

# 완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형

## The Development of Fully Coupled SWAT-MODFLOW Model

김남원\* · 정일문\*\* · 원유승\*\*\*

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

### 요 지

본 연구에서는 준분포형 지표수 유출모형인 SWAT과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW의 완전연동형 결합모형을 독자적으로 개발했다. SWAT의 지하수 모형성분은 집중형이므로 분포형 매개변수와 변화하는 양수량, 지하수위의 변화등을 고려하지 못하며 MODFLOW모형은 주요 입력자요인 함양량의 정확한 산정이 어렵다. 두 프로그램의 연결작업은 지하수 함양량의 전달과정과 하천네트워크-대수층간의 상호작용을 고려하여 완성하였으며 경안천유역의 오산천 소유역에 모형을 시험구동을 수행했다. 시험구동결과 결합모형은 수문모형 혹은 지하수 모형만으로는 해결되지 않는 하천-대수층간의 경계유량을 고려한 유출해석이 가능해짐으로써 유역내 지하수 유출량 및 총 유출량의 신뢰성이 증대될 것으로 기대된다.

**핵심용어 : SWAT, MODFLOW, 지하수함양, 하천-대수층 상호작용**

### 1. 서 론

수자원장기계획에서 가장 중요한 항목은 각 수문성분의 정확한 파악이다. 이를 제대로 반영하지 못하면 계획의 입안시 여러 가지 혼란이 야기되며 수자원 확보 측면에서도 효율적이지 못한 결과를 초래한다. 과거의 수문순환 해석은 강우, 증발, 유출, 침투 등 각 성분별 원인규명과 이들 성분의 물수지 분석을 중심으로 이루어졌다. 하지만 최근에는 물순환 과정의 각 성분을 보다 면밀히 분석함으로써 물 순환과정의 불확실성을 최소화하려는 노력이 경주되고 있다. 특히 지표수 중심의 유출해석은 지하수 유출해석에 한계를 보였으며, 지하수 유동해석 역시 지표수 해석과의 연계에는 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 통합수문성분 해석을 위해 준분포형 유출모형인 SWAT(Neitsch 등, 2001)과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1988)를 결합한 SWAT-MODFLOW를 개발하였다. SWAT모형자체로도 지하수 성분을 계산하고 있으나 모형이 준분포형이므로 투수계수를 포함한 분포형 매개변수의 공간적 변동성과 변화하는 양수량을 고려하기 어려우며 결과값인 지하수위의 공간적 분포를 표현할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 SWAT의 지하수 성분을 분포형 유동모형인 MODFLOW로 대체시킴으로써 위와같은 단점을 보완하였으며, MODFLOW의 하천(river)패키지를 이용하여 하천과 대수층간의 상호작용도 고려할 수 있도록 했다. 따라서, 지하수 성분은 3차원 지하수 유동방정식으로 해석되므로 복잡한 지층구조, 경계조건, 다양한 수리특성 등에 대한 고려가 가능하며 지하수위의 공간적 분포를 파악할 수 있도록 개선됐다. 한편, 기존의 지하수 유동해석에 널리 사용되어온 MODFLOW의 입력자료중 매우 큰 비중을 차지

