

완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형

(I) 모형의 개발

The Development of Fully Coupled SWAT-MODFLOW Model

(I) Model Development

김 남 원* / 정 일 문** / 원 유 승***

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

Abstract

In this study, the fully coupled SWAT-MODFLOW model is developed by using the type of embedment MODFLOW in SWAT. Since SWAT model has semi distributed features, its groundwater component can't consider distributed parameters such as hydraulic conductivity, storage coefficient and spatially variable natures such as distribution of groundwater heads and pumping rate and so forth. The main purpose of this study is to overcome these limitations. This linkage is completed considering the interaction between stream network and aquifer to reflect boundary flow. To correspond HRU in SWAT to grid in MODFLOW, HRU-GRID conversion tool using DEM is newly suggested. As groundwater recharge of MODFLOW can be estimated accurately by SWAT model, the reliability of groundwater discharge and total runoff of watershed could be greatly enhanced.

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

요 지

본 연구에서는 준 분포형 지표수 유출모형인 SWAT과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW의 완전 연동형 결합모형을 독자적인 방식에 따라 개발했다. SWAT의 지하수 모형성분은 집중형이므로 분포형 매개변수와 변화하는 양수량, 지하수위의 변화 등을 고려하지 못하며 MODFLOW모형은 주요 입력자료인 함양량의 정확한 산정이 어렵다는 한계를 안고 있다. 이를 극복하기 위해 준분포형 모형인 SWAT의 HRU를 분포형 모형인 MODFLOW의 격자로 대응시키기 위해 DEM을 이용한 HRU-GRID변환기법을 독자적으로 개발하였으며, 수문성분 교환은 지하수 함양량의 전달과정과 하천네트워크-대수층간의 상호작용을 고려하여 완성하였다. 결합모형을 이용하면 지표수나 지하수 모형만으로는 해결되지 않는 하천-대수층간의 경계유량을 고려한 유출해석이 가능해짐으로써 지하수 유출량을 포함한 유역내 총 유출량의 신뢰성이 증대될 것으로 기대된다.

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

* 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)

1. 서론

과거의 수문순환 해석은 강우, 증발, 유출, 침투 등 각 성분별 원인규명과 이들 성분의 총괄적인 물수지 분석을 중심으로 이루어짐으로써, 물리적 기반의 정확한 성분해석이 어려웠기에 최근에는 물 순환 과정의 각 성분을 보다 면밀히 분석함으로써 물 순환과정의 불확실성을 최소화하려는 노력이 경주되고 있다. 특히 유출해석은 대부분 지표수 중심으로 행해짐으로써 지표하 유출 거동 특성은 상대적으로 간과되어 온 것이 사실이며, 이와 마찬가지로 지하수 유동해석에 있어서도 지표수 수문성분거동의 면밀한 분석결과를 반영하지 못했다(수자원의 지속적 확보기술 개발 사업단, 2003). 따라서, 하천 주변의 지하수 이용에 따른 수리권 문제, 지하수 함양량 및 적정 개발량 산정 문제, 과도한 하도유출 문제 등 여러 가지 현안에 대한 명확한 해결을 마련하지 못했다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 여러 방안 중 가장 우선적인 것은 지표수와 지하수를 연계 해석할 수 있는 장기 유출 모형의 구축이다. 이를 위한 모형의 선택기준의 우선순위는 지표수와 지하수의 수리학적 상호작용을 다루는 방식과 토지이용, 지표유출, 기후인자 등을 고려한 수문학적 영향을 검토할 수 있어야 한다는 점이다. 또한 지하수 거동의 경우 회귀수의 영향이나 기타 특성치의 공간 분포를 설명할 수 있어야 한다.

이와 같은 목적에 부합하는 모형으로 본 연구에서는 토지이용변화에 따른 물 순환 변화를 해석할 수 있는 준 분포형 유출모형 SWAT(Arnold 등, 1993; Arnold 등, 1995)과 국내외적으로 널리 사용되는 3차원 지하수 유동모형 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1988)의 연계를 시도함으로써 지표수-지하수의 실질적인 연계를 꾀하였다.

