K-DRUM과 MODFLOW를 연계한 장기유출량 정확도 개선

Improvement of the Long-term Discharge Simulation Linked with K-DRUM and MODFLOW

허영택* · 박구영** · 박진혁*** · 김형산****

Hur, Young Teck*, Park, Gu Young**, Park, Jin Hyeog***, and Kim, Hyung San****

Abstract

In this study, the K-DRUM (K-water Distribution Runoff Model), which is a distributed rainfall runoff model, and MODFLOW (a Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model) are linked to improve the accuracy of base flow. The K-DRUM model and MODFLOW model are set to share the terrain, boundary condition, and input/output data as a grid-based model. The model linkage has shown that the PBIAS has been improved from satisfactory to very good, especially with a distinct improvement in base flow. As a result, it is possible to compensate the difficulties of spatiotemporal distribution of recharge, which is a disadvantage of groundwater flow, and can be utilized in water impact assessment through long-term runoff analysis according to future climate change scenarios.

Key words : K-DRUM, MODFLOW, Long-term Runoff Analysis, Model Linkage, Baseflow

요 지

본 연구에서는 분포형 강우유출모형인 K-DRUM (K-water Distribution Runoff Model)과 3차원 지하수 유동 모형인 MODFLOW (A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model)를 연계하여 장기유출분석을 위한 기저유출량의 정확도를 향상시키고자 하였다. K-DRUM모형과 MODFLOW모형은 격자기반 모형으로 지형, 경계조건 및 입출력자료를 공유하도록 설정하였으며, 모형 간 연계를 통해 PBIAS가 충분함에서 매우 좋음으로 향상되었고 특히 기저유출량이 뚜렷하게 개선되었음이 확인되었다. 결과적으로, 강우유출모형의 단점인 지하수유동과 지하수유동모형의 단점인 함양량의 시공간적 분포의 어려움을 상호 보완할 수 있었으며, 향후 기후변화 시나리오에 따른 장기유출분석을 통해 수자원 영향평가에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : K-DRUM, MODFLOW, 장기유출분석, 모형연계, 기저유출

1. 서 론

기후변화는 자연적 요인과 더불어 산업혁명과 같은 인위적 요인 등에 기인하며, 물 관리 측면에 있어 홍수와 가뭄, 수자원 부족 등을 야기한다. 기후변화가 우리나라의 물 관리

측면에 미치는 영향은 주로 강우 패턴의 변화이며, 사회가 발전함에 따라 증가되는 불투수면적과 수자원 이용량의 증가는 물 관리의 어려움을 심화시킨다. 전 세계적으로 기후변화에 의한 수자원의 불확실성은 인간의 모든 사회와 경제에 영향을 미치고 있으며, 기후변화에 적응하기 위해서는

*정회원, K-water융합연구원 책임연구원(E-mail: korcivil@kwater.or.kr)

Member, Principal Researcher, K-water Convergence Institute, K-water

**정회원, K-water 물순환사업처 사원

Member, Staff, Integrated Water Cycle Business Department, K-water

***정회원, K-water융합연구원 수석연구원

Member, Head Researcher, K-water Convergence Institute, K-water

****교신저자, 정회원, K-water융합연구원 위촉선임연구원(Tel: +82-42-870-7482, Fax: +82-42-870-7499, E-mail: hskim@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Member, Postdoctoral Research Associate, K-water Convergence Institute, K-water

수자원에 관련된 시설물의 정비와 새로운 관리 계획이 마련되어야 할 필요성을 제고하고 있다(Water, 2010). 이를 위해서는 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 분석하고 예측하는 과정이 선행되어야 한다.

