

강우유출모형(K-DRUM)과 지하수유동모형(MODFLOW) 연계에 대한 연구

A Study on Linking K-DRUM and MODFLOW

박구영*, 허영택**, 박진혁***, 장수형****, 김병우*****,

Gu Young Park, Young Teck Hur, Jin Hyeog Park, Su Hyung Jang, Byung Woo Kim

요 지

기후변화는 물 관리 측면에서 많은 변화를 일으키는 것으로 보고되고 있다. 주로 강우의 패턴을 변화시키며, 가용수자원의 지역적 편중을 심화시킨다. 기후변화에 적응하며 안정적인 용수확보를 위해서는 홍수와 가뭄을 고려한 연속적인 물 순환 해석기술이 필요하다. 강우유출분석은 강우사상에 대한 수문순환과정을 통해 유출량을 산출하는 것으로, 주로 직접유출과 중간유출이 이에 해당된다. 강우발생 이후 무강우기간에 대해서는 기저시간 이후에 발생하는 유출량의 정량적 산출이 필요하다. 기저유출은 강우 발생 시점에 급격히 발생하기보다는 선행강우에 따른 유역 내 지하수위 분포와 대수층의 특성, 하천수위에 따라 다양한 패턴으로 나타나기 때문에 지하수대의 수리학적 성분들을 반영할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 강우유출모의 시 지표유출량 산정과 지하수유동해석을 통한 기저유출량 산정이 동시에 이루어져야 한다.

최근 국내외에서는 다양한 형태의 수문모형과 MODFLOW를 연계한 장기유출분석에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서 활용한 K-DRUM(K-water Distribution Runoff Model)은 K-water에서 자체 개발한 물리적 기반의 분포형 강우유출모형으로 강우유출, 유사, 기초수질항목에 대한 3차원 분석이 가능하다. 본 모형의 A층(표층)은 지표유출을 고려한 운동과법이 적용되었고, B층과 C층(중간층), D층(지하수층)은 선형저류범이 적용되었다. MODFLOW(A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model)는 1980년대 USGS(United State Geological Survey)에서 개발된 가장 범용적으로 사용되는 지하수유동모형이며, 모듈화 된 구조를 갖고 있어 다양한 패키지 중 필요로 하는 기능을 독립적으로 모의할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 향후 기후변화에 따른 강우의 불확실성에 대비한 유역의 장기 물순환 해석을 위해 강우유출모형인 K-DRUM과 지하수유동모형인 MODFLOW를 연계하고자한다. 연계방법은 K-DRUM에서 계산된 D층으로 침투되는 양을 MODFLOW의 함양량으로 적용하고, MODFLOW에서 산출된 기저유출량을 K-DRUM의 하천유출에 적용하는 것이다. 본 연구의 성과를 갈수기 유출해석에 적용하면 정확성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : K-DRUM, MODFLOW, 모형연계, 장기유출

1. 서 론

* 정회원 · K-water융합연구원 물순환연구소 연구원 · E-mail : gypark@kwater.or.kr

** 정회원 · K-water융합연구원 물순환연구소 책임연구원 · E-mail : korcivil@kwater.or.kr

*** 정회원 · K-water융합연구원 물순환연구소 수석연구원 · E-mail : park5103@kwater.or.kr

**** 정회원 · K-water융합연구원 물순환연구소 책임연구원 · E-mail : kwaterjang@kwater.or.kr

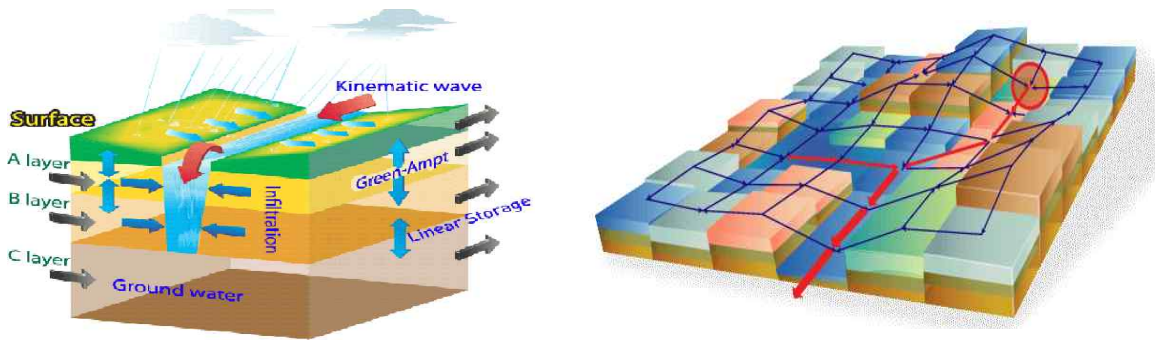
***** 정회원 · K-water융합연구원 물순환연구소 책임연구원 · E-mail : bwkim@kwater.or.kr

