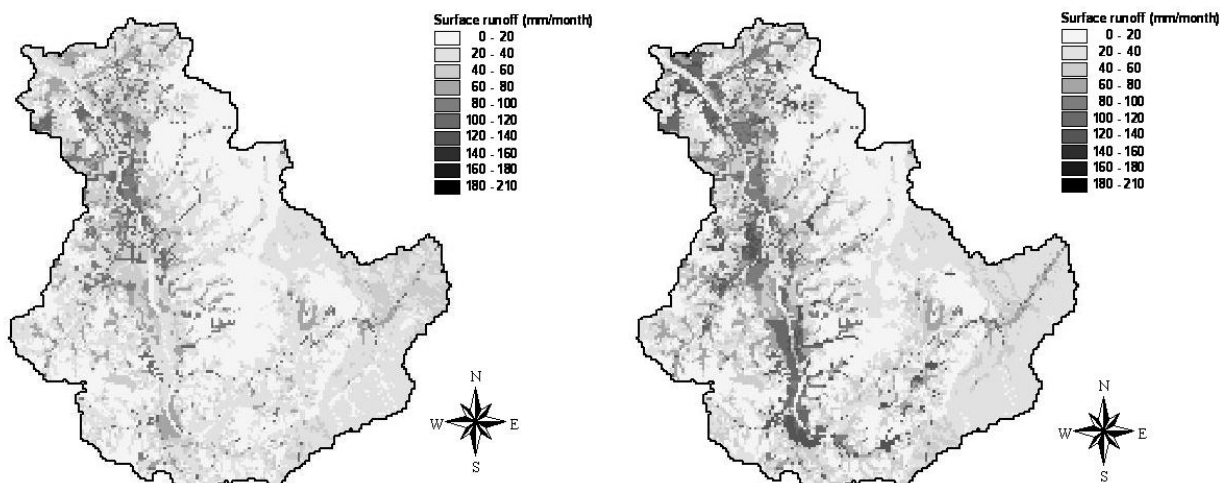


(a) before modification



(b) after modification

Fig. 9. Comparison of Simulated and Observed Daily Streamflow



(a) before modification

(b) after modification

Fig. 10. Spatial Distribution of Surface Runoff(Sep, 2003)

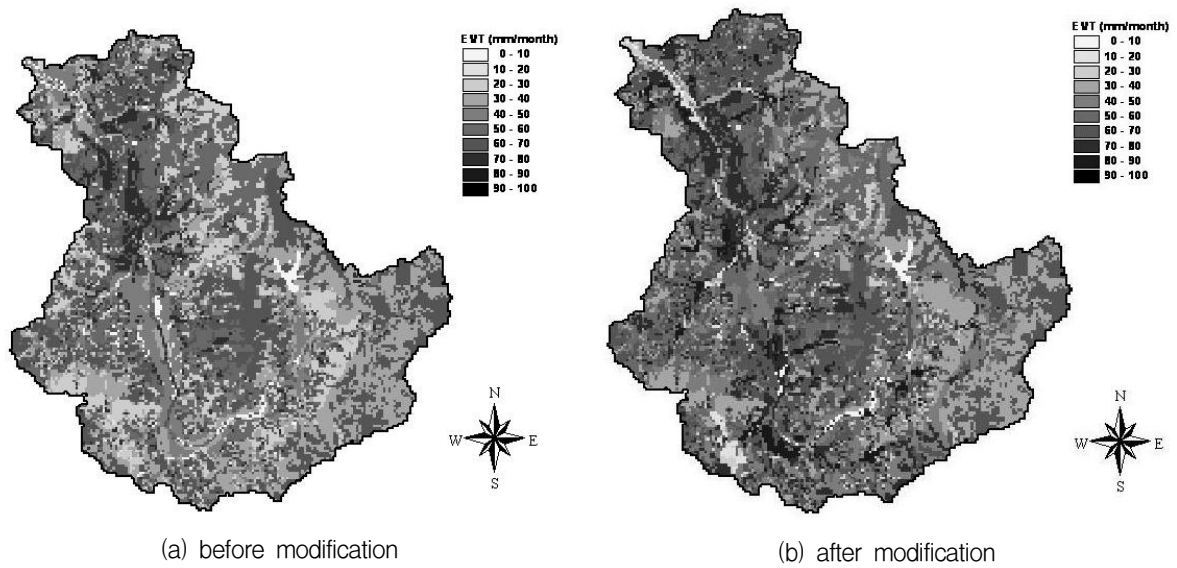


Fig. 11. Spatial Distribution of Evapotranspiration(Sep, 2003)