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

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

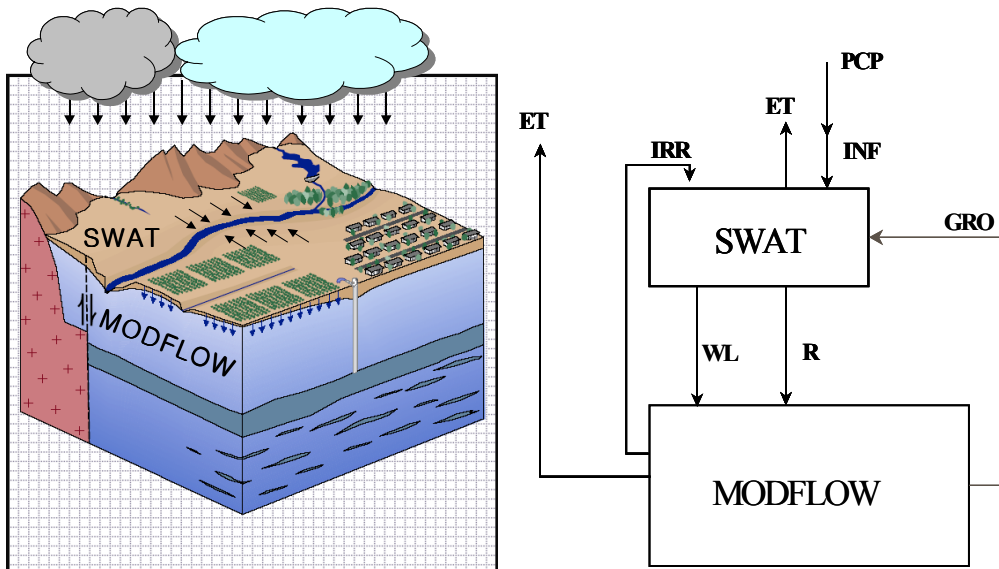
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 · 수자원연구부 · 연구원 · E-mail: yswon@kict.re.kr

하는 함양량조건은 사실상 그 중요성이 간과되어 왔으며 대개 유역평균강우량으로부터 일정 손실량을 뺀 나머지를 적용하였으므로 모의결과에 많은 불확실성을 내포할 수 밖에 없었다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 SWAT모형에서 물리적기반에 의해 산정된 토양층으로부터의 함양량을 MODFLOW에 입력하도록 구성하였다. SWAT의 수문응답단위(Hydrologic Response Unit)를 MODFLOW의 유한차분격자로 대응시키기 위해 DEM자료를 이용한 격자변환툴(Grid Conversion Tool)을 개발하였다. MODFLOW 모형으로부터 산정된 하천으로의 지하수 배출량은 SWAT 모형의 하도추적 프로그램에 입력되어 지표유출량과 합해짐으로써 총 유출량이 산정된다.

## 2. SWAT-MODFLOW 결합모형의 개발

### 2.1 SWAT과 MODFLOW 모형의 개요

본 연구에서 개발된 모형은 선행연구결과중 캔사스 지질조사국(Kansas Geological Survey)의 이 개발한 비공개프로그램 SWATMOD모형(Sophocleous등, 1999)과 개념적으로는 유사한 형태를 띠고 있으나 프로그램의 구조는 다르다. 본 연구에서 제시하는 모형은 MODFLOW가 SWAT모형의 부프로그램의 형식으로 처리되는 방식으로 그 개념도와 모식도는 그림 2.1과 같다.



(a) 결합모형의 개념도

(b) 결합모형의 모식도

그림 2.1 본 연구에서 제시한 결합모형의 개념도 및 모식도

### 2.2 SWAT과 MODFLOW 모형의 분해

SWAT 모형의 지하수 흐름 해석부분에 MODFLOW 모형을 포함시키기 위해 SWAT 모형과 MODFLOW 모형의 입력부분과 계산부분으로 크게 구분하였다(그림 2.2). 이를 위해 SWAT 모형의 경우 'simulate 서브루틴'이 불러지기 전과 후(그림 2.2의 S-1과 S-2)로 구분하였으며, MODFLOW 모형의 경우는 'Stress 루프'의 전·후(그림 2.2에서 M-1과 M-2)로 구분하였다.

SWAT의 경우 지하수 흐름에 관련된 프로그램은 gwmod 부프로그램이며, 이는 SWAT에서 HRU(Hydrologic Response Unit)별로 연산된다. 그러나 MODFLOW는 HRU나 소유역, 유역 등의 구분이 필요없으므로 SWAT에서 산정된 HRU별 지하수함양량을 MODFLOW의 입력자료로 이용하기 위해서는 SWAT모형에 대한 별도의 처리과정이 필요하다. 따라서 gwmod 부프로그램이 불러지기 전·후로 SWAT의 계산부분을 세분하였다(그림 2.3).