수문해석에 있어 유출분석은 대부분 얇은 토양층을 포함하는 지표수에 집중하고 있으며 지하수 유동에 따른 장기 유출 특성은 상대적으로 깊이 있게 연구가 되지 못하는 실정이다. 지표수의 유출은 강우사상에 대한 수문순환 과정을 통해 산정되며, 지하수의 유출은 대수층의 특성에 따라 강우사상이 끝난 이후에도 지속적인 유출 패턴을 보이기도 하는 등 복잡한 형태로 나타난다. 결과적으로 사계절이 뚜렷하며 여름철에 강우가 집중되는 우리나라의 물순환 특성을 감안한다면, 장기적인 물 순환 해석을 위해서는 지표 유출 해석과 대수층 특성에 따른 유출 해석이 동시에 고려되어야 한다. 기존 수문모형의 지하수 유동 해석 기술은 정확한 지하수 유동 해석에 한계가 있다. 지표수-지하수 연계는 지표수 모형에서 지하수위의 공간적 분포를 표현하기 어려운 단점과 지하수 모형에서 중요한 입력 자료인 함양량의 불확실성에 대한 단점을 상호 보완할 수 있다. 지표수와 지하수의 결합모형 연구 성과들은 1990년대 중반부터 발표되기 시작하였다. 1995년도에 개발된 WDWB(Wetlands Dynamic Water Balance Model) 모형은 다양한 물리과정에 대한 검토와 여러 수치모형을 기반으로 지표수 모형과 지하수 모형의 단점을 보완하였으며(Walton et al., 1995), 1997년도에는 대수층의 매개변수를 분포시키고 양수량을 모의할 수 있는 SWATMOD가 개발되었다(Sopocleous et al. 1997). 1999년도에는 완전분포형 3차원 유출모형인 MIKE-SHE가 개발되었으며(DHI, 1999), 국내에서는 지표수-지하수 연계운영 시스템의 개발로 단기 홍수사상에 적용된 사례가 있다(건설교통부, 1999). 최근에는 SWAT모형과 MODFLOW모형의 연계가 활발히 진행 중이며 MODFLOW의 업그레이드에 따라 연계 모형의 개선이 이루어지고 있으며, Dinial 등(2015)에 의하면 SWAT모형과 MODFLOW-NWT 버전을 이용하여 모형 간의 연계 시도하는 등 다양한 연구가 진행되고 있다.

