지하수 이용과 농업용 저수지가 하천유량에 미치는 복합 영향 Combined Effects of Groundwater Abstraction and Irrigation Reservoir on Streamflow

김 남 원* / 이 정 우** / 정 일 문*** / 이 민 호****

Kim, Nam Won / Lee, Jeongwoo / Chung, Il Moon / Lee, Min Ho

Abstract

In this study, a watershed-based surface-water and groundwater integrated model, SWAT-MODFLOW was used to evaluate streamflow depletion induced by groundwater withdrawals and irrigation reservoirs for the Juksan-cheon watershed in South Korea. The streamflow responses to groundwater pumping and irrigation reservoirs were simulated under several different scenarios. The scenarios were (1) current pumping well withdrawals with reservoirs; (2) current pumping well withdrawals without reservoirs; (3) no pumping well withdrawals with reservoirs; (4) no pumping well withdrawals without reservoirs (natural condition). The simulated results indicated that the effects of groundwater pumping on streamflow depletion are a little more significant than those of irrigation reservoirs. Particularly, the groundwater withdrawals with irrigation reservoirs at current status (scenario 1) has induced the decrease of more than 20% in drought flow against the natural condition (scenario 4) at the outlet of the watershed. The specific drought flows through the main stream of Juksan-cheon watershed were simulated in order to assess the irrigation effects on downstream flows. It was found out that the specific drought flows are increasing as the distance from the reservoir increases due to the accumulation of the return flows to stream.

Keywords : groundwater withdrawal, irrigation reservoir, streamflow depletion, SWAT-MODFLOW

요 지

본 연구에서는 죽산천 유역에 대해 지표수와 지하수의 통합거동을 유역 스케일로 장기간 모의할 수 있고 양수정의 공간분포 및 저수지 운영을 복합적으로 고려할 수 있는 유역단위 통합수문해석모형 SWAT-MODFLOW를 적용하여 지하수 양수 및 농업용 저수지가 하천유량에 미치는 영향을 평가하였다. 지하수 양수 및 농업용 저수지 고려 유무에 따라 4가지 시나리오((1) 현 지하수 이용량 고려, 저수지 고려, (2) 현 지하수 이용량 고려, 저수지 미고려, (3) 지하수 이용량 미고려, 저수지 고려, (4) 지하수 이용량 미고려, 저수지 미고려(자연상태))를 구성하고 각 시나리오별로 하천유량의 변화를 모의한 결과, 죽산천 유역 출구부를 기준으로 지하수 양수로 인한 영향이 농업용 저수지에 의한 영향 보다 상대적으로 크게 발생하였으며, 갈수량은 용수이용이 없는 자연 상태(natural flow)에 비해서 지하수 양수만의 영향으로 약 17%,

* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구위원 (e-mail: ljw2961@kict.re.kr)

Corresponding Author, Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실, 연구위원 (e-mail: imchung@kict.re.kr)

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

**** 한강홍수통제소 하천정보센터, 연구사 (e-mail: leeminho@korea.kr)

Han River Flood Control Office, 328 Dongjakdae-ro, Seocho-gu, Seoul 137-049, Korea

저수지만의 영향으로 약 11%, 양수 및 저수지의 복합영향으로 인해 약 23% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 농업용 저수지로부터 떨어진 거리에 따른 하천유량의 변화를 평가하기 위해서 죽산천 본류를 따라 비갈수량을 산정한 결과, 저수지 관개용수의 회귀수 영향으로 하류로 내려갈수록 비갈수량이 증가하였으며, 죽산천 상류에 위치한 덕산 저수지로부터 약 6.5km까지는 저수지의 영향이 상당히 미치는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 지하수 양수, 농업용 저수지, 하천수 감소량, SWAT-MODFLOW

1. 서 론

하천유량에 영향을 미치는 대표적인 인위적 요인으로 저수지 운영, 하천수 취수, 하수처리수 방류, 지하수 채수, 토지이용변화 등을 들 수 있으며, 특히 중소하천유역에서는 과도한 지하수의 채수로 인한 지하수위 저하와 농업용 저수지의 관개용수 공급이 하천유량 감소에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 안정적인 하천수 취수, 하천유지유량 공급, 환경개선용수 확보, 하천건천화 예방 등의 인간 활동 및 수생태계 유지를 위해서는 저수지 관개, 지하수 이용과 같은 인위적인 요인이 하천에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

지하수의 채수로 인한 하천유량에 미치는 영향을 분석한 연구 사례로, Lee et al. (2006)은 안양천 상류유역에 대해 준분포형 장기유출모형인 SWAT을 이용하여 지하수 취수량과 건기의 하천유출감소량 간의 관계를 도출하였고, Lee (2008)는 갑천 유역에 개선된 탱크모형 TANK-GS를 적용하여 지하수 양수 시나리오에 따른 기저유출량과 하천에서 대수층으로의 유도함양량의 변화를 평가하였다. Chung et al. (2011)은 지표수와 지하수의 통합거동을 유역 스케일로 장기간 모의할 수 있고 양수정의 공간분포를 고려할 수 있는 유역단위 통합수문해석모형 SWAT-MODFLOW를 무심천 유역에 적용하여 지하수 양수 시나리오에 따른 수문성분해석을 수행하고, 대수층 저류량과 하천유량의 변화를 고려한 지하수 개발가능량 산정 방법을 제안하였다. Kim et al. (2012)은 북하천 지류인 신둔천 유역에 대해 SWAT-MODFLOW를 적용하여 유역내 지하수 양수로 인해서 연평균 하천유량이 양수전에 비해 10% 넘게 감소하였고 특히 겨울철 비닐하우스 지역의 수막시설재배를 위한 과잉 양수로 인한 지하수위 저하 영향이 농번기 4, 5월까지 지속되어 갈수량이 약 40% 만큼 감소함을 보였다. MLTMA (2010)에서는 갑천, 남천, 경안천, 왕숙천 4개의 시범지역을 선정하여 SWMM-GE 모형을 이용하여 지하수 이용, 토지이용변화, 하천수 취수, 하수처리, 저수지 운영 등에 대한 하천 건천화에 미치는 기