SWAT모형은 널리 사용되는 장기유출모형으로 CREAMS(Knise, 1980)와 SWRRB(Williams 등, 1985)로부터 단순화된 유출량 하도추적과 대유역의 지하수 성분을 첨가함으로써 발전했다. SWAT모형은 그 자체로도 지하수 성분을 계산하고 있으나 모형이 준 분포형이므로 투수계수를 포함한 분포형 매개변수의 공간적 변동성과 변화하는 양수량을 고려하기 어려우며 결과 값인 지하수위의 공간적 분포를 표현할 수 없는 단점을 가지고 있다. 또한, MODFLOW모형을 이용한 기존의 지하수 유동해석에서 입력자료 중 매우 큰 비중을 차지하는 함양량의 정확성이 간과되어 왔으며 지표수 유출 성분과의 연계가 이루어지지 못하여 결과적으로 유출 모의결과에 많은 불확실성을 포함할 수 밖에 없었다.

본 연구에서는 이와 같은 두 모형의 단점을 극복하

기 위해 양쪽 모형에서 계산되는 수문성분을 교환하는 방식을 개발, 제시하였다. 먼저 준 분포형과 분포형 모형을 연결시키기 위한 DEM기반의 격자변환기법(Grid Conversion Tool)을 독자적으로 개발하였고, 이와 같은 안정된 플랫폼을 기반으로 SWAT모형안의 지하수 모형을 MODFLOW모형으로 대체시킴으로써 두 모형간의 연계가 시간단계별로 이루어지는 완전 연동형 모형을 구축할 수 있었다. 이같은 방식은 Sophocleous 등(1997)이 개발한 SWATMOD의 결합방식과는 다소 차별화된 시도로서 불완전한 플랫폼에 의해 완전연동이 이루어지지 못한 기존 연구(Sophocleous 등, 1999)의 단점을 극복한 사례라고 할 수 있다.

2. 기존의 지표수-지하수 연계모형

1990년대에 미국에서는 수문학적 과정을 모의하기 위해 개발과 적용이 이루어진 지표수-지하수 결합모형이 많이 발표됐다. Walton 등(1995)은 다양한 물리적 과정을 검토하고 기존의 많은 수치모형을 기반으로 지표수-지하수 결합모형 WDWBM(Wetlands Dynamic Water Balance Model)를 개발하였다. 남 플로리다 물관리사무소는 자치권역의 물관리모형인 SFWMM(South Florida Water Management Model)을 개발하여 사용해 오고 있으며 이를 개선하기 위해 지표수와 지하수의 상호관계를 분석하여 모형에 반영했다(SFWMD, 1999). Lal 등(1998)은 음해적 유한체적법을 이용한 2차원 지표수 및 지하수 유출모형 HSE(Hydrologic Simulation Engine)를 개발하였다. Sophocleous 등(1997)은 분포 매개변수를 가진 대수층과 변화하는 양수량을 모의할 수 있는 통합지표수/지하수 모형 SWATMOD를 개발하였고, SDI Environmental Service(1998)는 집중형 유출모형 HSPF-Hydrologic Simulation Program Fortran (Johanson 등, 1984)과 MODFLOW를 결합하여 ISGW(Integrated Surface and Groundwater Model)를 완성했다. Danish Hydraulic Institute (1999)는 완전 분포형 3차원유출모형인 MIKE-SHE를 개발했다. 한편, 국내에서는 건설교통부(1999)가 수행한 지표수-지하수 연계운영 시스템 개발의 결과로 지표면 유출과 지표하 침투류, 하천 유출, 그리고 지하수 흐름을 동적으로 연계한 통합수치모형 SIRG가 개발되어 단기 홍수사상에 대해 적용된 바 있다. 표 1은 동일한 수문학적 과정을 모의하는 것으로 그 차이는 지표수와 지하수를 각각의 수문학적 과정으로 결합시키는 방법에 있으며, 특히 연계 과정의 차이가 두드러진다. 표 2는 다양한 수치기법과 과정묘사를 비교한 것이다.