과거에는 수문 현상에 대한 분석과 예측을 위한 기술이 강우, 유출, 증발산 및 침투 등 수문시스템에 대한 물수지 분석을 통해 수문량을 계산하거나 추정 하였다. 1970년대에 들어서는 컴퓨터 기술의 발전과 더불어 다양한 수문인자에 대한 관측결과 및 이해를 바탕으로 물리적 접근이 가능하게 됨으로써 수자원의 불확실성을 최소화시킬 수 있었다. 대표적으로 강우유출모형은 강우사상에 대한 수문순환과정을 해석함으로써 재현성이 높은 유출량 결과를 산출해왔다. 하지만 지표상의 유출해석에 비해 상대적으로 미흡한 지표하 유출해석 방법은 강우에 의한 직접유출이 종료된 이후 관측 자료보다 적은양의 유출결과를 나타냈다. 대표적인 지하수 유동모형인 Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model (MODFLOW) 모형의 경우에도 지하수 유동에 따른 수위, 오염물 거동 등 지표하 유동 해석은 우수한 결과를 산출하지만, 지표상의 수문해석은 함양량의 시공간적 분포의 어려움과 패키지 구성의 원인으로 정확한 유출수문곡선을 나타내기에는 한계가 있다. 전 세계적으로 장기적이고 지속가능한 수자원의 개발을 위해 지표수와 더불어 지하수 관리의 중요성이 강조되고 있으며, 우리나라의 지하수관리 기본방향(MOCT, 2002)에서 지하수의 중요성을 강조한 점을 볼 때 지표수와 지하수를 별개가 아닌 통합하여 해석할 수 있는 기술이 필요하다.

지표수와 지하수의 통합분석을 위해 수문모형과 지하수 모형의 연계에 대한 연구는 활발히 지속되어 왔다. 대표적으로는 준 분포형 유출모형인 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)모형(Arnold et al., 1993)과 MODFLOW모형의 연계에 관한 연구가 다수 제시되고 있다(Kim et al., 2008; Guzman et al., 2015). SWAT 모형은 HRU (Hydrology Response Unit)로 구성된 준분포형 모형으로 격자기반인 MODFLOW 모형과의 연계를 위해서는 GRID 형태로 변환하기 위한 Application이 필요하며, SWAT-MODFLOW 연계는 모듈화 된 구조를 갖는 MODFLOW의 강점으로 분석 방향에 따른 다양한 연계가 가능하다는 장점이 있다. 국외에서는 2000년대 후반부터 지표수와 지하수를 고려한 지표수-지하수 통합모형을 활용하여 장기유출분석을 수행하고 있다. 캘리포니아 기후변화센터에서는 VIC 모형을 이용하여 기상, 용적설, 토양특성, 토양수분 해석을 포함한 기저유출을 고려하였으며(CCCC, 2009), 미국지질조사국에서는 PRMS와 MODFLOW를 결합한 GSFLOW를 개발하여 지하수 유동을 고려한 유출분석을 수행하였다(Markstrom et al., 2008).

국내에서는 장래 수자원 부족을 극복하는 차원에서 지표수와 지하수는 별개가 아닌 통합관리 되어야 할 수자원으로 인식이 강조되어왔다(MOCT, 2002). 이에 수자원의 지속적

확보기술개발 연구사업을 통해 준 분포모형인 SWAT모형과 지하수 유동모형인 MODFLOW를 결합한 사례(Kim et al., 2006)와 SWAT모형과 MODFLOW를 결합한 모형을 개발(Kim et al., 2010)하기도 하였으나 연구목적에 따라 적절한 모형을 활용할 수 없는 점에 대해서는 연구사례와 연계모형 활용 측면에서 국외에 비해 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 분포형 강우유출모형인 K-DRUM (K-water Distribution Runoff Model)과 3차원 지하수유동모형인 MODFLOW를 결합하여 HRU단위의 연계모형과는 차별화된 분포형 모형간의 연계를 수행하여 지표수와 지하수 통합분석 및 K-DRUM 모형의 장기유출량 정확도를 향상시키고자 하였으며, 남강댐 유역을 대상으로 적용가능성을 평가하고자 하였다.

2. 모형 개요 및 연계 방법

2.1 K-DRUM 모형

K-DRUM 모형은 물리적 기반의 분포형 강우유출모형으로 K-water에서 개발(Park and Hur, 2008)하였으며 강우유출, 유사, 기초수질항목에 대한 3차원 분석이 가능한 모형이다. 모형의 특징으로는 GIS 및 위성영상을 통해 실제 토지피복 및 토양 특성에 대한 매개변수를 추출하여 적용할 수 있고, DEM을 이용하여 지형정보를 격자형태로 수치화하고 실제와 근사한 하천흐름도를 추출하여 운동역학적 이론을 기반으로 유수의 흐름을 수리학적으로 추적할 수 있다. 모형의 연직구조는 지표층과 얇은 토양층인 A층 및 B층, 지하수층인 C층으로 구성되어 있다(Fig. 1). 지표층에서 지표흐름의 추적은 보편적으로 적용되고 있는 운동파 해석법(Kinematic wave)을 이용하고, A층과 B층에 해당하는 토양 내부로의 침투는 Green-Ampt식(Mein and Larson, 1971)을 이용하여 계산되어지며, B층과 지하수층인 C층의 흐름은 선형저류법을 이용한다. A, B, C각 층의 유출분석을 위한 지배방정식