여특성을 분석하였고, 지하수 이용과 저수지 운영 영향이 하천유량 감소에 가장 지배적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

농업용 저수지가 하천유량에 미치는 영향을 분석한 국내 연구로서 Park et al. (2007)은 안성천 유역내 공도수위 관측소 지점의 상류유역을 대상으로 유역내 고삼 및 금광 농업용 저수지 지점 및 공도 지점에서 저수지의 고려 유무에 따른 하천유출 거동을 SLURP 모형을 이용하여 분석하였다. Lee et al. (2008)은 관측 저수위로부터 계산된 저수량과 수표면적을 이용하여 저수지의 일 방류량 자료를 생성하도록 SWAT 모형의 저수지 물수지 분석모듈을 수정하고 이를 안성천 유역내 공도수위관측소 상류유역에 적용하여 농업용 저수지의 고려 유무에 따른 하천유출 거동을 분석하였다. Oh and Kim (2007)은 농촌지역 수문 자료 축적을 위한 시험지구로 경기도 용인시, 평택시, 안성시 사이에 위치한 이동시험지구를 대상으로 실제 농업용 저수지의 용수공급 운영에 따른 하천의 유출특성을 관측하여 농업용 저수지가 하천에 미치는 시기별 영향을 분석하였다. Kim et al. (2008)은 경기도 용인시에 위치한 이동저수지 상류유역에 대해 SWAT 모형으로 장기유출모의를 수행하여 하천유출량이 강우전 저수지의 저수량과 관개기의 용수공급의 영향을 받고 있음을 나타내고, 농촌 유역의 유역물수지나 유역유출 분석시 유역내의 저수지 규모와 관개면적을 고려한 분석이 필요함을 강조하였다. Kim et al. (2009)는 SLURP모형을 이용하여 안성천 유역에 위치한 농업용 저수지가 하천유출에 미치는 영향을 분석하여 저수지 유무에 따른 유량변동이 풍수량(95일)과 갈수량(355일)에서 크게 발생함을 보여주었다.

상기의 연구 사례처럼 지하수 양수를 고려할 수 있거나 저수지 운영 효과를 반영할 수 있는 장기유출해석 모형을 이용하여 지하수 양수 혹은 농업용 저수지 각각의 요인별 하천유량 변화를 분석하는 연구가 2000년대 중반 이후부터 본격적으로 수행되어오고 있다. 그러나 하천에 영향을 미치는 인위적 요인들의 개별적 영향을 다루었을 뿐, 요인들의 복합적인 영향을 다룬 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 농촌유역을 대상으로 지하수 양수 및 농업용 저수지의 복합적인 영향을 평가하고자 하였으며, 이를 위해서 지표수와 지하수의 통합거동을 유역 스케일로 장기간 모의할 수 있고 양수정의 공간분포를 고려할 수 있는 유역단위 통합수문해석모형 SWAT-MODFLOW를 경기도 안성에 위치한 죽산천 유역에 적용하여 지하수 이용 및 농업용 저수지 운영이 하천유량에 미치는 개별적 영향 및 복합적 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 대상 유역

죽산천은 Fig. 1과 같이 덕산저수지에서 발원하여 청미천에 합류되는 지방하천으로 기점은 안성시 삼죽면 덕산리 중점은 안성시 일죽면 월정리이다. 유역면적이 54.20 km²로서 청미천 유역 전체 면적의 약 8.7%를 차지하고 있으며, 유로연장은 15.32 km, 유역평균경사는 16.1%, 유역평균폭(A/L)은 3.78 km, 유역형상계수(A/L^2)는 0.26이다. 유역의 고도는 청미천 합류부근 해발 60 m부터 유역 남쪽 경계에 있는 칠장산의 해발 492 m까지 분포하고 있으며, 평균고도는 해발 154 m이고 해발 100 m 이상의 지역이 약 80%를 차지하고 있다. 죽산천 유역은 행정구역상 경기도 안성시 죽산면과 삼죽면에 속하며, 농경지 21.86 km² (39.75%), 임야 31.81 km² (57.81%), 도시 0.45 km² (0.82%), 초지 0.89 km² (1.62%)로 구성되어 있다(Gyeonggi Provincial Government, 2003).

죽산천 유역의 특징으로서 농경지가 많이 분포하고 수개의 산업단지도 위치해 있어 지하수 이용도가 높고 또한 농어촌공사에서 관할하는 덕산, 장계, 용설 등의 농업용

저수지가 위치해 있어 하천유량은 지하수 이용 및 저수지 관개의 영향을 크게 받고 있다. 따라서 지하수 양수 및 관개기 용수공급에 따른 하천수 변동이 큰 지역임으로 지하수 양수 및 저수지 영향을 고려한 정교한 유출 분석이 이루어져야 한다. 유역 면적 규모도 지하수 이용의 영향이 하천에 나타날 수 있을 정도로 본 연구의 분석 대상으로 적절하다. 유역내 농경지가 약 40%로 상당부분 차지하고 있으며, 논 지역은 저수지로부터 농업용수 공급의 혜택을 받을 수 있지만 밭 지역은 지하수 의존도가 높다.

