

완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형

(II) 모형의 평가

The Development of Fully Coupled SWAT-MODFLOW Model

(II) Evaluation of Model

김 남 원* / 정 일 문** / 원 유 승***

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

Abstract

In this study, comprehensive evaluation on the fully coupled SWAT-MODFLOW model is performed. Since combined model can consider the spatially varied daily recharge rate, groundwater modeling would be greatly enhanced. Also, combined model has been able to generate the distribution of groundwater heads with time, surface-subsurface flow modeling would be greatly advanced. River-aquifer interaction is well established in the combined model considering two-way interactions. Consequently, the reliability of groundwater discharge and total runoff of watershed would be greatly enhanced when combined model is used.

Keywords : SWAT, MODFLOW, Groundwater recharge, River-Aquifer Interaction

요 지

본 연구에서는 국내에서 독자적으로 개발한 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형을 평가하였다. 결합모형은 함양량의 시공간적 변동성을 반영할 수 있어 기존 지하수 모델링에 있어서 함양량을 현실적으로 고려하지 못했던 부분이 크게 개선될 것으로 판단된다. 또한 SWAT의 지하수 모형성분은 집중형이므로 분포형 매개변수의 입력이 어렵고 지하수위의 변화등을 고려하지 못하나 결합모형은 지하수부분에 MODFLOW모형을 탑재시킴으로써 완벽한 시간단계별 지하수위 분포를 재생해 낼 수 있었다. 마지막으로 하천네트워크-대수층간의 상호작용에 있어서 SWAT은 일방향만을 고려하나 결합모형은 양방향 상호작용을 모두 고려할 수 있어 실제적인 하천-대수층간의 경계유량을 고려할 수 있어 유역내 기저 유출량 및 총 유출량의 신뢰성이 크게 증대될 것으로 기대된다.

핵심용어 : SWAT, MODFLOW, 지하수 함양, 하천-대수층 상호작용

1. 서 론

최근 우리나라에서도 수자원개발 적지의 감소 및 수

질 악화로 인해 장래의 수자원부족을 극복하는 차원에서 지표수-지하수의 연계운영에 관한 관심이 높아지고 있다. 우리나라는 용수공급체계에서 지표수가 중요한

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(E-mail: nwkim@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원
Senior Researcher, KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(E-mail: imchung@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(E-mail: yswon@kict.re.kr)

비중을 차지하고 있으며 지하수는 제한된 비중을 가지고 일부 지방자치단체에서만 보조적인 수자원으로 사용되고 있다. 실제로 우리나라 지하수 관리의 기본원칙은 지하수의 보전·관리를 우선으로 하고, 철저한 사전조사 및 평가를 거쳐 부존특성과 이용실태를 고려하여 지속가능토록 체계적으로 개발·이용하는 것이다(건설교통부, 2002).

한편, 우리나라에 비해 수원(水源)으로서의 지하수 역할이 큰 미국에서는 지하수 이용에 관한 많은 시행착오를 거친 후에 대수층으로 함양되는 체적은 대수층으로부터 배제되어도 지속가능성이 유지된다고 보는 안전채수량 개념에 대한 재고가 이뤄지고 있다. 다시 말해서 대수층의 지속가능한 산출량은 함양량보다 훨씬 적은 양이어야 한다는 것을 인식하게 됐으며 좀 더 광범위한 지속가능성 측면에서 적절한 수질과 수량을 가진 물은 하천과 샘, 습지 그리고 지하수 의존형 생태계를 유지하는데 필수조건이므로 이러한 환경을 예측하고 생태학적인 문제를 정량적으로 평가하는 연구를 시급히 도입하고 있다. 구체적으로 핵심적인 제어변수들(함양량, 수문순환성분)의 시공간적 변동성과 불확실성 때문에 지속가능성의 평가는 지속적인 모니터링과 분석, 우선순위 등을 포함한 동적이고 반복적인 과정으로 이해되어야 한다고 주장한다.