Fig. 1. Grid Concept Sketch of K-DRUM

및 각각의 변수에 대한 내용은 Beven (1979), Park and Hur (2008) 및 Park et al. (2009)의 연구에서 상세하게 제시하고 있다.

2.2 MODFLOW 모형

지하 대수층에서의 지하수 유동해석을 위한 수치모형 개발은 1983년도에 USGS (United State Geological Survey)에서 시작하였으며 이후 Mcdonal와 Harbaugh에 의해 MODFLOW가 개발되었다(Mcdonald and Harbaugh, 1988). 개발이후 다양한 연구 및 업무에 적용하기 위해 분석기능 개선 및 추가를 통해 현재까지 모형의 개선이 진행되고 있다. MODFLOW는 현재 전 세계에서 가장 범용적으로 사용되는 지하수 유동 수치모형으로써 1983년 개발되어 1988년, 1996년, 2000년, 2005년도에 걸쳐 개선된 버전을 연도를 표기하여 제공하고 있다(K-water, 2017). 현재 MODFLOW-2005버전이 가장 많이 활용되고 있으며, 전문 연구기관에서는 MODFLOW-2005 버전을 기반으로 자체적인 기능개선을 통해 활용하고 있다. MODFLOW는 모듈형식의 패키지로 주프로그램과 부속적인 프로그램으로 구성되어 있다. 모형을 구축하기 위한 경계 조건으로는 지하수 모의를 위한 하천, 관정, 함양량 및 수리전도도가 요구되며, 매개변수를 선택적으로 입력할 수 있다. 지하수흐름에 대한 방정식은 격자 중심에 대해 분석하며 자유대수층 및 피압대수층의 지하수 흐름을 모의하고 비균질대수층 특성흐름의 재유입과 같은 경계조건을 고려할 수 있다.

일정한 밀도의 다공성 매질을 통한 3차원 지하수유동은 편미분 방정식으로 나타낼 수 있으며 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x, y, z 좌표축에 따른 수리전도도, W 는 지하수 단위체적당 체적흐름, h 는 수두, S_s 는 비저류율, t 는 시간, S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 공간의 함수, W 는 시간과 공간의 함수이다.

유한차분법을 이용한 지하수의 흐름방정식은 연속방정식의 적용을 통해 격자내부의 유입 및 유출되는 흐름의 합과 격자내부의 저류변화율과 같아야 한다. 따라서 지하수의 밀도가 일정하다 가정하고 격자의 흐름 평행을 나타내는 연속방정식은 Eq. (2)으로 나타낼 수 있다.

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (2)$$

여기서, Q_i 는 격자로 유입되는 흐름율 (L3T1), S_s 는 비저류율, ΔV 는 셀의 체적, Δh 는 수두변화, Δt 는 시간변화이다.

2.3 K-DRUM-MODFLOW 모형 연계 방법

K-DRUM과 MODFLOW 모형의 연계는 하천과 대수층간의 물 교환을 분석하여 강우에 따라 단기간에 발생하는 유출과 지하수 유동에 따라 장기간에 걸쳐 발생하는 유출을 모두 고려하는데 목적이 있다. K-DRUM 모형은 강우에 따른 단기간의 유출 특성을 분석하는데 유리하지만 강우가 끝난 이후의 유출은 MODFLOW 모형에 비해 정확도 측면에서 다소 미흡하다. 반면에 MODFLOW 모형의 경우 강우가 끝난 이후에도 대수층의 특성과 하천 경계조건에 따라 정량적인 유출 분석이 가능한 장점이 있다. 하지만 MODFLOW 모형도 주요 유입원인 함양량을 정밀하게 시공간적으로 분포시키기 어려운 단점이 있다. 결과적으로, 두 모형간의 장점을 유지하고 단점을 상호 보완한다면 단일 모의에 비해 보다 정확한 유출 분석이 가능하다.