2.2 SWAT-MODFLOW 모형

미국 농무성에서 개발된 유역수문모형 SWAT (Arnold et al., 1993)은 CREAMS (Knisel, 1980), GLEAMS (Leonard et al., 1987), EPIC (Izaurralde et al., 2006)을 통합한 SWRRB (Arnold et al. 1990) 모형을 근간으로 하고 있으며, 여기에 하도내 유출 및 유사의 추적을 모의하는 모형인 ROTO (Arnold et al., 1995)가 결합된 구조를 가지고 있다. SWAT으로 모의할 수 있는 주요 성분요소는 수문, 기상, 유사, 토양온도, 작물성장, 영양물질, 살충제, 농업관리 등이다. 이 중 수문성분 모의 절차는 강수차단, 지표 유출 및 침투, 증발 및 증산, 중간유출 및 침투, 함양, 지하수 유출 순으로 이루어진다. 지표유출량은 토양수분량에 따라 유출곡선지수값(CN)을 계산하는 수정 NRCS 유출곡선지수법을 근간으로 산정되며, 이 외에 Green-Ampt 방식에 의해서도 산정될 수 있다. 잠재증발산량은 Penman-Montieth, Priestley-Taylor, Hargreaves 방식의 3가지 중 하나를 선택하여 계산할 수 있다. 중간유출량은 토양층의 포화수리전도도, 경사장 및 경사 등의 함수인 운동학적 저류모델(kinematic storage model)로 계산되며, 연직하향으로의 침투량은 저류추적법(storage routing method)을 이용하여 중간유출량과 동시에 계산된다. 토양층 최하단부를 통과한 물이 얇은 대수층까지 도달하는 지하수 함양량은 시간적 지체를 고려하기 위해서 지수형 감쇠 가중함수로 나타내고 있으며, 지하수 유출량 역시 감쇠 가중함수를 사용하여 금일 함양량과 작일배출량의 가중합으로 계산된다. 상기 절차에 따라 계산된 각 소유역내 HRU (Hydrologic Response Unit)별 지표유출, 중간유출, 지하수 유출량은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 유입되며 하도추적 과정을 거쳐 유출량이 산정된다. SWAT에서 필요한 기상 변수들은 일단위의 강수량, 최대/최소온도, 상대습도, 풍속, 일사량 등이며 관측 자료로부터 입력되거나 SWAT에 내제되어있는 추계학적 기상모의발생 모형인 WXGEN (Sharply and Williams, 1990)을 이용하여 모의 기간 중에

Fig. 1. Study Watershed

모의 발생된다. 침식(erosion)과 유사량은 수정범용토양침식공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE, Williams, 1975)에 의해 각 HRU에 대해서 추정된다. SWAT에서 토양 온도는 전일의 토양온도, 연 평균 기온, 현재일의 지표면온도, 토양층 깊이 등의 함수로 계산된다. 작물생장 모의는 EPIC (Izaurre et al., 2006) 모형의 방법을 따르고 있으며, 성장률이 온도상승과 비례관계가 있다는 가정하에 기준온도를 초과하는 일 평균기온의 합인 온도량(heat unit)의 함수로 수관 높이, 뿌리, 엽면적 등의 생장을 모의한다. SWAT에서 다루고 있는 영양물질(nutrients)은 질소와 인으로, 유기 형태에서 무기 형태로의 순환 과정과 하천으로의 운송과정을 모의한다. 살충제의 이동과 운명은 GLEAMS (Leonard et al., 1987) 모형의 방법을 따라 모의된다. 농업관리는 SWAT은 사용자가 각 HRU별로 여러 가지 관리(management) 방법을 다양하게 적용시킬 수 있다. 작물의 생장 사이클, 시비와 살충제 투여시기, 생체량의 제거, 관개기간, 물이용 등과 같은 농업 관리 기능을 적용시킬 수 있다. 자세한 모의 절차는 SWAT 모형의 이론(Neitsch et al., 2005)을 참조할 수 있다.

지하수 유동 모의를 위해 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)는 연속방정식과 Darcy 법칙을 통해 유도된 지하수 유동 방정식을 유한차분법에 의해 수치해를 구하는 3차원 지하수 유동 해석 모형이다. MODFLOW 모형은 주 프로그램과 여러 모듈(module)이라고 불리는 서브루틴을 갖고 있으며, 이 모듈들은 패키지(package)로 묶여진다. 하천(RIVER), 배수(DRAIN), 함양(ReCHARGE), 증발산(EVapoTranspiration), 우물(WELL), 일반수두경계(General Head Boundary) 등의 여러 패키지과 PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), SIP (Strongly Implicit Procedure), SOR (Successive Over-Relaxation) 등의 해석기(solver)가 있어 사용자가 선택하여 사용할 수 있다.

SWAT 모형은 수리지질특성 및 인위적인 지하수 이용의 공간분포를 정밀하게 구현하는데 한계가 있고, MODFLOW는 지하수 흐름 해석을 제외한 나머지 물 순환성분에 대한 해석방법이 포함되어 있지 않아 주요 입력 자료인 지하수 함양량 및 하천수위의 결정에 어려움이 많다. 따라서 두 모형간의 단점을 상호 보완하기 위해서 결합된 모형이 SWAT-MODFLOW 모형(Kim et al., 2004; Kim et al., 2008)이다. 이 모형에서는 MODFLOW가 SWAT 내에서 호출되는 형식으로 결합되었으며, 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT모형으로부터 추출하여 MODFLOW모형의 함양 패키지 통해 자동 입력되고, 하

천과 대수층의 상호작용을 모의하기 위해 SWAT의 하도 추적 서브루틴과 MODFLOW의 하천 패키지가 연동된다. 또한 SWAT의 증발산 계산 서브루틴과 MODFLOW의 증발산 패키지, 그리고 SWAT의 물이동 계산 서브루틴과 MODFLOW의 우물 패키지 및 배수 패키지와의 서로 연결되어 있다.