2. 모형 소개

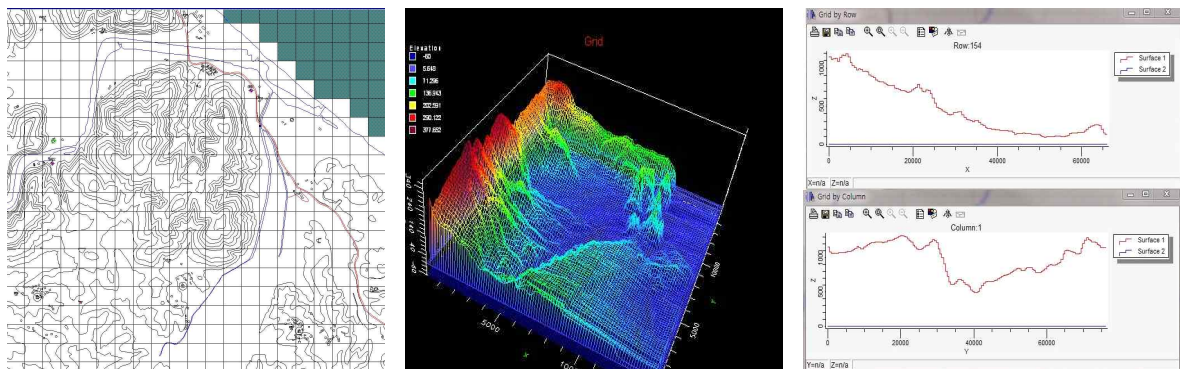
2.1 K-DRUM

K-DRUM은 유역내 수평 유출량산정 모듈로서 평면분포형의 격자형을, 연직분포형의 다층모형을 이용해서 격자기반다층유출모형을 적용한다. 연직구조를 보면 A층은 지표유출이고, B층과 C층은 얇은 지표하 유출로서 B층은 하천으로 유입하고, C층은 하천유량에 영향을 미치지 않는 지하수층으로 가정한다. 본 모형의 특성으로서는 DEM을 이용하여 격자기반으로 지형정보를 수치화하고 GIS를 이용하여 위성영상을 통한 실제 토양 및 토지피복에 대한 매개변수들을 추출하고, 실제와 근사한 하천흐름도를 추출하여 운동역학적인 이론을 기반으로 물의 흐름을 수리학적으로 추적하는 것이다. 또한, 침투능 공극을 통한 흐름과정으로 산정하고 레이더강우자료 등의 격자기반의 분포형강우를 입력할 수 있도록 설계되어 있다. K-DRUM의 경우 지표유출 해석은 운동파 방정식으로 산정하지만 얇은층의 지하수 유동은 선형저류방정식을 사용하기 때문에 지하수 유동의 정확성에 다소 문제가 있을 수 있다.



2.2 MODFLOW

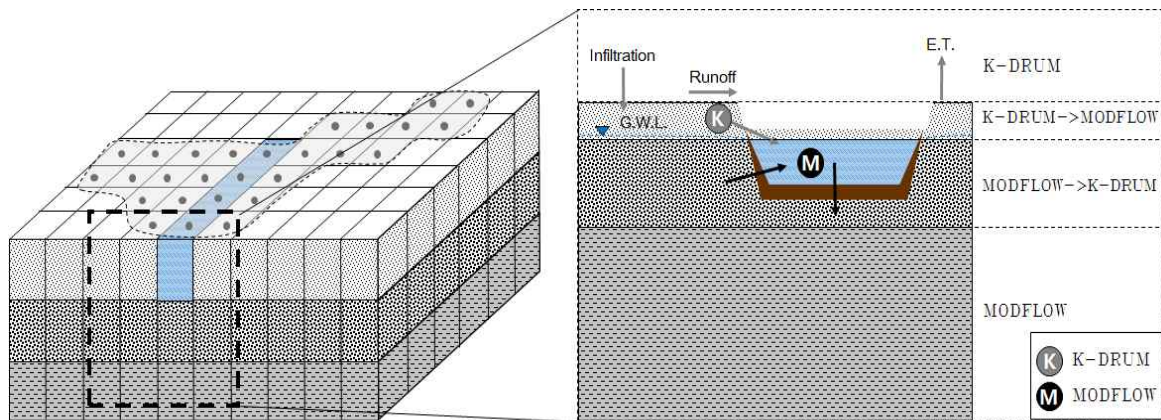
지하수 전문 유동 모델인 Visual MODFLOW는 하천 및 지하수의 시스템적인 흐름을 수치해석에 의해 파악하기 위한 모델이며, 유한차분법과 유한요소법에 근거한 모델이다. 다공질 매체에서 유동하는 유체의 온도와 밀도가 항상 일정하다고 가정한 MODFLOW는 USGS(United State Geological Survey)에서 개발되었다. Fortran 코드로 구성되어 개발된 모델은 모형의 일부가 개선되면서 MODFLOW-2005로 개정되었다(Mcdonald and Harbaugh, 1988, 1996, 2000, 2005). DOS 환경에서 작동되어 사용자의 불편함과 어려움으로 인해 Waterloo Hydrogeologic 에서 Visual MODFLOW를 개발하였다. 사용자에게 편리한 모델링 환경을 제공하며, 2D 또는 3D로 결과를 시각화 하여 이해도를 높일 수 있고, 지하수 흐름과 오염 물질 수동을 동시에 모의 할 수 있다. MODFLOW는 모듈형식의 패키지로 구성되어 있으며, 주 프로그램과 함께 부속적인 프로그램으로 구성되어 있다. 모형을 구축함에 있어 지하수 흐름모의를 위한 하천, 관정, 함양량, 수리전도도 등과 같은 경계조건과 매개변수를 필요에 의해 선택적으로 입력할 수 있다. 지하수흐름에 대한 편미분 방정식을 격자 중심에 대해 해석하여 자유대수층 및 피압대수층 에서의 지하수 흐름을 모의 하면서 비균질대수층 특성을 지닌 흐름의 재유입 등과 같은 복잡한 경계조건을 모두 고려할 수 있다. MODFLOW의 경우 중요한 입력 자료인 함양량의 정밀한 공간분포가 어려우며 주로 사용자 설정에 의해 결정된다.