현재 우리나라는 장래의 수자원 부족을 극복하기 위한 대안으로 지표수와 지하수의 연계운영방안을 모색하고 시점이다. 이를 위해서는 지표수와 지하수의 물순환을 유역단위에서 파악할 수 있는 해석기술을 통해 다각적인 지표수-지하수의 연계운영 시나리오가 제시되어야 하며 이때 필수적인 것이 지표수-지하수의 결합해석 모형이다.

본 연구는 준분포형 유출모형인 SWAT(Arnold 등, 1993; Arnold 등, 1995)과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1988)를 국내에 적용시키기 위해 독자적인 방법으로 완전 연동시킨 결합모형 SWAT-MODFLOW(김남원 등, 2004)를 실제 유역을 대상으로 구동하여 평가하는데 그 목적이 있다.

2. 결합모형의 개요

2.1 결합모형의 개념

SWAT모형과 MODFLOW모형의 연계를 처음으로 시도한 연구는 Sophocleous 등(1997)에 의해 이루어졌다. SWATMOD개발의 핵심은 SWAT과 MODFLOW 코드를 각각 수정하는데 있으며, 두 모형을 연결시키는 부프로그램이 개발되었다. 부프로그램 HYDBAL은

SWAT과 MODFLOW간의 데이터를 주고 받으며 SWAT의 물수지를 계산한다. MODSWB은 SWAT의 수문학적 유역을 MODFLOW의 격자와 연결시켜주며 SWAT의 플럭스를 MODFLOW의 유량으로 전환시켜 준다. SWATMOD는 두 개의 모드를 가지고 구동되는데 그 첫 번째는 MODFLOW가 SWAT모형의 부프로그램으로 처리되는 방식으로 각 대수층 시간단계의 마지막에서 호출되는 것이다. 다른 한 가지는 SWAT과 MODFLOW가 연속적으로 구동되며 수행되는 경우로 분리된 수문평형 데이터 파일을 생성하는 방식이다. 그러나 이 모형은 비공개 코드이며 순차적으로 연계한 적용결과만이 제시되고 있어 실제적인 완전연동의 결과는 확인할 수 없었다(Sophocleous 등, 1999).

본 연구에서 개발된 모형은 MODFLOW가 SWAT내에 포함되는 형식(embedded type)으로 결합되었으며 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT모형으로부터 추출하여 MODFLOW모형에 입력시키고, 하천과 대수층의 상호작용을 모의하기 위해 MODFLOW의 하천(river)패키지를 사용하였다. 그림 1은 본 연구에서 제시하고 있는 결합모형의 개념도이다.

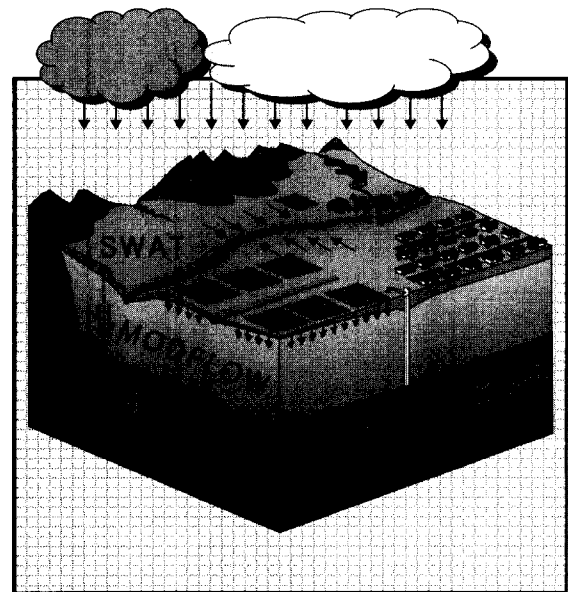


그림 1. 결합모형의 개념도

다음은 모형 평가를 위해 명확하게 구분해야 할 용어의 정의이다.

- 단위기간과 스트레스 기간 또는 단위기간 루프와 스트레스 기간 루프 : 모형의 모의 시간 간격을 의미하며, 스트레스 기간은 MODFLOW에서 이용된 stress의 간격으로 두 용어는 같은 의미임.
- 하도(reach), 하천(river) : 하도는 SWAT에서 쓰

이는 용어로 각각의 소유역은 한 개의 하도를 가지고 있다. 하천은 MODFLOW에서 이용되는 용어로 river package를 의미한다. MODFLOW에서 하천은 하천을 표시하는 격자를 의미하고, SWAT에서 하도는 소유역내의 하천을 의미한다.