2.3 저수지 모듈 및 양수 모듈 개선

2.3.1 저수지 모듈 개선

SWAT-MODFLOW 모형에서는 SWAT 모형의 저수지 모듈을 따르고 있으며, 저수지, 못, 습지, 요면/지호와 같은 4가지 저류형태에 대해 저류지 추적을 통해 유역모의를 수행한다(Neitsch, 2005). 모형에서 저수지 저류량에 대한 물수지는 다음 Eq. (1)과 같다.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (1)$$

여기서, V 는 금일 저류량(m^3), V_{stored} 는 전날 저류량(m^3), V_{flowin} 은 저수지 유입량(m^3), $V_{flowout}$ 은 저수지 방류량(m^3), V_{pcp} 는 저수지내 강수량(m^3), V_{evap} 는 저수지 증발량(m^3), 그리고 V_{seep} 는 침투로 인한 손실량(m^3)이다. 저수지 물수지를 계산하기 위해서는 저수지 방류량 자료가 필요하며, 모형에서는 관측일방류, 관측월방류, 평균 연방류, 목표방류 등의 4가지 방법 중 하나를 사용자가 택하여 저수지 방류량을 계산하게 된다. 그러나 연구 대상 유역내 농업용 저수지로부터 하천으로의 방류량 자료뿐만 아니라 관개 수로를 통한 관개용수량 자료 또한 존재하지 않아 모형에서 제공하고 있는 저수지 방류량 산정 방법으로는 저수지 물수지를 수행할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 저수지 방류량 자료가 없는 대신 관측 저수율 및 저수량 자료와 Eq. (1)을 이용하여 방류량을 추정하도록 모형의 저수지 모듈을 개선하였다.

Eq. (1)을 저수지 방류량 $V_{flowout}$ 에 대해 전개하면 다음 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{flowout} = \Delta V_{stored} + V_{flowin} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (2)$$

여기서, ΔV_{stored} 는 저수량 변화량으로 전날과 금일의 저수량의 차이이다. 즉, 저수지 방류량은 관측저수량 변화량에 저수지로의 모의 유입량과 일별 저수면적으로부터 계

산된 강수량을 더하고, 일별 저수면적으로부터 계산된 저수지내 강수량과 저수지 바닥 토양층을 통한 침투로 인한 손실량을 감하여 추정하는 절차에 따라 산정된다. 이와 같은 절차는 Lee et al. (2008)의 논문에서 제시한 저수지 모듈과 유사하다. SWAT의 저수지 추적 서브루틴 res.f에서 저수지 방류량, 증발량, 침윤량 등을 계산하게 되는데, 여기서 입력자료로 일별 관측 저수율과 저수량 자료를 읽어 들이고 Eq. (2)에 따라 저수지 방류량이 계산되도록 수정하였다. 또한 이 서브루틴에서는 추정된 방류량을 농업용 저수지로부터 하천으로 직접 방류되는 양과 관개수로로 우회하여 방류되는 관개용수량으로 구분되게 하였으며, 이를 위해서 관개기에는 홍수기 만수율(100%)에 도달한 경우(하천으로 직접유출 발생토록 처리)를 제외하고는 방류량 모듈을 관개용수량과 같게 놓았고, 비관개기에는 저수율이 만수율에 이르면 방류량 모듈을 하천으로 직접 유출된 양으로 간주하고 저수율이 만수율보다 작은 경우에는 방류량을 0으로 놓아 하천으로의 직접유출이 발생하지 않도록 처리하였다. 관개용수량은 수해지역(논 지역) HRU의 피복 강수량에 더해지도록 하고 그 일부가 토양으로 침투한 후 증발산에 의한 작물소모에 의한 손실과 지표 및 토양을 통한 유

출 과정을 거쳐 하천으로 회귀되도록 모형을 수정하였다. Fig. 2는 개선된 저수지 모듈의 모식도를 나타낸 것이다.

2.3.2 양수 모듈 개선

SWAT-MODFLOW 모형에서는 지하수 관정으로부터 양수된 물이 임의의 소유역내 위치한 저수지 또는 하천수에 더해지거나 양수량이 유역 외로 전량 배출되도록 모형화되어 있다. 본 연구에서는 지하수 관정으로부터 배출된 양수량의 일부가 하천으로 회귀될 수 있도록 SWAT의 물이동 계산 서브루틴인 transfer.f, 지표유출/침투 계산 서브루틴 surface.f, 그리고 소유역, 하도, 저수지 등 유역계 구조를 읽어 들이는 readfig.f 등을 수정하였다. MODFLOW의 지하수 관정의 열, 행과 SWAT의 HRU의 공간적 위치를 서로 연결하였으며, 농업용 관정인 경우 저수지 관개용수량과 마찬가지로 지하수 양수량이 해당 HRU의 피복 강수량에 더해져 일부가 토양으로 침투 및 증발산, 함양 및 유출 과정 등을 거쳐 하천으로 회귀되도록 하였고, 생공용 관정인 경우는 양수량에 회귀율(Fig. 3의 α)을 곱하여 하천으로 직접 배출되도록 처리하였다. Fig. 3에 개선된 양수 모듈의 모식도를 나타내었다.