두 모형의 장점을 활용하기 위한 방법은 Fig. 2와 같이 두 모형이 유역을 동일한 크기의 격자형태로 구성하고, 격자는 표층, 얇은 토양층, 깊은 토양층(지하수대 포함) 및 하천으로 구분하여 K-DRUM 모형은 표층과 얇은 토양층을 담당하고 MODFLOW 모형은 깊은 토양층을 담당하게 된다. 유역의 물 순환 측면에서 구분하면 K-DRUM은 강우, 증발산, 침투, 지표면 유출 및 하천 흐름을 계산하고, K-DRUM에서 계산된 깊은 토양층으로의 침투량은 MODFLOW에서는 함

Fig. 2. Scope of Analysis for Each Model

양량으로 입력되어 지하수 유동 분석을 수행하게 된다. 최종적으로 MODFLOW에서 계산된 하천으로의 기저유출량이 다시 K-DRUM의 하천유입량으로 적용되게 되어 강우 유출 해석이 완료된다.

K-DRUM과 MODFLOW 모형을 연계한 경우 두 모형의 계산 흐름을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 'K'로 표시된 것은 K-DRUM을 의미하고, 'M'으로 표시된 것은 MODFLOW를 의미한다.

Fig. 3. Flow Chart of Model Connection

3. 시범유역선정 및 모형구축

3.1 연구대상지

본 연구의 대상지는 지표수와 지하수간의 상호작용을 고려한 장기유출분석을 위해 국가지하수관측망이 다수 위치하고 있고 매년 일정한 유량이 지속적으로 발생하고 있는 남강댐 유역을 연구 대상지로 선정하였다. 남강댐 유역은 K-DRUM을 적용하여 Park and Hur (2009) 및 Chung et al. (2010)의 연구를 통해 모형의 적용성이 분석된 지역으로 본 연구의 대상지로 타당하다고 판단하였다. 남강댐 유역은 대부분 산지로 이루어져있으며 유역면적은 2,285 km²이고 최고 고도는 EL.1,800 m 수준이며, 지표상 출구지점의 고도는 EL.40 m 수준이다. 남강댐 유역의 형상, 하도 및 관측소 정보는 Fig. 4와 같으며 W.L. St는 수위관측소, G.W.L. St는 지하수위관측소, Rainfall St.은 강우관측소를 의미한다. 강우관측소(기상청, 환경부, K-water)는 유역내 총 38개 지점의 시간단위 강우 관측자료를 이용하였고, 역거리가중기법 (Inverse Distance Weigh, IDW)을 통해 관측소간 거리와 강우량 값을 고려하여 공간 보간 하였다. 기상자료는 진주 기상관측소 관측자료(건구 온도, 습구 온도, 풍속, 일조시간)를 이용하였고, 기온의 경우 관측소의 표고와 각각의 격자 표고의 차이를 보정하였다.

Fig. 4. Namgang River Basin

3.2 K-DRUM 모형 구축

K-DRUM 모형 구축을 위해서는 기상정보, 강우정보 외 유역의 수문학적 특성정보가 필요하다. 수문학적 특성정보는 유역의 격자별 표고분포, 흐름방향도, 경사도, 토지피복도, 토지이용도, 토심도 등이 있으며 이와 같은 자료는 GIS 형태의 정보를 활용하여 생성할 수 있다. 격자별 표고분포와 하천선은 국가수자원종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 유역도의 경계선에 맞춰 DEM영역을 생성한 뒤 투영, 좌표 및 해상도 변환 등의 전처리 과정을 통해 생성하였으며, 해상도는 분석의 효율성과 유역특성을 고려하여 500 m × 500 m로 변환하였다. 유역의 흐름방향도는 ArcHydro툴을 이용하여 생성하였으며, 경사도는 Spatial analyst tools을 이용하여 DEM을 H/L 경사도로 변환하여 적용하였다(Fig. 5). 유역의 토지피복도와 토양특성에 따른 매개변수는 각각의 격자에 적용되며, 종류별 적용된 값은 Table 1과 같다. GIS를 통해 생성된 모든 자료는 ASCII 형태의 파일로 변환하여 모형의 입력 자료로 사용되며, K-DRUM 유출분석을 위해 모형을 구축하였다.