- 유역(watershed), 소유역(subbasin), HRU : SWAT에서 쓰이는 용어로 HRU는 최소 수문응답 단위로 HRU가 합쳐져 1개의 소유역이 형성되고, 소유역이 합쳐져 유역을 형성한다.
- HRU 분포도 : 본 연구에서 사용하는 용어로 HRU의 공간분포를 나타내는 분포도. 이는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 HRU에 특정 고유번호로 부여한 격자 분포도임. 특정 고유번호는 SWAT의 HRU 번호.

2.2 결합모형의 입력자료

Arcview interface SWAT 모형을 실행하면 project 디렉토리에 [scenarios]와 [watershed]라는 두 디렉토리가 생성된다. 이 중 [scenarios] 디렉토리에는 SWAT이 실행되는데 필요한 입력자료와 출력자료 등이 있으며, [watershed] 디렉토리에는 [grids], [shapes], [tables], [text]라는 디렉토리가 생성된다. 이 절에서는 [watershed] 디렉토리에 있는 자료를 이용하여 MODFLOW 입력자료를 구축하는 절차를 소개한다.

(1) MODFLOW의 격자 입력자료 구축

MODFLOW에 격자자료로써 입력되어야 할 부분은 크게 basic package의 경계배열과 초기수두 배열, block-centered package의 대수층바닥의 표고배열이다. 초기수두파일과 대수층바닥의 표고 격자 배열은 [grids]내의 [grid1]이라는 표고 grid file을 수정 및 보완하여 사용할 수 있고, 경계배열은 [grids]내의 [water1]이라는 소유역 구분 grid file을 이용하여 NODATA_value를 수정하면 쉽게 구축할 수 있다.

(2) HRU 공간분포도

[grids] 디렉토리내의 소유역 구분 grid file인 [water1], 토지이용도 grid file인 [lusgr1], 토양도의 grid file인 [solgr1]을 중첩시키면 유역내의 소유역 고유번호, 토지이용도 고유번호, 토양도 고유번호를 알 수 있고, 이 자료와 [text]내의 HruLanduse-SoilRepSwat.txt 파일을 이용하면 고유의 HRU 번호를 격자에 부여할 수 있다. 이 과정에서 주의해야 할 점은 SWAT 모형을 실행 할 때, HRU distribution의 Multiple hydrologic Response units 옵션만을 이용해야 하고, 이 옵션에서 Land Use (%) over

Subbasin Area와 Soil Class (%) over Land Use Area를 모두 "0"으로 설정해야 한다는 것이다. 이 옵션이 "0" 이외의 다른 값으로 설정되면 SWAT은 설정된 %미만의 작은 HRU는 무시하게 되고, 무시된 HRU의 면적은 큰 HRU에 대해 면적비로 분배된다. 이렇게 생성된 HRU는 Hru-Landuse SoilRepSwat.txt에 저장되는데 여기에 무시된 작은 HRU에 대한 정보가 없기 때문에 HRU의 공간분포도를 만들 수 없다. 만약 사용자가 작은 면적의 HRU가 필요없다면 SWAT 모형을 실행하기 전에 전처리과정을 거쳐야 한다.

(3) 하천 분포도

하천 분포도는 [grids]내의 [stlnc1]이라는 하도 grid file과 [shapes]내의 [riv2]라는 하도 shape file을 이용하여 하도별 하천 분포도를 생성할 수 있으며, 강의 바닥표고는 여기에 [grids]내의 [grid1]이라는 표고 grid file을 중첩시켜 얻을 수 있다. 하천 분포도는 격자의 순서가 있으므로 생성된 하천분포도와 [grids]내의 [demfac2]라는 집수면적 grid file을 이용하면 각 하천에 기여하는 격자를 알 수 있으며 이를 크기 순으로 정렬시키면 하천의 순서를 추출할 수 있다.