Fig. 2. Schematic Diagram of Irrigation Reservoir Routing Module

Fig. 3. Schematic Diagram of Groundwater Pumping Module

2.4 모형의 입력자료 구축

2.4.1 수치지제도 및 소유역 분할

죽산천 유역의 DEM과 소유역 분할현황, 그리고 하천망은 Fig. 4(a)와 같다. 죽산천은 소유역 16번에서 시작하여 서에서 동으로 흘러 17번 출구부에서 청미천과 합류된다. 소유역 분할은 농업용저수지 3개소의 위치를 고려하여 총

17개로 나누었다. 그림에서 Fig. 4(b)는 환경부에서 제공하는 2009년도 기준의 1:25,000의 토지피복도(중분류)를 바탕으로 유역의 토지이용도를 나타낸 것으로 산림지역과 농경지가 대부분이다. 청미천수계하천정비기본계획 (Gyeonggi Provincial Government, 2003)에 제시된 죽산천 유역 토지이용현황에 비해 임야가 다소 줄고 도시지역과 초지가 늘어났으며, 농경지 총 면적은 큰 변화는 없으나 밭 면적이

(a) DEM, subwatersheds

(b) Land Cover

(c) Soil Class

Fig. 4. GIS Maps for Juksan-cheon Watershed

줄고 논 면적이 증가하였다. Fig. 4(c)는 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀토양도(토양통 분류)를 나타낸 것으로 모두 35개의 토양통으로 이루어져 있다. 삼각토양통이 전체 면적의 약 24.5%로 가장 큰 비율을 차지하고 있고, 그 다음으로 사천 11.5%, 예산 11.1%, 청산 11.0% 등의 순으로 토양통이 분포해 있다. 삼각토양통은 유역의 북측과 서남측, 덕산저수지 상류부에 많이 위치해 있고 모래, 실트질이 많은 산림지에 많이 분포해 있다. 사천토양통은 죽산천 분류 주변 등 하천 주변 저지대에 주로 분포해 있고, 투수성이 비교적 낮다. 예산토양통 역시 저지대에 많이 분포해 있으며 모래, 실트질층이 많다. 청산토양통은 장계천 우안측 재내지, 용설천 좌안측 등 고지대에 위치해 있으며 자갈 및 실트층이 많다.

2.4.2 수문기상자료

죽산천 유역 내에 위치한 삼죽관측소의 강우자료를 모형에 입력하였고, 기온, 습도, 풍속 등의 기상자료는 이천기상대 자료를 사용하였다. 죽산천 유역에 대한 수문기상자료는 1995년부터 2010년까지 구축하고 1995년부터 2005년까지는 통합모형의 위밍업 기간으로 활용하고 2006년부터 2010년까지의 자료는 분석에 활용되었다.

2.4.3 물 이용 자료

죽산천 유역에는 Fig. 4와 같이 13번, 14번, 15번 소유역 출구에 각각 농촌공사 관할의 농업용 저수지인 덕산, 장계, 덕산, 용설 저수지가 위치해 있다. 각 저수지의 제원은 Table 1과 같다. 강수량 및 저수율 관측치(Fig. 5), 유입량 모의치, 증발량 모의치 등으로부터 관개수량과 하천방류량을 추정하여 저수지 효과를 모형에서 고려하도록 하였다.

죽산천 유역내의 지하수 이용량은 안성시 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정 중 죽산천 유역 내에 위치한 관정만을 발췌하여 각 관정의 일 이용량을 모형에

입력하였다. 지하수 이용량 중 농업용은 대수층에서 지표면으로의 물이동을 고려할 수 있도록 모형을 개선하여 양수량의 회귀 효과를 반영하였고, 생공용은 유역외로 배출되는 것으로 가정하여 죽산천 내로의 회귀는 고려하지 않았다.

2.4.4 대수층 공간 설정 및 수리지질 자료

죽산천 유역의 수리지질은 1개의 충적층 및 1개의 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면대수층으로, 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 충적층의 공간적인 분포는 해당 유역내 포함되는 농어촌 공사 시추조사 자료, 안성지역 지하수 기초조사 자료 등을 이용하여 충적층 바닥고를 크리깅 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰다. 모델 영역은 가로 11,580 m, 세로 8,160 m로 면적 94.5 km²이고, 지하수 분수량이 유역의 경계와 같다고 가정하였으므로 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려하여 54.77 km²이다. 모델 격자는 272행, 386열, 2층으로 구성되며 수평방향 격자한 개의 크기는 30×30 m이다. 제1층 충적층의 저면 고도는 63개소의 주상도 자료를 이용하여 크리깅을 수행하여 격자별로 저면 고도 값을 생성하였으며, 최하부층인 제2층의 저면 고도는 임의적인 해발고도를 수평으로 설정하였다. 크리깅 결과를 토대로 상위대수층(제1층)의 두께는 5.5~48 m로 결정하였으며, 지반고로부터 1층의 두께를 감하여 1층의 저면고도를 생성하여 모형의 입력자료로 활용하였다.

모델링을 위한 대수층의 수리전도도와 저류계수는 안성지역 지하수기초조사자료, 농촌공사 보유자료, 본 연구에서 수행한 대수성 시험 자료를 이용하여 공간분포시켰다. 제1층의 수리전도도는 14개의 측정값을 이용하여 크리깅을 통해 공간분포시켜 모델의 입력자료로 이용하였고, 제1층의 저류계수는 측정값이 전무하여 일반적으로 미계

Table 1. Irrigation Reservoir Dimension

Classification	Deoksan Reservoir	Janggye Reservoir	Yongseol Reservoir
Total reservoir storage	1,920 × 10 ³ ton	896 × 10 ³ ton	3,146 × 10 ³ ton
Effective reservoir storage	1,859 × 10 ³ ton	878 × 10 ³ ton	3,064 × 10 ³ ton
Embankment type	fill dam	fill dam	fill dam
Embankment height	15.8 m	22.7 m	19 m
Embankment length	404 m	268.5 m	459 m
Watershed area	485 ha	225 ha	790 ha
Benefit area	192.2 ha	102.4 ha	303.9 ha
Drought frequency	10 year	10 year	10 year

(a) Deoksan Reservoir

(b) Janggye Reservoir

(c) Yongseol Reservoir

Fig. 5. Storage Rate of Irrigation Reservoirs

측지역의 충적층에서 사용하고 있는 값인 0.1을 입력하였다. 제 2층의 수리전도도와 저류계수는 각각 47개와 46개의 측정값을 역시 크리깅을 통해 격자별 값을 보간하여 생성하였다. 모델에 입력한 수리전도도값은 충적층에 대해서는 0.09~6.0 m/일, 암반층에 대해서는 0.0031~0.33 m/일이다.