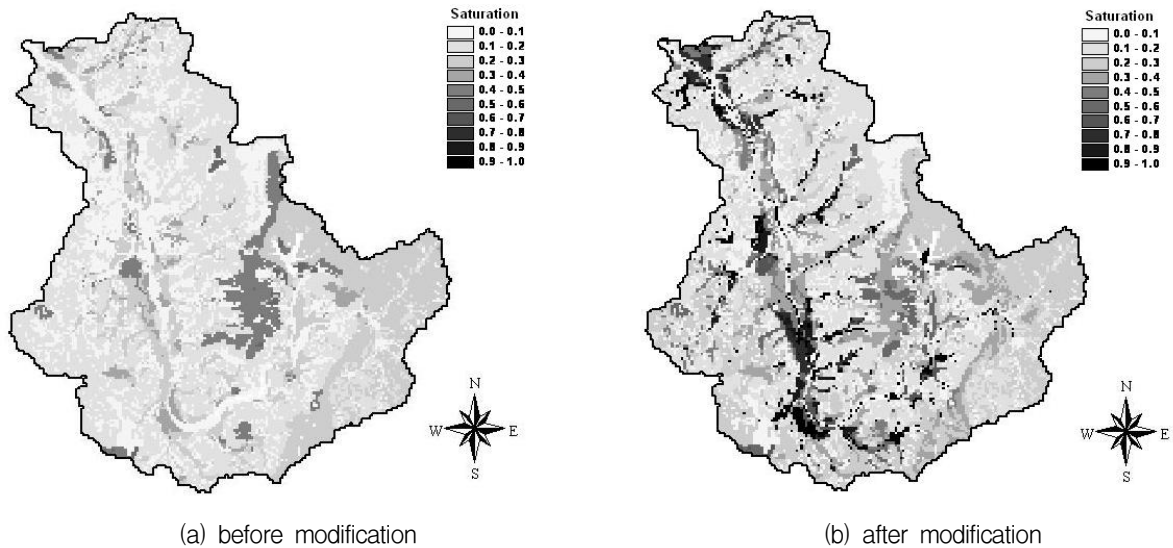


Fig. 12. Spatial Distribution of Degree of Soil Water Saturation(Sep, 2003)

하천변에 위치한 735번 HRU에 대해 모의 1,000일째 개선 전후의 토양층별 포화도를 Fig. 13에 나타내었다. 여기서 포화도는 토양층별 계산 토양수분량을 해당 층의 포화수분량으로 나눈 값이다. Fig. 13(a)는 개선 전의 결과로서 토양층이 6개로 구분되었으며 각 토양층의 포화도를 보여주고 있다. Fig. 13(b)는 개선 후의 포화도로서 지하수위 상승의 영향으로 토양층이 기존의 5개 층으로 변경되었으며(6번째 층은 지하수대로 간주), 침투량이 제한됨에 따라 토양수가 적체되어 하부 토양층의 포화도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다른 하천변 셀에서도 유사한 양상을 나타내었다.

Fig. 14는 무심천 유역에 대하여 2002년부터 2005년까지 모의된 수문 성분량의 개선 전, 후의 크기를 비교

도시한 것으로 침투량의 제한으로 지하수유출(Groundwater)이 작아지고 토양수분량 증가에 따라 지표면 유출(Surface runoff)이 증가한 것을 알 수 있다.