3.3 MODFLOW 모형 구축

지하수 유동을 고려하기 위한 연계모형인 MODFLOW 모형은 K-DRUM 모형과 동일한 격자형 모형으로써 K-DRUM 모형에 구축된 지형공간정보를 MODFLOW의 입력자료 형태로 변환하여 구축할 수 있다. K-DRUM 입력자료 중 DEM과 유역도 자료는 활성/비활성 셀로 구분하고 격자 크기 및 격자별 표고분포를 추출하여 BAS (Basic), DIS (Discretization) 파일을 구축할 수 있다. 구축된 격자는 K-DRUM과 동일한

Fig. 5. Topographic Characteristics

Table 1. Classification of Land

Class	Description	Roughness
1	Water Area	0.030
2	Urbanization	0.015
3	Eroded Land	0.035
4	Marsh	0.050
5	Grassland	0.130
6	Forest	0.100
7	Paddy Field	0.050
8	Cropland	0.035

500 m × 500 m, 총 9,147개의 격자로 이루어져있다. 하천 정보는 자체적으로 구축한 틀을 이용하여 하천수와 지하수의 원활한 물 교환을 고려할 수 있도록 최적의 SFR(Stream Flow Routing) 패키지를 구축하였다. 하천 격자정보는 DEM을 통해 구축된 하천선과 각 하천선 격자의 표고를 추출하여 생성할 수 있으며, 격자별 하천정보 중 하천 폭은 남강댐 하천정비기본계획의 지점별 측정 자료를 선형보간 하였고, 바닥특성, 조도계수 등은 계측된 자료가 없어 지하수위관측소의 관측 수위자료와 모형의 지하수위 결과 값을 보정하는 매개변수로 활용하였다. 구축된 하천은 K-DRUM 모형에 적용된 540개 격자 중 매우 작은 지류 35개의 격자를 제외한

총 505개의 격자로 구성되었으며, 29개의 세그먼트를 갖는다. 대수층의 구조는 국가지하수관측망(GIMS)에서 제공하는 남강댐 유역 내 6개 관측소의 정호구조도를 참고하여 2개의 층으로 구성하였으며, 각 층별 투수계수는 정호구조도에서 제시하고 있는 지층 구조 및 평균 투수계수, 문헌에서 제시하는 투수계수 범위를 참고하여 Table 2와 같이 설정하여 적용하였다. 초기지하수위는 하천과 지하수위, 투수계수 등에 따라 유출 분석에 있어 민감하기 때문에 6개 관측소의 지하수위의 평균값을 적용하고 10년간의 선행 모의를 통해 초기 지하수위를 안정화하였다.

Table 2. Estimated Parameters for Model

Parameter		Kx	Ky	Kz
Hydraulic conductivity (cm/s)	1 Layer	1.51E-5	1.51E-5	1.51E-6
	2 Layer	5.79E-6	5.79E-6	5.79E-7
Specific yield (dimensionless)		2.00E-1		
Specific storativity (1/m)		1.50E-5		

4. 연계 모형 평가

연계 모형의 평가 기간은 2016년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년으로 하였으며, 3가지 항목에 대해 평가하였다. 평가 항목은 지하수 함양량의 공간분포와 하천-대수층간의 상호작용으로 무강우기간 동안 발생하는 유출 특성으로 정하였다. 유출 특성은 K-DRUM 단일 모의와 연계 모형 모의를 통해 각 모형간의 유출량 결과를 비교하는 것으로 평가하였다.

4.1 지하수 함양량의 공간분포

지하수 함양량은 지하수 모델링의 주요한 유입원으로써 재현성을 검증하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 공간분포된 함양량의 수준이 적절한지 파악하기 위해 K-DRUM 모형에서 계산된 일단위 함양량을 Fig. 6과 같이 공간 분포된 1년간의 총 함양량으로 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 지하수 함양량의 공간적인 분포를 잘 표현하고 있으며, 토양 및 대수층의 특성에 따라 일부 함양이 없는 부분도 나타나고 있다. 그림에서 왼쪽 지점과 오른쪽 지점의 함양량의 차이가 발생하는 이유는 유역 내 39개 기상관측소에서 관측된 강우량의 편차가 크기 때문이며, 2016년도 관측 지점별 연강우량은 최대 1,241 mm의 차이를 보였다. 지하수 모형에 적용된 1년간의 총 함양량은 단위면적당 57 mm/year로 다소 낮게 산정되었다. 이는 유역의 큰 고도차로 인해 침투수가 지하수대로 함양되기 전 많은 양이 중간유출에 기여한 것으로 향후 K-DRUM 모형의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 6. Spatial Distribution of Groundwater Recharge (annual)