3. 평가유역의 개요

3.1 오산천 유역의 유역특성 자료

경안천유역의 오산천 소유역을 대상으로 SWAT-MODFLOW 결합모형을 시험 적용하였다. 오산천 유역의 면적은 47.95km²이며 3개의 소유역내 하도연장은 각각 북쪽에서 유입되는 지류 5.456km, 남쪽에서 유입되는 지류 5.571km, 출구점으로 연결되는 본류가 8.179km이다(그림 2).

SWAT모형은 토양도(그림 3)와 토지이용도(그림 4)의 자료를 중첩시켜 구한 HRU를 수문응답의 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 5)를 구한 후 이를 다시 MODFLOW의 격자에 배치시키는 작업이 필요한데 본 연구에서는 HRU의 공간분포도를 MODFLOW의 격자망도에 일치시키는 HRU-GRID 변환기법을 독자적으로 구축하였으며 이를 통해 SWAT과 MODFLOW의 정량적 교환이 가능하도록 했다.

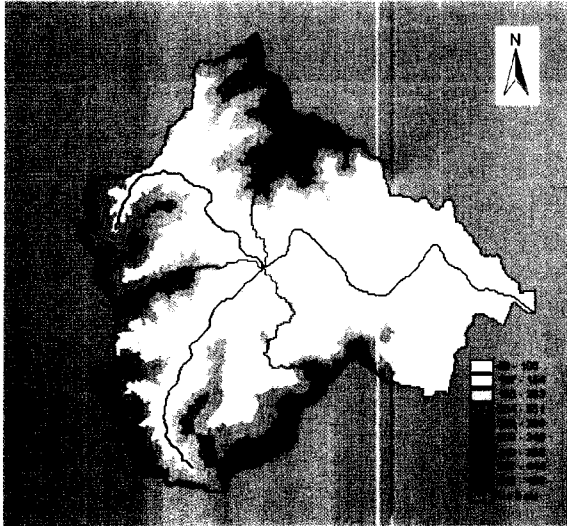


그림 2. 경안천 지류 오산천 유역의 지형 및 하천



그림 5. 오산천 유역의 HRU 공간분포도

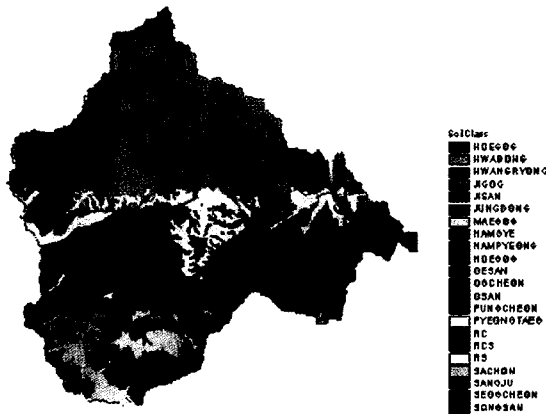


그림 3. 오산천 유역의 토양도

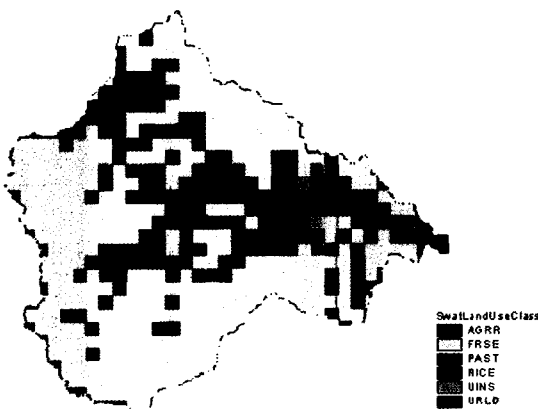


그림 4. 오산천 유역의 토지이용도

3.2 지하수 모형을 위한 자료

MODFLOW의 한 격자크기는 30m×30m로 하여 총 438×433개의 격자망을 생성하였다. 대수층의 초기 지하수위 분포는 관측자료의 부족으로 인해 지형으로부터 2m 아래에 분포한다고 가정하였으며 대수층 바닥은 지표로부터 20m 아래에 위치시켰다. 본 연구는 모형이 지표수-지하수의 유출특성을 얼마나 잘 반영하고 있는지에 초점을 맞추었으므로 정확한 매개변수의 결정은 고려하지 않았다. 다만 모형의 개연성을 확인하기 위해 가용한 범위에서 매개변수값을 결정하였다. SWAT모형에서 물리적인 과정을 통해 계산되는 지하수 함양량은 일별로 MODFLOW에 입력되며 SWAT 모형내의 하도에서의 하천수위가 MODFLOW의 River 모듈로 입력되도록 하였다.