수평방향으로 수리전도도는 등방성인 것으로 가정하였고, 수직 수리전도도 측정값은 전무하므로 모형의 보정 과정을 통해 수평수리전도도의 1/10의 값을 적용하였다.

분수령을 따라 유역경계는 무흐름 경계조건을 부여하였고, 모사영역 내에서 수직 방향의 모든 최상위 활성 셀에 함

양이 일어나도록 함양률 경계조건을 부여하였다. 하천경계는 Fig. 4에 나타난 하천망과 같이 죽산천 본류 및 지류에 해당하는 하천셀에 시간중속수두 경계조건을 부여하였다.

3. 결과 및 고찰

모형의 구축, 보정 및 검증에 대해서는 선행논문인 Kim et al. (2012)과 하천변 지하수 이용에 따른 영향 평가 보고서(MLTMA, Han River Flood Control Office, 2011)에서 상세히 다루고 있어 본 고에서는 생략하고 모의 결과를 중심으로 기술하였다.

3.1 지하수 양수의 회귀 효과

지하수 양수량의 회귀 영향을 평가하기 위해서 죽산천 유역에 존재하는 농업용 지하수 관정에 대해서 회귀 영향 고려 유무에 따른 각종 연평균 수문성분의 변화량을 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 PREC는 강수량, SURFQ는 지표 유출량, LATQ는 중간유출량, GWQ는 지하수유출량, PERC는 침투량, SW는 토양수분량, ET는 증발산량, PET는 잠재증발산량, YIELD는 지표유출량과 중간유출량 그리고

지하수유출량의 합인 총 발생량을 의미한다. 모형에서 양수의 회귀 영향을 고려할 수 있게 하기 위해서 지하수 관정이 농경지에 위치하여 용도가 농업용 관정인 경우에는 지하대수층으로부터 양수된 물이 피복 강우량에 더해지도록 처리하였기 때문에 지표면유출량, 중간유출량, 침투량, 토양수분량, 증발산량이 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 수문성분들의 증가로 인해 하천유량에 영향을 미치는 총 발생량은 Fig. 6(a)와 같이 회귀 영향 미고려의 경우에 비해 연간 65mm 증가하였다. 이는 죽산천 전체 지하수 이용량의 약 28%에 해당하는 양이다.

3.2 지하수 양수 유무 및 저수지 고려 유무에 따른 하천유량 변화

지하수 양수 및 저수지 운영이 하천유량에 미치는 영향 정도를 파악하기 위해서 지하수 양수 유무 및 저수지 고려 유무에 따라 총 4가지 경우의 유출모의를 실시하였다. Fig. 7은 각각의 경우에 대한 죽산천 유역 출구에서의 모의 하천유량을 나타낸 것이다. 그림에서 일점 쇄선은 지하수 양수와 저수지를 고려하지 않은 경우로 자연 상태의 하천유량을, 실선은 지하수 양수만 고려한 경우, 긴 점선

Fig. 6. Difference of Hydrological Components between with and Without Considering Return Flow

Fig. 7. Simulated Streamflows with and Without Groundwater Pumping or Irrigation Reservoirs at the Outlet of the Juksan-cheon Watershed

은 저수지만 고려한 경우, 짧은 점선은 지하수 양수와 저수지 모두를 고려한 경우인 현재 상태의 하천유량 모의결과를 나타내고 있다. 갈수기 유출수문곡선을 보면 자연상태에 비해 지하수 양수로 인한 하천유출량의 감소현상이 분명하게 나타나고 있으며, 또한 지하수 양수보다는 그 영향이 상대적으로 작지만 농업용 저수지로 인해 하천유출량이 감소 또한 발생하고 있다.

2006년부터 2010년까지 모의 유출량 자료를 크기순으로 정렬하고 초과확률을 부여하여 Fig. 8(a)와 같이 유황곡선을 작성하였고, 일부 구간을 확대하여 Fig. 8(b)에 나타내었다. 지하수 양수 및 농업용 저수지 유무에 따른 유황의 변화를 확인할 수 있으며, 일부 고유량 기간을 제외하고는 자연상태, 저수지만 있는 경우, 양수만 있는 경우, 저수지와 양수 모두 있는 경우 순으로 하천유량의 규모가 형성되고 있다.

4개의 시나리오별 모의 유황곡선으로부터 기준유량 값인 풍수량(95일), 평수량(185일), 저수량(275일), 갈수량

(355일)을 발췌하여 Table 2에 정리하였다. Table 2의 4개의 기준유량값은 Fig. 8에서 각각 초과확률 약 26%, 50%, 78%, 97%일 때의 하천유량값을 판독한 결과이며, 팔호 안의 값은 자연 상태에 비해 지하수 양수 및 저수지로 인해 감소된 하천유량의 비율을 나타낸 것이다. Table 2에 제시된 바와 같이 풍수량에서 갈수량으로 갈수록 감소율이 증가하였고 지하수 양수에 의한 영향이 농업용 저수지 영향에 비해 다소 큰 것으로 분석되었다. 특히 갈수량은 자연유출량인 경우에 비해 양수로 인해 약 17%, 저수지로 인해 약 11%, 양수 및 저수지로 인해 약 23% 만큼 비교적 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 덕산 농업용 저수지로부터 약 1.08 km 하류에 위치한 소유역 12번 출구부에서의 모의 하천유출량과 하천유황을 나타낸 것으로 농업용 저수지에 의한 영향으로 하천유량 감소가 크게 발생하고 있다. 저수지로 인해 갈수량은 자연 상태의 0.057 cms에 비해 0.015 cms(저수지만 고려) 및 0.011 cms(저수지, 양수 고려)로 약 4~5배만