4.2 연계모의에 따른 유출 비교

K-DRUM 모형은 선형저류법에 의해 지하수가 하천으로 유출되는 현상만 분석이 가능한 반면, 연계 모형은 하천수위와 지하수위, 대수층의 수리학적 특성에 따라 하천에서 대수층으로의 유입도 고려할 수 있다. 따라서 하천-대수층간의 상호작용을 통해 교환되는 수량이 적절히 산정되는지 확인하기 위해 K-DRUM 단일 모의 결과와 연계모의 결과를 비교하였다. Fig. 7은 2016년도 1월 1일부터 12월 31일까지

1년간의 강우 유출 모의 결과를 보여준다. K-DRUM 단일 모의 결과 강우에 의한 직접 유출과 침투 유량은 유사하게 분석되는 것으로 나타났으나 강우가 끝난 이후 유출량이 다소 급하게 줄어들었으며, 무강우기간 동안의 유출량은 관측 값에 비해 적게 분석되었다. 반면에 연계 모의 결과 강우가 끝난 이후 유출량이 서서히 줄어들었으며, 무강우기간 동안의 유출량이 관측 값과 유사한 수준으로 분석되었다. 일정한 기저유량이 발생되며 유출곡선의 하강이 완만하게 분석된 이유는 MODFLOW 모형에서 계산된 하천-대수층간의 상호작용에 의해 지하수가 하천수에 일부 기여한 것으로 단일모의에 비해 연계모의가 보다 정확한 유출량을 산정하는 것으로 판단된다. 연간 관측된 유량 중 6월과 9월 기간의 관측 값을 보면 연계모의 결과보다는 다소 낮게 측정되어 있다. 이는 해당 기간의 강우량 대비 관측수위가 다른 기간 동안의 관측수위와 상이한 패턴을 보이면서 낮게 측정된 것으로 보아 6월과 9월 기간의 관측 값이 자연 유출량이 아닌 하천 취수 등 인위적인 영향이 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

모형에 의해 산정된 유량과 관측유량의 정량적인 신뢰성 평가를 위해서는 주로 평가지수가 이용된다. K-DRUM 단일 모의 결과와 연계 모의 결과를 평가하기 위해 Moriasi et al. (2007)과 Kim et al. (2012)에서 적용한 무차원 지수인 효율성 지수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE), 지시오차 통계 기법인 평균편차의 비율(Percent BIAS, PBIAS), 평균제곱근 오차 대 관측값 표준편차 비율(RMSE-observations standard deviation ratio, RSR)을 적용하였으며, 분석결과는 Table 3과 같다. K-DRUM 단일 모의 결과의 경우 PBIAS가 충분함에서 연계 후 매우 좋음으로 변경되었으며, 연계 모의 결과 단일 모의 대비 평가지수가 전체적으로 향상되는 것으로 분석되었다.

Fig. 7. Results of the Runoff Comparison According to a Single Simulation (K-DRUM) and an Associated Simulation (K-DRUM & MODFLOW)

Table 3. Validation Results

Case	NSE		PBIAS(%)		RSR	
K-DRUM	0.87	Very good	21.47	Satisfactory	0.36	Very good
K-DRUM&MODFLOW	0.88	Very good	6.80	Very good	0.34	Very good