4. 모형의 평가 및 비교고찰

본 모형의 평가를 위한 총 모의기간은 1985년 6월 1일부터 동년 8월 31일까지의 3개월로 정하였다. 주된 평가요소는 지하수 함양량의 공간적 변동성, SWAT에서는 결정할 수 없는 하천-대수층간의 양방향 상호작용, 그리고 지하수위 분포도의 작성이다. 따라서 모형은 SWAT만을 구동하는 옵션과 SWAT-MODFLOW결합 모형의 옵션 두가지를 사용하여 구동되었으며, 각각의 충유출량을 산정하여 그 차이를 비교하였다.

4.1 지하수 함양량의 공간적 변동성

첫 번째 평가항목은 일별로 SWAT모형에서 구해진 지하수 함양량이 정확히 MODFLOW에 입력되는지를 확인하는 것이다. 이 과정은 SWAT의 HRU에서 구해진 값을 HRU-GRID 변환기법을 이용하여 전환시킴

로써 가능해지는데, 결과를 확인하기 위해 1985년 8월 31일에 MODFLOW로 입력되는 함양량의 값을 도시하였다(그림 6).

그림 6은 지하수 함양량의 공간적 분포를 명확하게 드러내고 있다. 그림은 MODFLOW에 입력되는 셀(cell) 별 함양량 자료로서 0인 경우 흰색으로 나타나도록 처리한 결과이다. 그림에서 군데군데 함양이 없는 지역이 나타나는데 이는 토지이용에 따른 함양량의 불균질한 특성으로 파악되며 강우량 역시 공간적인 변동성을 가지므로 유역전체의 함양량은 일별로도 공간적으로도 불균일하게 분포되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 함양량의 시공간적 변동성을 활용하면 기존의 지하수

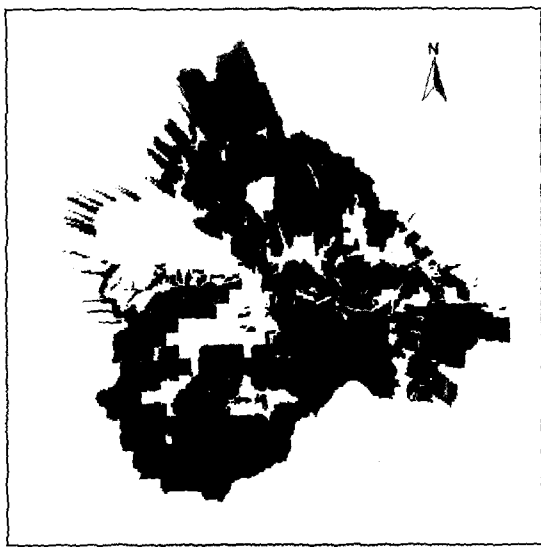


그림 6. 지하수 함양량의 공간적 분포 (1985년 8월 31일)

함양량 평가방식을 크게 개선할 것으로 기대된다.