3. 모형 연계

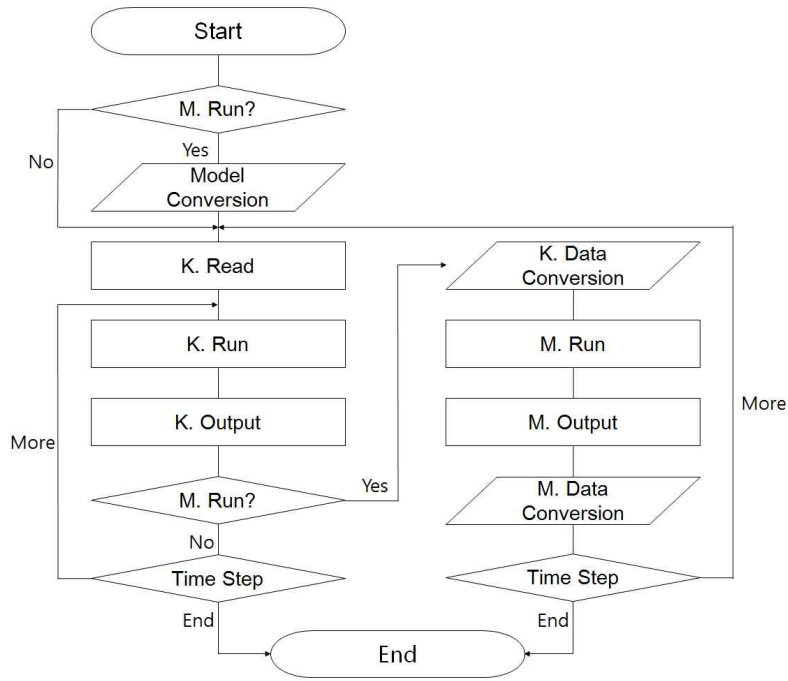
3.1 연계 방법

K-DRUM과 MODFLOW 모형의 연계는 유역유출모형에서 산정된 침투량에 따른 대수층 함양, 지하수 흐름 및 하천과 대수층간의 물 교환을 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 다양한 MODFLOW의 패키지 중 최적의 필수 기능을 선별하였다. MODFLOW는 비포화대수층의 유동을 분석하기 위해 NWT버전을 선택하였으며 제어파일인 NAM, OC, NWT와 지형구축을 위한 BAS, DIS, SFR, 입력자료 및 매개변수와 관련된 UPW, LPF, RCH, WEL, DRN, CHD, GHB 패키지를 사용하였다. K-DRUM과 MODFLOW는 격자기반 모형으로 K-DRUM 모형 구축에 사용된 GIS 데이터를 MODFLOW 입력 자료로 변환하여 추가적인 작업 없이 지하수 모형을 구축할 수 있다. 매개변수의 경우 기준값을 제시하고 사용자가 변경할 수 있도록 GUI에 추가할 예정이다. 지표상의 수문분석은 K-DRUM에서 계산되어진다. K-DRUM에서 계산된 C Layer로의 침투량은 MODFLOW의 함양량으로 공간분포시키며, MODFLOW에서 계산된 하천-대수층간의 물 교환량은 K-DRUM의 유출에 영향을 미치게된다. MODFLOW의 데이터 추출은 OC파일을 통해 시간에 따른 지하수위와 하천 및 대수층간의 물교환을 각각의 셀별로 추출할 수 있도록 구성하였다.