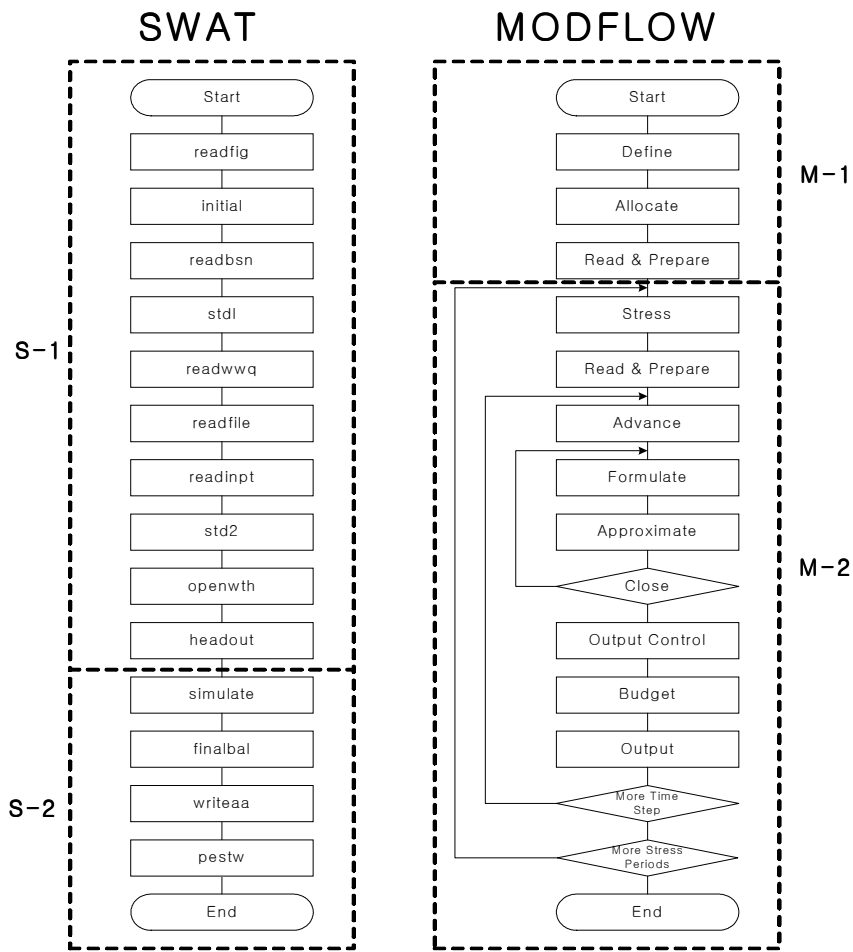


그림 2.2 SWAT과 MODFLOW 모형의 분해

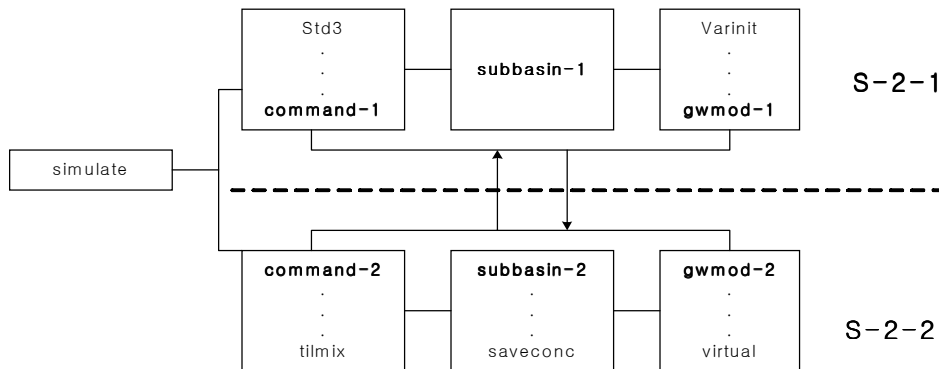


그림 2.3 SWAT모형의 세분

전술한 바와 같이 gwmod 부프로그램은 단위기간에 대하여 소유역의 HRU별로 호출되므로 입력자료를 읽는 부분과 계산하는 부분을 구분한 것같이 단순히 분해되지 않는다. gwmod 부프로그램을 중심으로 나뉘어진 두 개의 프로그램간에 단위기간 루프가 일치해야 하며, gwmod 부프로그램 계산전(그림 2.3의 S-2-1)의 프로그램에서 HRU별로 산정된 변수가 gwmod 부프로그램 계산 후(그림 2.3의 S-2-2)의 프로그램에 이용될 수 있도록 구성함으로써 변수교환이 가능해졌다.