4.2 지하수위 분포

두 번째 평가항목은 SWAT모형의 지하수 모듈에서는 계산하지 못하는 지하수위의 공간적 분포로서 MODFLOW와 결합하는 주된 목적이기도 하다. 지하수위는 초기수위 분포로부터 30일(그림 7), 60일(그림 8), 90일(그림 9)이 지난 후의 결과를 각각 도시함으로써 확인하였다. 비록 큰 변화는 아니지만 30일 간격으로 지하수위의 변동이 분명하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

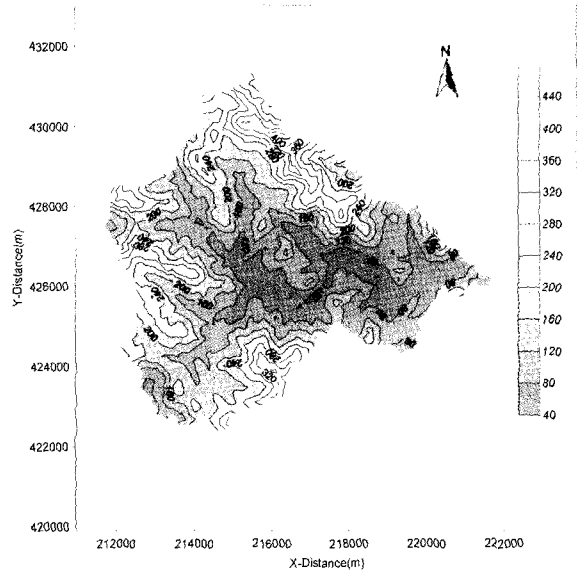


그림 8. 지하수위 분포도(모의시작후 60일)

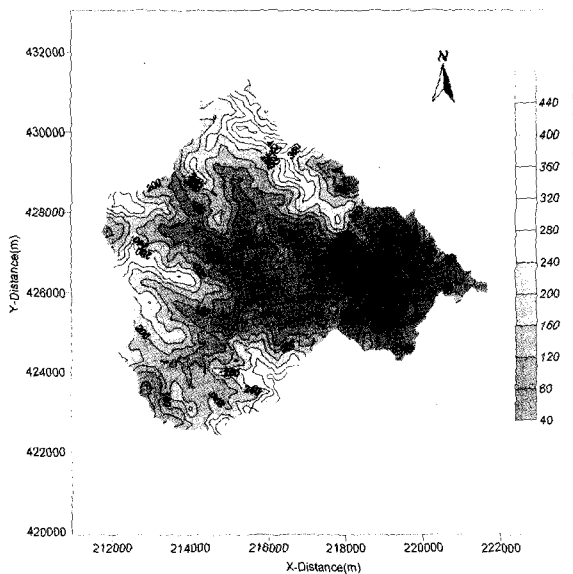


그림 7. 지하수위 분포도(모의시작후 30일)

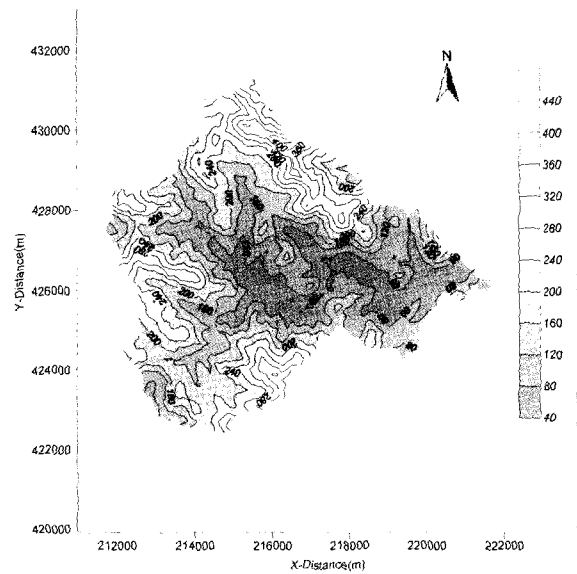


그림 9. 지하수위 분포도(모의시작후 90일)

4.3 총 유출량

마지막 평가항목은 하천과 대수층간의 상호작용을 확인하는 총 유출량의 변화이다. SWAT의 경우는 대수층에서 하천으로 유입되는 기저유출량만을 산정하는 반면, SWAT-MODFLOW결합모형은 하천수위와 지하수위와의 관계를 통해 하천에서 대수층으로의 유입을 고려할 수 있다는 것이 큰 장점이라고 할 수 있다. 따라서 기저유출량의 산정을 보다 현실적으로 개선시키려면 하

천-대수층간의 물 교환량이 현실적으로 적절히 반영되는지를 평가해야 한다. 이에 따라 90일간의 총 유출량 결과를 그림 10에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 모의기간의 후반부에서 SWAT-MODFLOW의 결합모형은 SWAT모형의 총 유출량에 비해 과소 추정된 유출량을 나타낸다. 이러한 결과는 하천에서 대수층으로의 유입이 일어난 것으로 하천-대수층 양방향의 상호작용이 원활하게 일어남을 입증한다.