표 1 및 표 2에서 비교된 모형중에서 ISGW와 SWATMOD는 본 연구의 목적과 가장 부합하는 형태를 취한다. 그중에서도 SWATMOD는 유역단위의 결합 방식이며 동시에 지표수 유출모형이 집중형에서 보다 개선된 형태인 준 분포형 모형이라는 점, 그리고 지하수 시간단계에 대한 결합이 가능하다는 점과 연직 과정의 처리에 있어서도 강수, 식생차단, 요면저류, 침투 및 침투 그리고 증발산의 모든 과정을 포함하고 있어 본 연구목적에 부합하는 결합형태임을 알 수 있다.

SWATMOD개발의 핵심은 SWAT과 MODFLOW코드를 각각 수정하는데 있으며, 두 모형을 연결시키는 부 프로그램이 개발되었다. 그러나 이 모형은 비공개코드이며 프로그램의 안정성 문제로 인해 실제 유역 적용에 있어서는 분리된 프로그램(seperate version)을 사용한 순차적 모델링을 수행했다(Sophocleous 등, 1999). 본 연구에서 개발된 모형도 SWATMOD모형과 개념적으로는 유사한 형태를 띠고 있으나 프로그램의 구조는 다르다.

한편, 하도를 중심으로 한 지표수-지하수 모의 모형도 다수 개발되어 왔다. James 등(2000)은 지표수-지하수의 제한적인 거동을 다룬 MODBRANCH(Swain와 Wexler, 1996)와 MODNET (Walton 등, 1999)를 비교하였는데 이같은 모형은 단지 1차원의 부정류 하도흐름을 다룬 모형으로 하도흐름과 포화지하수 흐름을 결합한 것으로 호소나 습지까지 확대적용할 수 있으나 지표수 흐름, 침투 등 전체적인 수문시스템을 모의하는데 중요한 요소를 포함하지 않는 단점이 있다.

3. SWAT-MODFLOW 결합모형의 개발

3.1 SWAT과 MODFLOW 모형의 특성

3.1.1 SWAT 모형의 지하수 유출 특성 및 한계

준 분포형 유출모형인 SWAT 모형에서 유역은 여러 소유역으로 분할되고, 소유역은 다시 동일한 수문응답 특성을 갖는 여러 개의 HRU(Hydrologic Response Unit)로 구성된다. 따라서 지표면, 지표하, 지하수의 수문성분은 개개의 HRU에 대해 각각의 수문성분량을 산정한 다음 소유역에 대하여 지체된 후 합산된다. 이렇게 합산된 각 수문성분량이 소유역의 주수로에 유입된다고 가정하여 상류 소유역에서 하류 소유역으로 하도 추적이 이루어진다. 그러나 HRU는 소유역내 토지이용과 토양도를 이용하여 같은 속성들을 분류한 것으로 소유역의 상류 또는 하류에 있는지에 대한 위치정보, 소유역내에서 여러 곳에 흩어져 있거나 모여 있는지를 알 수 있는 이산성 또는 군집성 정보 등에 대한 공간분포

특성을 가지고 있지 않다. 이러한 공간분포 특성을 고려하기 위해 SWAT에서는 지체시간이라는 변수를 이용하여 분석단위기간 동안 지체된 양과 유출된 양을 산정하며, 지체된 양은 다음 단위기간의 유출량에 합산되어 다시 지체된다. 그러나 이와 같은 방식으로 공간 분포를 해결하는 데에는 한계가 있다. 특히 지표면, 지표하, 지하수 흐름은 이동속도가 현저히 다르며, 지하수 흐름이 하천유량에 직접적으로 기여하는 시간은 유역의 규모에 따라 다르나 수 일 또는 수 십일 이상 걸린다는 점을 감안하면 더욱 그렇다. SWAT은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리상태에 따른 물과 유사 및 농업화학 물질의 거동의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형으로 주로 일 단위의 자료를 이용하여 수 년에서 수 십년의 장기유출의 변화특성을 파악하기 위해 이용되므로 이 경우 지하수 유출의 중요성은 더욱 커지게 되며 지하수 유출의 공간적인 분포 역시 고려되어야 한다.