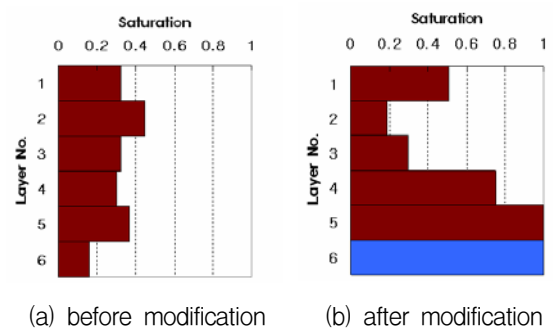


Fig. 13. Soil Water Saturation for HRU No. 735

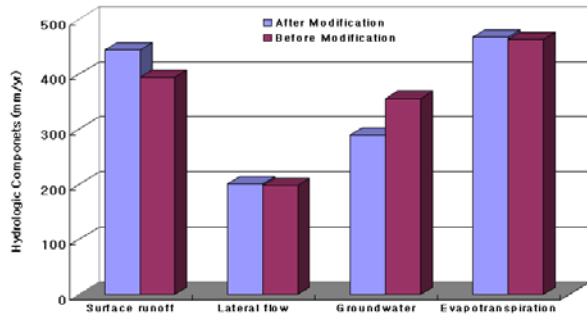


Fig. 14. Hydrological Components before and after Modification

4. 결 론

지금까지 수행된 SWAT과 MODFLOW결합해석 연구 중 대부분은 토양수가 침투과정을 거쳐 지하수로 유입되는 일방향 구조를 갖고 있어 지하수위 상승 및 하강에 따른 토양수량, 침투량, 중간유출량 등 수문성분량의 변화를 고려하기에는 제한이 있다. 따라서 본 연구에서는 지하수위 변화에 따른 토양수의 분포양상 변화를 고려할 수 있도록 토양수-지하수간의 연결 구조를 양방향으로 개선하여 두 영역간의 연결성을 강화하였다. 개선된 모형을 청주 무심천 유역에 적용하여 얻은 주요 성과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지하수위가 상승할 경우 토양대와 지하수대간의 중첩 영역이 생기게 되는데, 이 중첩 영역을 지하수대로 간주하여 영역 내 흐름거동이 지하수 유동메커니즘을 따르는 토양수-지하수 결합루틴을 새롭게 제시하였다.
- 2) 결합루틴은 지하수 상승, 하강에 따라 토양수대의 두께가 변하는 가변 토양층 방식(variable soil layer construction technique)으로 계산을 수행할 수 있도록 코드를 구성하였다.
- 3) 지하수위가 토양수대 최하단부보다 높게 위치해 있는 경우 토양수대로부터 지하수대로의 침투량이 제한됨에 따라 토양수가 적체되어 하부 토양층의 포화도가 증가하는 것을 구현할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 개선된 SWAT-MODFLOW 모형을 무심천 유역에 적용하여 토양수와 지하수간의 상호작용을 해석하고 하천저지대와 같이 지하수위 상승지역에서의 수문성분량의 분포를 보다 현실적으로 구현할 수 있음을 입증하였다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

- 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 (2006). "완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp.481-488.
- 김남원, 정일문, 이정우, 원유승 (2007). "지표수-지하수 통합모형을 이용한 무심천 유역의 수문과정 해석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제5호, pp. 419-430.
- 정일문, 김남원, 이정우 (2007). "유역 유출과정과 지하수위 변동을 고려한 분포형 지하수 함양량 산정방안." **한국지하수토양환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, 제12권, 제5호, pp. 19-32.
- 한국건설기술연구원 (2007). 지표수 수문성분 해석시스템 개발, 21세기 프론티어 연구사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업 2단계 연구보고서.
- Conan, C., Bouraoui, F., Turpin, N., Marsily, G. de., and Bidoglio, G. (2003). "Modeling flow and nitrate fate at catchment scale in Brittany (France)." *J. Environ. Qual.*, Vol. 32, No. 6, pp. 2026-2032.
- Council, G.W. (1999). *A Lake Package for MODFLOW (LAK2): Documentation and User's Manual, Version 2.2*, HSI Geotrans, Sterling, Virginia, USA.
- Galbiati, L., Bouraoui, F., Elorza, F.J., and Bidoglio, G. (2006). "Modeling diffuse pollution loading into a Mediterranean lagoon: Development and application of an integrated surface-subsurface model tool." *Ecol. Model.*, Vol. 193, No. 1-2, pp.

- 4-18.
- Hostetler, S.W., and Bartlein, P.J. (1990). "Simulation of lake evaporation with application to modeling lake level variations of Harney-Malheur Lake, Oregon." *Water Resources Research*, 26, pp. 2603 - 2612.
- Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y., and Suetsugi, T. (2001). "Development of WEP model and its application to an urban watershed." *Hydrological Processes*, 15, pp. 2175-2194.
- 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, No. 1-2, pp. 1-16.
- Menking, K.M., Syed, K.H., Anderson, R.Y., Shafike, N.G., and Arnold, J.G. (2003). "Model estimates of runoff in the closed, semiarid Estancia basin, central New Mexico, USA." *Hydrological Science Journal*, Vol. 48, No. 6, pp. 953-970.
- Menking, K.M., Anderson, R.Y., Shafike, N.G., Syed, K.H., and Allen, B.D. (2004). "Wetter or colder during the Last Glacial Maximum Revisiting the pluvial lake question in southwestern North America." *Quaternary Research*, 62, pp. 280 - 288.
- Perkins, S.P., and Sophocleous, M. (1999). "Development of a comprehensive watershed model applied to study stream yield under drought conditions." *Groundwater*, Vol. 37, No. 3, pp. 418-426.
- Ross, M., Geurink, J., Said, A., Aly, A.H., and Tara, P. (2005). "Evapotranspiration Conceptualization in the HSPF-MODFLOW Integrated Models." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 5, pp. 1013-1025.
- SDI Environmental Service, Inc. (1997). *Water Resource Evaluation and Integrated Hydrologic Model of the Central Northern Tampa Bay Region*, Final Report ISGW/CNTB Model SDE Project No. WCF-690, Prepared for West Coast Regional Water Supply Authority, Clearwater Florida.
- 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.
- 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. and Perkins, S.P. (2000). "Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas." *Journal of Hydrology*, Vol 236, pp. 185-201.
- Zheng, C. (1990). *MT3D, a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*. USEPA, Robert S. Kerr Environ. Res. Lab., Ada, OK.
- (논문번호:08-88/접수:2008.08.06/심사완료:2008.11.28)