(a) Flow duration curve

(b) Enlarged flow duration curve

Fig. 8. Simulated Flow Duration Curves with and Without Groundwater Pumping or Irrigation Reservoirs at the Outlet of the Juksan-cheon Watershed

크 감소하는 것으로 분석되었다. Fig. 9를 유역 출구부에서의 결과인 Fig. 8과 비교해보면, 하천유량은 저수지 직 하류부에서 보다 직접적으로 저수지의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 용설 농업용 저수지로부터 약 2.56 km 하류에 위치한 소유역 6번 출구부에서의 모의 하천유출량과 하천유황을 나타낸 것으로 Fig. 9와 마찬가지로 농업용 저수지에 의한 영향이 지배적으로 발생하고 있다. 농업용 저수지로 인해 갈수량은 자연 상태의 0.087 cms에 비해 0.040 cms (저수지만 고려) 및 0.036 cms (저수지, 양수 고려)로 2배 이상 감소하는 것으로 분석되었다.

Fig. 11은 장계 농업용 저수지로부터 약 1.87 km 하류에 위치한 소유역 11번 출구부에서의 모의 하천유출량과 하천유황을 나타낸 것이다. 장계 저수지의 영향이 지하수 양수 영향보다는 크게 나타나고 있으나, 장계 저수지의 규모와 저수지 상류부 유역면적이 덕산 및 용설 저수지에 비해 작고 분석 기간 동안 만수위를 넘는 기간 또한 다른 저수지에 비해 다소 길고 저수율 또한 상대적으로 높아 농업용 저수지의 영향이 Figs. 9 and 10처럼 두드러지게 나타나고 있지는 않다. 갈수량은 자연 상태에 비해 약 11% 감소(양수만 고려), 20% 감소(저수지만 고려), 21% 감소(저수지, 양수 고려)하는 것으로 분석되었다.

Table 2. Standard Flows (unit : cms)

Scenarios	Abundant flow (95 days)	Normal flow (185 days)	Low flow (275 days)	Drought Flow (355 days)
W/O Pumping & W/O Reservoir	0.89	0.65	0.58	0.53
With Pumping & W/O Reservoir	0.83 (-7%)	0.58 (-10%)	0.51 (-11%)	0.44 (-17%)
W/O Pumping & With Reservoir	0.89 (-0%)	0.62 (-4%)	0.53 (-8%)	0.47 (-11%)
With Pumping & With Reservoir	0.84 (-6%)	0.55 (-16%)	0.48 (-17%)	0.41 (-23%)

(a) Streamflows

(b) Flow duration curves

Fig. 9. Simulated Streamflows and Flow Duration Curves with and Without Groundwater Pumping or Irrigation Reservoirs at Distance 1.08 km from the Deoksan Irrigation Reservoir (at the end of subbasin 12)

(a) Streamflows

(b) Flow duration curves

Fig. 10. Simulated Streamflows and Flow Duration Curves with and Without Groundwater Pumping or Irrigation Reservoirs at Distance 2.56 km from the Janggye Irrigation Reservoir (at the end of subbasin 6)

3.3 농업용 저수지로 인한 하류부 갈수량 변화

죽산천 본류 상류에 위치한 덕산 저수지를 기준으로 하류부로 떨어진 거리에 따른 농업용 저수지가 갈수량에 미치는 영향을 모의하여 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 횡축에 표기된 거리는 덕산 저수지로부터 순서대로 Fig. 4의 소유역 12, 3, 7, 9, 5, 1, 16번 출구까지의 하천길이를 나타낸 것이고, 종축은 갈수량을 해당지점까지의 유역면적으로 나눈 비갈수량을 나타낸 것이다. 농업용 저수지가 없는 경우의 비갈수량은 지하수 양수 유무에 따른 차이만 보일 뿐 죽산천 본류 상하류를 따라 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 반면에 저수지가 있는 경우에는 하류로 갈수록 비갈수량이 점차 증가하다가 용설천이 합류(6.81 km)된 이후에 다소 감소하다가 죽산천 유역출구에서 다시 약간 증가하는 양상을 보이고 있다. 하류부로 갈수록 비갈수량이 증가하는 이유는 수답지역으로부터 하천으로의 회귀수 영향이 누적된 데서 기인한다. 죽산천과 용

설천 합류부에서의 비갈수량의 감소는 용설 저수지로 인한 용설천의 하천유량의 감소 영향이 반영된 데서 기인한다.

4. 결 론

유역단위 지표수-지하수 통합수문해석모형 SWAT-MODFLOW를 이용하여 죽산천 유역에 대해 농업용 저수지 관개 및 지하수 이용에 따른 하천유량의 변화를 분석하였다. 연구 대상 유역에 존재하는 지하수 관정의 이용량과 덕산, 용설, 장계의 농업용 저수지 관개 등 물 이용체계를 고려하여 모형을 구축하였으며, 특히 지하수 양수 후 배출수와 저수지 관개 후 배출수의 자연회귀 영향을 모형에 반영할 수 있도록 모형을 개선하였다. 모의 기간은 2001년부터 2010까지이며, 모형의 워밍업 기간을 제외하고 2006년부터 2010년까지 5년 동안의 모의 결과를 분석에 사용하였다.