SWAT에서 하천과 지하수의 상호 물 교환을 해결하기 위해서 기저유출은 얇은 대수층에 저류된 물이 사용자에게 의한 특정값의 한계치를 초과하는 경우에만 발생한다는 가정하에 지하수로부터 기저유출량을 산정한다. 그러나 지하수와 하천의 상호관계는 지하수위와 하천수위의 관계로부터 산정되어야 하며, SWAT에서 가정된 특정값의 한계치는 하천수위와는 무관하다. 또한 SWAT은 지하수가 하천에 기여하는 양만을 산정할 뿐 하천이 지하수위에 기여하는 양은 산정하지 못하며, 대수층을 얇은 대수층과 깊은 대수층 두 개의 층만이 존재한다고 가정한다는 한계를 안고 있다.

3.1.2 MODFLOW모형의 특성

격자기반의 분포형 지하수 유출모형 MODFLOW는 단위기간 동안 변화하는 지하수 함양량을 이용하여 지하수위의 공간적 분포를 산정한다. 또한 사용자의 입력 조건에 따라 양수 패키지(well package), 증발산 패키지(evapotranspiration package), 배수 패키지(drain package), 하천 패키지(river package) 등에서 유입 또는 유출량을 산정하고 이들의 영향에 따른 지하수위의 변화 등을 정량적으로 분석할 수 있다. 이러한 이유로 MODFLOW가 지하수위나 지하수 유출 등 지하 흐름에 대한 해석 모델로서 널리 이용되는 반면, 주요 입력 자료라고 할 수 있는 유역단위 지하수 함양량 같은 항목에 대해서는 상대적으로 적은 관심이 모아졌는데 유역단위의 지표수 유출모형과의 연계가 잘 이루어지지 못했던 것이 주된 요인이라고 할 수 있다.

지하수 함양량은 상부 지표면에 떨어진 강수량 중

일부가 지표로 유출되고, 일부가 지하로 침투하여 비포화대를 침투한 양 중 포화지대인 지하수위에 직접 기여함으로써 지하수위의 변화에 영향을 주는 요소이다. 따라서 지하수 함양량을 산정하기 위해서는 강수량으로부터 침투량, 침투량 및 증발산을 산정하는 과정이 선행되어야 한다.

MODFLOW에서는 하천과 지하수의 상호관계를 해결하기 위해 두 개의 하천 패키지(river 또는 stream package)를 제시하고 있다. 두 패키지 모두 지하수가 하천에 기여하는 양과 하천이 지하수에 기여하는 양을 산정하나 stream패키지에는 하도추적이 추가되어 있다. 따라서 river패키지는 MODFLOW에서 함양이 일어난다고 가정된 하천바닥에 대한 정보만을 필요로 하지만 stream 패키지는 하천의 시작부터 종점까지 격자의 순서(추적 순서)와 격자에 위치한 하천의 단면을 필요로 한다. 이러한 일련의 과정을 계산하기 위해서 MODFLOW는 하천바닥과 대수층의 표고자료를 입력해야 한다. 이에 본 연구에서는 입력자료의 구성이 보다 간편한 river 패키지를 사용하여 하천-대수층간의 상호작용을 고려하였으며 하도추적은 SWAT모형에서 계산되도록 했다.

3.1.3 SWAT과 MODFLOW 모형의 수문성분 교환

SWAT모형은 상대적으로 느린 흐름인 지하수 흐름의 해석에 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.

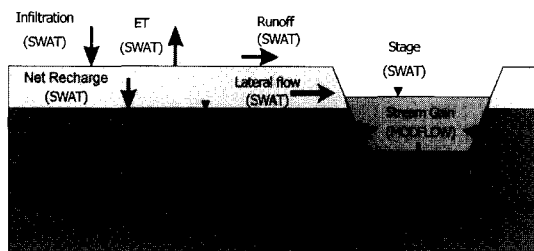


그림 1. 본 연구에서 제시한 지표수-지하수 연계의 개념도

본 연구에서 제시하는 모형은 MODFLOW가 SWAT 모형 속에 내포(embedment)되는 형식으로 결합을 완성하였으며 그 모식도는 그림 2와 같다. SWAT과 MODFLOW결합모형에서의 수문성분은 PCP(강수), ET(증발산), INF(침투), IRR(회귀수), R(함양), WL(하도수위), GRO(지하수유출)등이다.