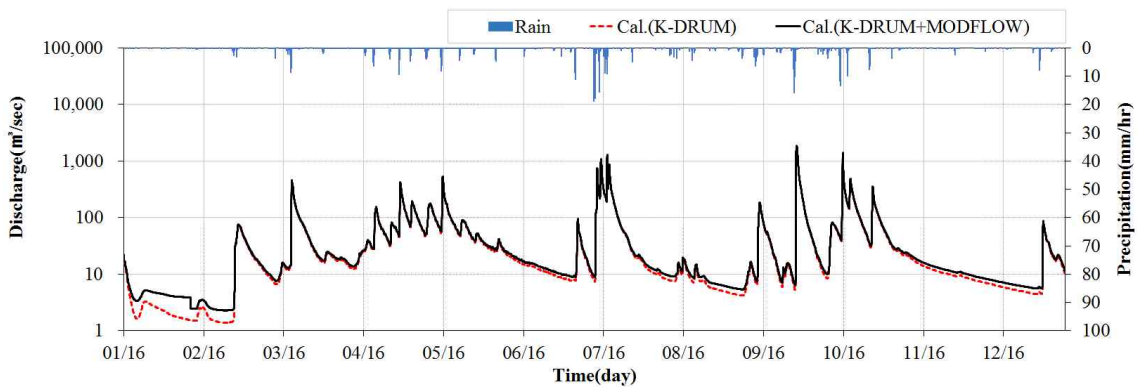
3.2 연계 결과

시험모형의 연구지역은 다목적댐 유역 중 자료의 취득이 용이한 남강댐 유역을 대상으로 하였다. 남강댐 유역은 대부분 산지로 이루어져있으며 고도는 최고 EL.1,800m 수준이며, 지표상 출구점인 남강댐 지점의 고도는 EL.40m 수준이다. 모델 연계에 따른 계산 방식은 아래 그림과 같이 MODFLOW 기능을 활성화시킴으로써 지하수 유동 모의를 할 수 있도록 구성하였다.



* K : K-DRUM, M : MODFLOW

연계 결과 무강우 기간 동안 발생된 기저유출량의 증가로 인해 약 3.5%의 유출량이 증대되는 결과를 보였다. 이는 대수층에서 하천으로 유출이 지속적으로 일어난 것으로 대수층의 특성에 따라 하천-대수층간의 물 교환 해석의 정확성이 향상된 것으로 판단된다.



4. 결 론

본 연구에서는 장기 물순환 해석의 정확성을 높이기 위해 분포형 강우유출모형인 K-DRUM과 지하수 유동해석 모형인 MODFLOW를 연계하는 방법에 대해 제시하였고, 시험적용을 통해 효과를 검토하였다. K-DRUM과 MODFLOW 모형은 격자기반 모형으로써, 상호연계방법은 지표상의

수문분석은 K-DRUM에서 계산하고 K-DRUM에서 계산된 지하층으로의 침투량은 MODFLOW의 함양량으로 활용된다. MODFLOW에서 계산된 하천-대수층간의 상호작용에 의해 하천으로 유출된 유량은 K-DRUM의 하천유출과 더해져 총 유출에 영향을 미치게 된다. 남강댐유역을 대상으로 한 시험적용 결과 K-DRUM 단독 모의에 비해 연계 모의한 결과가 기저유출량 산정에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Daniel Moriasi et al.(2015). A Model Integration Framework for Linking SWAT and MODFLOW, Environmental Modelling and Software, 73, pp.103 - 116.
2. McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh(1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model, U. S. Geological Survey Techniques in Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, p.528.
3. Walton, R., T. H. Martin, Jr., R. S. Chapman and J. E. Davis.(1995). Investigation of Wetlands Hydraulic and Hydrological Process, Model Development, and Application, Wetlands Research Program Technical Report WRP-CP-6 prepared for US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicks-burg, MS.
4. Scopocleous, 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