## 2.2 SWAT과 MODFLOW 모형의 결합

SWAT-MODFLOW 결합모형의 주 프로그램은 SWAT 모형의 주 프로그램을 개선하여 그림 2.4와 같이 구성하였다. 그림 2.4에 제시된 바와 같이 SWAT과 MODFLOW 결합 모형은 먼저 SWAT의 S-1부분을 실행하여 SWAT모형을 실행시키기 위한 입력자료를 읽고, 지하수 부분의 계산을 위한 모형을 선택할 수 있도록 하였다. 따라서 SWAT 또는 MODFLOW를 사용할지의 여부를 사용자에게 의해 지정한 다음, MODFLOW로 지하수 부분을 실행한다면 M-1부분을 실행하며 이때 MODFLOW 관련 자료가 입력된다.

SWAT에서 주 연산은 simulate 부프로그램에서 실행되며 지하수 해석을 MODFLOW로 할지 또는 SWAT으로 할지에 따라서 각각 다른 루틴을 실행한다. MODFLOW를 이용하지 않을 경우에는 SWAT의 지하수 계산프로그램이 실행되며, MODFLOW가 이용될 경우에는 S-2-1이 실행되고, S-2-1이 실행된 후의 HRU별 함양량을 공간분포시킨 격자별 지하수 함양량과 격자별 하천 수위를 MODFLOW의 M-2 입력자료로 이용하고, M-2가 실행된 이후의 격자별 출력 자료를 다시 HRU별 및 하도별로 합산하여 S-2-2로 값을 반환하게 된다.

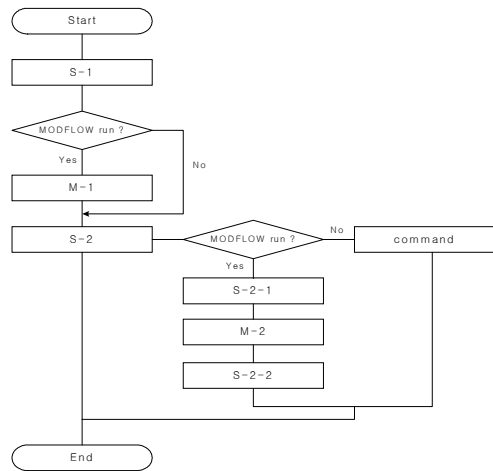


그림 2.4 SWAT과 MODFLOW의 결합모식

## 2.3 SWAT-MODFLOW 결합모형의 변수 교환

SWAT-MODFLOW 결합모형 중 SWAT에서 MODFLOW에 반환시켜야 하는 입력자료는 격자별 함양량과 하천 수위(river package 이용시)이며, MODFLOW가 실행된 후 SWAT으로 반환시켜야 하는 자료는 격자별 함양량을 HRU별로 평균한 값과 하천과 대수층간의 유출입량이다. 이러한 과정은 그림 2.3의 S-2-1 → M-2 → S-2-2의 과정에서 필요한데, S-2-1 → M-2 일 때 격자별 함양량과 하천 수위가 산정되어야 하고, M-2 → S-2-2가 실행될 때 HRU별 함양량과 하천-대수층간 물교환량이 산정되어야 한다.