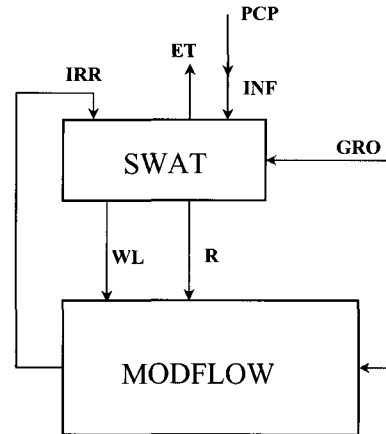


그림 2. 본 연구에서 제시한 결합모형의 수문성분교환 모식도

3.2 SWAT과 MODFLOW 모형의 분해

SWAT모형의 지하수 흐름 해석부분에 MODFLOW 모형을 포함시키기 위해 SWAT모형과 MODFLOW 모형의 입력부분과 계산부분으로 크게 구분하였다(그림 3). 이를 위해 SWAT모형의 경우 'simulate 서브루틴'이 불려지기 전과 후(그림 3의 S-1과 S-2)로 구분하였으며, MODFLOW 모형의 경우는 'Stress 루프'의 전·후(그림 3에서 M-1과 M-2)로 구분하였다.

SWAT의 경우 지하수 흐름에 관련된 프로그램은 gwmod 부 프로그램이며, 이는 SWAT에서 HRU별로 연산된다. 그러나 MODFLOW는 HRU나 소유역, 유역 등의 구분이 필요 없으므로 SWAT에서 산정된 HRU별 지하수함양량을 MODFLOW의 입력 자료로 이용하기 위해서는 SWAT모형에 대한 별도의 처리과정이 필요하다. 따라서 gwmod 부프로그램이 불려지기 전·후로 SWAT의 계산부분을 세분하였다(그림 4).

전술한 바와 같이 gwmod 부프로그램은 단위기간에 대하여 소유역의 HRU별로 호출되므로 입력자료를 읽는 부분과 계산하는 부분을 구분한 것같이 단순히 분해되지 않는다. gwmod 부 프로그램을 중심으로 나뉘어진 두 개의 프로그램 간에 단위기간 루프가 일치해야 하며, gwmod 부 프로그램 계산 전(그림 4의 S-2-1)의 프로그램에서 HRU별로 산정된 변수가 gwmod 부 프로그램 계산 후(그림 4의 S-2-2)의 프로그램에 이용될 수

있도록 구성함으로써 변수교환이 가능해 졌다.