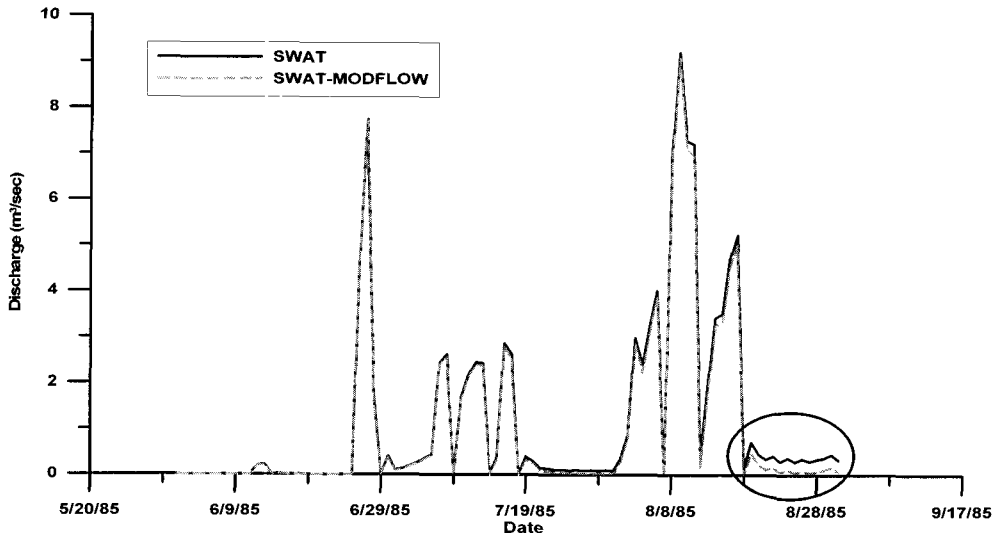


그림 10. 총유출량의 비교

4. 결 론

본 연구에서는 SWAT의 지하수 성분과 범용적인 지하수 유동해석 모형인 MODFLOW를 결합시킨 SWAT-MODFLOW모형을 구동하여 SWAT모형에 비해 얻어질 수 있는 장점을 객관적으로 평가하였다. 오산천 소유역을 대상으로 한 시험구동결과 SWAT-MODFLOW 결합모형은 지하수 함양량의 공간적 변동성을 현실적으로 반영하여 MODFLOW의 정확성을 크게 제고시킬 것으로 평가되며 하천네트워크-대수층간의 양방향 상호작용을 원활하게 고려함으로써 SWAT단일모형에 비해 보다 정확한 기저유출량을 산정할 것으로 기대된다. 또한 SWAT모형에서 확인할 수 없었던 지하수위의 공간적 분포도를 통해 지표수와 연계한 지하수 관리의 가능성을 제시할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-1)에 의해 수행되었습니다. 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김남원, 정일문, 원유승 (2004). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발, **한국수자원학회 논문집**, 제37권 제6호, pp. 509-515.
- 건설교통부/한국수자원공사(2002). **지하수 관리 기본계획 보고서**. 523p.
- Arnold, J. G., P.M. Allen, and G. Bernhardt (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*. Vol. 142. pp.47-69.
- Arnold, J. G., J. R. Williams and D. R. Maidment (1995). Continuous-time water and sediment-routing model for large basin. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 121. No. 2, pp. 171-183.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh. (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, 528 p.
Sophocleous, M.S., J.K. Koelliker, R.S. Govindaraju, T. Birdie, S.R. Ramireddygari and S.P. Perkins. (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., S.P. Perkins, N.G.Stadnyk, and R.S. Kaushal. (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.

(논문번호:04-40/접수:2004.04.16/심사완료:2004.05.29)