Fig. 11. Simulated Streamflows and Flow Duration Curves with and Without Groundwater Pumping or Irrigation Reservoirs at Distance 1.87 km from the Yongseol Irrigation Reservoir (at the end of subbasin 11)

Fig. 12. Simulated Drought Flows with and Without Groundwater Pumping or Irrigation Reservoirs at Distance from the Deoksan Irrigation Reservoir

지하수 양수 및 농업용 저수지 고려 유무에 따라(1) 현 지하수 이용량 고려, 저수지 고려, (2) 현 지하수 이용량 고려, 저수지 미고려, (3) 지하수 이용량 미고려, 저수지 고려, (4) 지하수 이용량 미고려, 저수지 미고려(자연상태) 등의 4가지 모의 시나리오별로 하천유량의 변화를 모의한

결과, 죽산천 유역 출구부를 기준으로 지하수 양수로 인한 영향이 농업용 저수지에 의한 영향 보다 상대적으로 크게 발생하였으며, 갈수량은 용수이용이 없는 자연 상태에 비해서 지하수 양수만의 영향으로 약 17%, 저수지만의 영향으로 약 11%, 양수 및 저수지의 복합영향으로 인해

약 23% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 농업용 저수지 직하류부에서는 지하수 양수보다는 저수지의 하천에 미치는 영향이 지배적인 것으로 나타났으나, 저수지의 규모와 저수지 상류유역면적에 따라 그 정도의 차이를 보였다.

농업용 저수지로부터 떨어진 거리에 따른 하천유량의 변화를 평가하기 위해서 죽산천 본류를 따라 비갈수량을 산정한 결과, 저수지를 고려하지 않은 경우에는 지하수 양수 유무에 따른 크기의 차이만 보일 뿐 죽산천 본류 상하류를 따라 큰 변화를 보이지 않았으나, 저수지를 고려한 현재 물 이용상태에서는 저수지 관개용수의 회귀수 영향으로 하류로 내려갈수록 비갈수량이 증가하였으며, 죽산천 상류에 위치한 덕산 저수지로부터 약 6.5km까지는 저수지의 영향이 상당히 미치는 것으로 분석되었다.

현재 죽산천 유역에는 중상류부 일부 하천구간에서 수위와 유량측정(MLTMA, 2010)이 이루어지고 있기 때문에 향후에는 이러한 관측유량 자료를 이용하여 유출모의 결과를 검증함으로써 분석 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 또한 하천의 상하류구간을 따라 관측유량을 확보, 활용함으로써 계측에 기반하여 농업용 저수지의 하천유량에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한강홍수통제소 “하천변 지하수 이용에 따른 영향권 설정 방안 연구” 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 142, No. 1, pp. 47-69.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., and Maidment, D.R. (1995). “Continuous time water and sediment routing model for large basins.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 2, pp. 171-183.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Griggs, R.H., and Sammons, N.B. (1990). *SWRRB-Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*. Texas A&M Press: Texas.
- Chung, I.M., Lee, J., and Kim, N.W. (2011). “Estimating exploitable groundwater amount in Musimcheon watershed by using an integrated surface water-groundwater model.” *Economic and Environmental Geology*, Vol. 44, No. 5, pp. 433-442.
- Gyeonggi Provincial Government (2003). General planning on Chungmi stream maintenance.
- Izaurrealde, R.C., Williams, J.R., McGill, W.B., Rosenberg, N.J., and Quiroga, J.M.C. (2006). “Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data.” *Ecological Modeling*, Vol. 192, No. 3, pp. 362-384.
- Kim, B.K., Kim, B.S., and Kwon, H.H. (2009). “Impact assessment of agricultural reservoir on streamflow simulation using semi-distributed hydrologic model.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 1B, pp. 11- 22.
- Kim, D.J., Park, K.W., and Jo, J.H. (2008). “Analysis of characteristics for irrigation reservoir using SWAT model.” *2008 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 810-817.
- Kim, N.W., Chung, I.M., and Won, Y.S. (2004). “The development of fully coupled SWAT-MODFLOW model(I): Model development.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 11, pp. 499-507.
- 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, pp. 1-16.
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M., and Kim, C.H. (2012). “Analysis of groundwater-stream interaction according to groundwater abstraction near Vinyl house area.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 12, pp. 1259-1273.
- Knisel, W.G. (1980). CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report, 26.
- Lee, K.S., Chung, E.S., and Shin, M.J. (2006). “Effects of changes of climate, groundwater withdrawal, and landuse on total flow during dry period.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 11, pp. 923-934.
- Lee, W.S. (2008). Estimation of sustainable groundwater yield considering stream-aquifer interactions, Ph.D.

- thesis. Department of Civil Engineering, Seoul National University.
- Lee, Y.J., Park, M.J., Park, K.W., and Kim, S.J. (2008). "Analysis of hydrologic behavior including agricultural reservoir operation using SWAT model." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 11, No. 1, pp. 20-30.
- Leonard, R.A., Knisel, W.G., and Still, D.A. (1987). "GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 30, No. 5, pp. 1403-428.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model*. Techniques of Water Resources Investigations Report, U.S. Geological Survey, Book 6, Chapter A1, p. 528.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). Study on assessment of drying stream and improvement method, pp. 5-47-5-111.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, and Han River Flood Control Office (2011). Assessment of streamflow depletion according to groundwater withdrawals near stream, p. 126.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Version 2005. Temple Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- Oh, S.T., and Kim, J.T. (2007). "A time rivers outflow interpreting according to an agriculture reservoir operation." *2007 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 174-177.
- Park, M.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2007). "Analysis of hydrologic behavior of SLURP model including agricultural reservoir operation." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 5B, pp. 515-523.
- Sharpley, A.N., and Williams, J.R. eds. (1990). EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.

논문번호: 13-016	접수: 2013.02.14
수정일자: 2013.04.18	심사완료: 2013.04.18