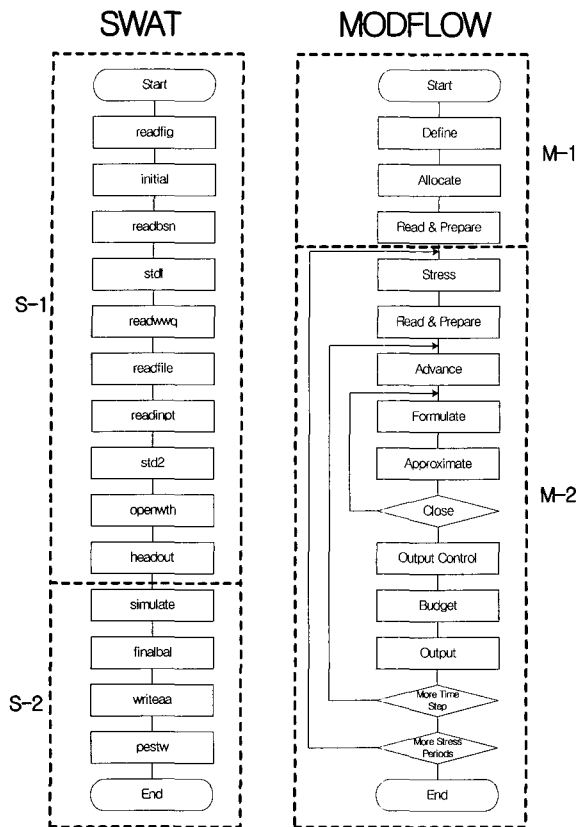


그림 3. SWAT과 MODFLOW 모형의 분해

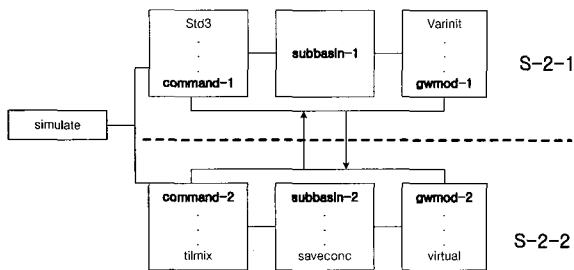


그림 4. SWAT모형의 세분

3.3 SWAT-MODFLOW 결합모형의 주 프로그램

SWAT-MODFLOW 결합모형의 주 프로그램은 SWAT모형의 주 프로그램을 개선하여 그림 5와 같이 구성하였다. 그림 5에 제시된 바와 같이 SWAT과 MODFLOW 결합 모형은 먼저 SWAT의 S-1부분을 실행하여 SWAT모형을 실행시키기 위한 입력 자료를 읽고, 지하수 부분의 계산을 위한 모형을 선택할 수 있도록 하였다. 따라서 SWAT 또는 MODFLOW를 사용할지의 여부를 사용자에게 의해 지정받은 다음, MODFLOW로 지하수 부분을 실행한다면 M-1부분을 실행하며 이때 MODFLOW 관련 자료가 입력된다.

SWAT에서 주 연산은 simulate 부 프로그램에서 실행되며 지하수 해석으로 MODFLOW 또는 SWAT의 사용 여부에 따라 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 공간 분포시킨 격자별 지하수 함양량과 격자별 하천 수위를 MODFLOW의 M-2 입력자료로 이용하고, M-2가 실행된 이후의 격자별 출력자료를 다시 HRU별 및 하도별로 합산하여 S-2-2로 값을 반환하게 된다.

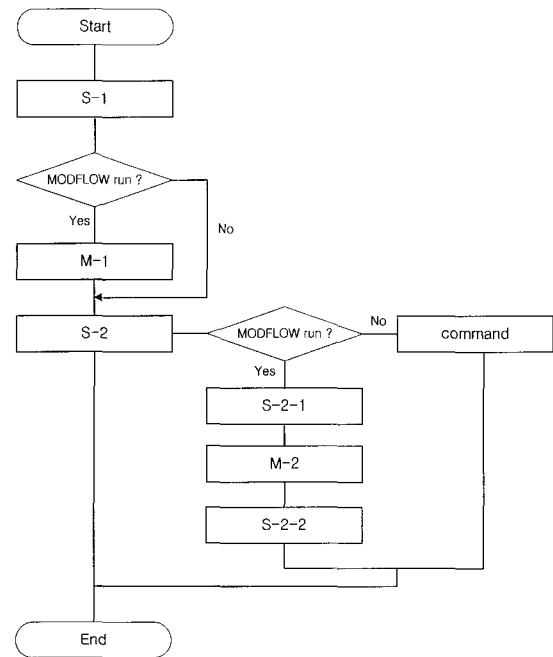


그림 5. SWAT과 MODFLOW의 결합모식

3.4 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 5의 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 물 교환량이 산정되어야 한다.