5. 결 론

본 연구에서는 장기유출량의 정확도 개선을 위해 분포형 강우유출모형인 K-DRUM 모형과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW 모형을 연계하였다. 모형 간 수문 해석 범위에 있어 K-DRUM은 기상과 지표 영역의 수문 해석을 담당하였으며, MODFLOW는 지하 영역의 수문 해석을 담당하였다. 지하 영역의 수문 해석을 위한 MODFLOW 모형은 K-DRUM 모형의 입력 자료를 변환하여 동일한 해상도의 지형 공간 정보를 반영하여 구축하였다. MODFLOW의 주요 유입원인 함양량은 K-DRUM 모형에서 분석된 지하수 함양량을 시공간적으로 분포시켜 적용하였으며, MODFLOW 모형에서 계산된 하천-대수층간의 상호작용에 의한 물 교환량을 분석할 수 있도록 하였다. 남강댐 유역을 대상으로 2016년도 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간의 장기유출분석 결과 K-DRUM 모형의 단일 모의에 비해 3차원 지하수 유동해석이 반영된 연계모의가 보다 정확한 유출량을 산정하는 것으로 나타났다. 특히, 무강우기간에 발생하는 관측 유출량이 K-DRUM 단일모의에 비해 연계모의가 매우 높은 재현성을 보여 장기유출분석을 위해서는 지하수 유동을 고려한 보다 정확한 기저유출량의 산정이 필요할 것으로 판단된다. K-DRUM 단일 모의 결과와 연계 모의 결과를 평가하기 위해 NSE, PBIAS 및 RSR을 적용하여 분석한 결과 PBIAS가 충분함에서 연계 후 매우 좋음으로 변경되었으며, 단일 모의 대비 평가지수가 전체적으로 향상되는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 모형간 연계에 따른 유출분석의 결과가 기존 K-DRUM 모형의 결과보다 개선이 되는지를 분석한 것으로 적용된 유출사상이 1년으로 매우 한정적이나 모형간의 연계효과가 기존대비 개선되는 효과를 분석하는 것에 중점적으로 연구를 수행하였다. 향후 본 연구결과를 바탕으로 향후 다양한 사상에 대해 모형의 검증이 필요할 것이라 생각하며, 향후 기후변화 시나리오 등 이상기후현상을 반영한 수자원 영향 평가에 활용 가능할 것이라 판단한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(18AWMP-B083066-05).

References

- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, Vol. 142, No. 1-4, pp. 47-69.
- Beven, K. (1979). On the generalized kinematic routing method. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1238-1242.
- CCCC (California Climate Change Center). (2009). *Using future climate projections to support water resources decision making california*, California Department of Water Resources.
- Chung, S.Y., Park, J.H., Hur, Y.T., and Jung, K.S. (2010). The parallelization effectiveness analysis of K-DRUM model. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 21-30.
- GIMS (Integrated Ground Water Information System). Retrieved from <https://www.gims.go.kr/>
- Guzman, J.A., Moriasi, D.N., Gowda, P.H., Steiner, J.L., Starks, P.J., Arnold, J.G. et al. (2015). A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 73, pp. 103-116.
- Kim, H.S., Kang, S.U., Hwang, P.S., and Hur, Y.T. (2012). Snow melting simulation of Gwangdong Dam basin in the spring season using developed K-DRUM model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 6B, pp. 355-361.
- Kim, N.W., Chung, I.M., and Won, Y.S. (2006). An integrated surface water-groundwater modeling by using fully combined SWAT-MODFLOW model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5B, pp. 481-488.
- 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.
- Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., Lee, J.W., Kim, C.G., Kim, J.T., et al. (2010). *Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model*. SWRRC

Technical Report 2010-14.

- K-water. (2017). *Coupling of Long-term Surface Runoff and Ground Water Movement*.
- Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., and Barlow, P.M. (2008). *GSFLOW, coupled ground-water and surface-water flow model based on the integration of the precipitation-runoff modeling system (PRMS) and the modular ground-water flow model (MODFLOW-2005)*. Techniques and Methods, 6-D1, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. Techniques of Water Resources Investigations Report, 6-A1, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Mein, R.G., and Larson, C.L. (1971). *Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process*. Water Resources Research Center, University of Minnesota, Bull. 43.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation). (2002). *Master plan of groundwater management*.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Park, J.H., and Hur, Y.T. (2008). Development of kinematic wave-based distributed model for flood discharge analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 5, pp. 455-462.
- Park, J.H., and Hur, Y.T. (2009). A development of auto-calibration for initial soil condition in K-DRUM model. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 17, No. 2, pp. 71-79.
- Park, J.H., Hur, Y.T., Ryoo, K.S., and Lee, G.S. (2009). Flood runoff simulation using GIS-grid based K-DRUM for Yongdam-Dam watershed. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1D, pp. 145-151.
- Water, U. N. (2010). *Climate change adaptation: The pivotal role of water*. Ginebra, Suiza.
- WAMIS (Water Resources Management Information System). Retrieved from <http://www.wamis.go.kr/>

Received	October 2, 2018
Revised	October 8, 2018
Accepted	October 17, 2018