## 2.4 SWAT-MODFLOW 결합모형의 입력자료

SWAT-MODFLOW 결합모형은 입력자료가 중복되는 것이 많아 비교적 편리하게 구축할 수 있으며, 추가적으로 구축해야 할 입력자료가 있다. 입력자료가 중복되는 경우는 하천의 길이, 폭, 수리진도도 등이며, DEM, 하천도 등을 SWAT 모형에 입력하여 생성되는 유역특성 DEM 및 유역도 등을 이용하여 MODFLOW의 경계배열(boundary array), 초기수두, 대수층의 바닥경계 표고 등의 자료를 생성할 수 있다. 추가적으로 구축해야 할 입력자료는 HRU의 공간분포도와 하천의 분포도인데 본 연구에서는 SWAT 모형에서 생성되는 유역도, 토양도, 토지이용도, 하천도 등을 이용하여 생성한 DEM기반의 분포도를 MODFLOW의 격자망에 일치시키는 HRU-GRID CONVERSION TOOL을 독자적으로 개발하여 사용하였다.

## 3. SWAT-MODFLOW 결합모형의 시험적용

경안천유역의 오산천 소유역을 대상으로 SWAT- MODFLOW 결합모형을 시험적용하였다. 오산천 유역의 면적은 47.95km<sup>2</sup>이며 주하도는 3개로서 각각의 연장은 북쪽에서 유입되는 지류 5.456km, 남쪽에서 유입되는 지류5.571km, 출구점으로 연결되는 본류가 8.179km이다(그림 3.1). MODFLOW의 한 격자크기는 30m×30m로 하여 총 438×433개의 격자망을 생성하였다. 총 모의기간은 1985년 5월 21일부터 동년 9월 18일까지로 하였으며 이에 대한 모의결과는 그림 3.2와 같다. 그림 3.2에서 점선으로 표시된 것이 SWAT-MODFLOW의 결합모형에 의한 유출량 결과이며 실선으로 표시된 것이 SWAT의 유출량 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 유출량은 초반에 거의 차이를 보이지 않다가 후반부로 갈 수록 약간의 차이를 나타내고 있다. SWAT-MODFLOW의 유출결과가 SWAT의 유출결과보다 작게 나타나고 있으며 이는 하천과 대

수층의 상호작용을 고려함으로써 하천에서 대수층으로의 지하수 유출이 발생함에 따라 기저유출성분이 감소된 것이다.



그림 3.1 오산천 유역도

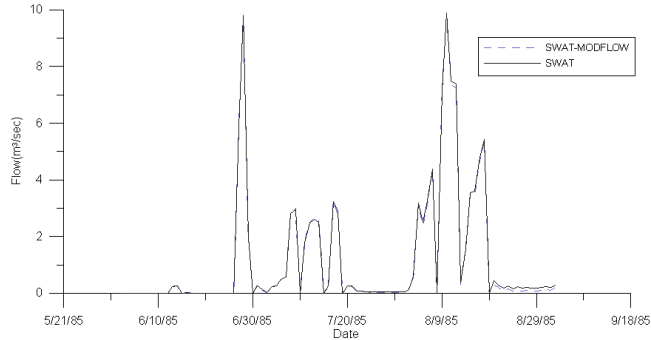


그림 3.2 시험적용의 결과

#### 4. 결론

본 연구에서는 SWAT의 지하수 성분과 범용적인 지하수 유동해석 모형인 MODFLOW를 독자적으로 결합시킨 SWAT-MODFLOW모형을 개발하였다. 두 프로그램의 연결작업은 지하수 함양량의 전달과정과 하천네트워크-대수층간의 상호작용을 고려하여 완성되었으며 시험구동을 통해 그 안정성과 적용성을 확인할 수 있었다. 결합모형은 기존의 수문모형이나 지하수 모형만으로는 해결되지 않는 유역별 지하수 함양량계산과 하천-대수층의 경계유량해석을 수행할 수 있으므로 유역내 지하수 유출량 및 총 유출량의 신뢰성이 크게 증대될 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, 1984, "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model", U.S. Geological Survey Techniques in Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, 528 p.
2. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams, 2001, Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation Version 2000, Agricultural Research Service.
3. Sophocleous, M.A., 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 v. 214 pp. 179-196.