3.4.1 지하수 함양량의 공간분포

SWAT에서 HRU별 지하수 함양량은 소유역내 HRU의 함양량일 뿐 공간적인 분포특성을 가지고 있지 않다. 이 HRU별 지하수 함양량을 MODFLOW의 격자별로 분포시키기 위해서는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 생성된 HRU 공간분포도가 필요하다. 또한 이 HRU 공간분포도에 이용되는 HRU 구분자는 SWAT에서 할당된 고유번호를 이용해야 SWAT-MODFLOW 결합모형에서 공통적으로 이용될 수 있다. 이러한 논리로 S-2-1에서 산정된 HRU의 함양량은 HRU 공간분포도를 이용하여 격자의 면적으로 평균된 값으로 각 격자에 할당한다.

3.4.2 HRU별 평균지하수량의 계산

M-2에서 단위기간에 필요한 모든 지하수 관련변수를 계산한 후 이 값을 S-2-2로 재 반환시키기 위해서는 전 절의 역 과정 즉, 격자별 지하수량을 HRU별 지하수량으로 바꾸는 과정이 필요하다. 이때에도 HRU의 공간분포도를 이용하여 격자별로 합산하여 HRU별 평균지하수량을 산정하는데, MODFLOW의 옵션에 따라 두 가지 방법 중 하나로 HRU별 평균지하수량이 계산된다.

3.4.3 하천의 지하수 유출입량

SWAT은 사용자에게 의해 입력된 특정값 이상으로 얇은 대수층의 깊이가 증가하면 지하수 유출이 발생한다고 가정한다. 그러나 얇은 대수층의 깊이가 특정값 이하이거나 하도에 유수가 발생했을 때 하도에서 지하로 유입되는 양을 산정하지 못한다. 이러한 문제는 SWAT이 하천바닥 표고나 대수층의 깊이를 이용하지 않기 때문이다. 반면에 MODFLOW는 하천바닥의 표고와 각 대수층의 깊이를 입력함으로써 하천수위와 지하수위의 비교를 통한 하천-대수층간 물의 교환이 이루어진다. 본 연구에서 이용한 하천(river)패키지의 주요 입력자료는 격자에서 하천의 위치를 나타내는 행과 열, 하천수위, 하천 저 투수성 바닥층의 수리전도계수와 강 바닥의 저면표고 등이다. 이들 변수 중 하천수위, 하천 저 투수성 바닥층의 수리전도도는 SWAT에서 산정한 값을 바로 이용할 수 있으며 사용자에게 의해 수정될 수 있다. 하천수위는 SWAT이 실행되었을 때 전일의 하도수위에 강 바닥의 저면표고를 합하여 이용하고, 저 투수성 바닥층의 수리전도도는 SWAT의 입력자료인 하도의 수리전도도, 하도 바닥 폭, 하도의 길이에 대한 변수를 이용하며, 하천바닥의 두께는 사용자에게 의해 입력하도록 구성했다. 이들 변수 중 하천길이는 각 격자에 포

함되어 있는 하천연장을 의미하며, SWAT에서 반환받은 하도길이는 소유역에 있는 주 하도의 길이를 의미한다. 따라서 SWAT에서 주 하도의 길이를 MODFLOW의 하천연장으로 환산하기 위해 SWAT의 주하도 길이를 MODFLOW에서 하천을 나타내는 격자의 수로 나눠 평균적인 길이가 입력되도록 처리하였다. 상기의 입력자료는 S-2-1 → M-2의 과정중 SWAT에서 MODFLOW로 교환되는 변수들이고, M-2에서 산정한 각 격자에서의 물 교환량은 SWAT의 하도별로 지하수가 하도에 기여한 양과, 하도가 지하수에 기여한 양의 합으로 산정하여야 한다. 이를 위해서는 MODFLOW에서 하천을 나타내는 격자와 SWAT에서 하도를 일치시키는 작업이 필요하다. 즉, SWAT에서 각 하도에 해당하는 MODFLOW의 격자배치가 이뤄져야 하며, 이를 이용하여 MODFLOW의 하천과 지하수간의 유동량을 SWAT의 하도별 유동량으로 변환하여 S-2-2로 값을 넘긴다.

지하수가 하도에 기여한 양과 하도가 지하수에 기여한 양이 산정된 후 [지하수가 하천에 기여한 양] - [하도가 지하수에 기여한 양]을 HRU 면적으로 나눠 각각의 HRU에서 발생한 양으로 산정하였다. SWAT 결과 파일에서 지하수량이 (-)가 출력되면 하도에서 지하수로 물이 들어간 경우이고(이 경우 SWAT은 계산하지 못함), (+)인 경우는 지하수가 하천에 기여한 양이다.

3.5 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, 수리전도도 등이며, DEM, 하천도 등을 SWAT 모형에 입력하여 생성되는 유역특성 DEM 및 유역도 등을 이용하여 MODFLOW의 경계배열(boundary array), 초기수두, 대수층의 바닥 경계 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-GRID변환기법(conversion tool)을 독자적으로 개발하여 사용하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 SWAT의 지하수 성분과 범용적인 지하수 유동해석 모형인 MODFLOW의 독자적인 결합을

시도하여 SWAT-MODFLOW 완전연동모형을 개발하였다. 두 프로그램의 연결작업은 지하수 함양량의 전달 과정과 하천네트워크-대수층간의 상호작용을 고려하여 완성되었으며 준분포형 모형인 SWAT의 HRU를 분포형 모형인 MODFLOW의 격자로 대응시키기 위해 DEM을 이용한 HRU-GRID변환기법을 독자적으로 개발하였다. 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 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-1)에 의해 수행되었습니다. 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

건설교통부 (1999). 지표수-지하수 연계운영 시스템 개발. '98 건설기술연구개발 최종보고서 R&D/98-0005, 373p.

수자원의 지속적 확보기술 개발 사업단 (2003) 지표수 수문성분 해석기술 개발 2차년도 요약보고서, 과제번호(2-2-1)-한국건설기술연구원, 100p.

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.

Danish Hydraulic Institute (1999). MIKE SHE Water Movement User Manual.

James, A.I., K. Hatfield and W.D. Graham (2000). "Review of Integrated Surface Water/Ground Water Computer Models", prepared for the St. Johns River Water Management District, by University of Florida, Gainesville, FL.

Johanson, R. C., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, Jr. and A. S. Donigian. (1984). Hydrological Simulation Program - FORTRAN(HSPF) : *User Manual for Release 8.0*,

EPA-600/3-84-066, Environmental Research Laboratory, Athens, GA. 30613.

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*.

Lal, A. M. W., M. Belnap, and R. Van Zee. (1998). "Simulation of Overland and Groundwater Flow in the Everglades National Park", *Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference in Memphis, Tennessee*, Volume One, American Society of Civil Engineers, pp. 610-615.

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.

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., J.K. Koelliker, R.S. Govindaraju, T. Birdie, S.R. Ramireddygar 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.

South Florida Water Management District. (1999). "A Primer to the South Florida Water Management Model (Version 3.5)," Hydrologic Systems Modeling Division, Planning Department, South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.

Swain, E.D. and E.J. Wexler. (1996). "A Coupled

- Surface-water and Ground-water Flow Model (MODBRANCH) for Simulation of Stream-Aquifer Interaction", U.S. Geological Survey *Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6*, Chapter A6, 125p.
- Tampa Bay Water. (2001). Scientific Review of The Integrated Hydrologic Model Isgw/Cntb121, *Final Report*, Tampa Bay Water 2535 Landmark Drive, Suite 211 Clearwater, FL 33761-3930.
- Walton, R., E.J. Wexler and R.S. Chapman. (1999). "MODNET: An Integrated Groundwater/Open-Channel Flow Model", prepared by WEST Consultants, Inc.
- Walton, R., T.H. Martin, Jr., R.S. Chapman and J.E. Davis. (1995). "Investigation of Wetlands Hydraulic and Hydrological Processes, Model Development, and Application", *Wetlands Research Program Technical Report WRP-CP-6* prepared for US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Williams, J. R., A.D.Nicks, and J.G.Arnold. (1985). SWRRB, Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 111, No. 6, pp.970-986
- (논문번호:04-39/접수:2004.04.16/심사완료:2004.05.29)