신둔천 유역에 대한 지하수 이용이 하천유량에 미치는 영향 분석

Analysis of Effects of Groundwater Abstraction on Streamflow for Sinduncheon Watershed

김 남 원* / 이 정 우** / 정 일 문*** / 성 지 연****

Kim, Nam Won / Lee, Jeongwoo / Chung, Il Moon / Sung, Gee Youne

Abstract

In this study, a watershed-based surface water and groundwater integrated model, SWAT-MODFLOW was used to quantify the stream flow depletion due to groundwater pumping for the Sinduncheon watershed. Complex water use conditions such as water taken from a stream, sewage disposal release, irrigation from agricultural reservoir, groundwater pumping were considered for simulations. In particular, the model was revised to reflect the effects of reservoir operation and return flow from the used groundwater on streamflow variation. The simulated results showed that the groundwater pumping at current status has induced the decrease of more than 10% in annual average streamflow and 40% in drought flow at the outlet of the Sinduncheon watershed. The simulated results also revealed that the vast water withdrawals at green house areas during winter season have dramatically changed streamflow from April to June. The streamflow depletion was mainly attributed to pumping wells located within the distance of 300 m from the stream for Sinduncheon watershed.

Keywords : SWAT-MODFLOW, groundwater pumping, streamflow depletion, near stream

요 지

본 연구에서는 지표수와 지하수의 통합거동을 유역 스케일로 장기간 모의할 수 있고 양수정의 공간분포를 고려할 수 있는 유역단위 통합수문해석모형 SWAT-MODFLOW를 이용하여 복하천 지류인 신둔천 유역에 대해 지하수 이용에 따른 하천수 감소량을 모의하였다. 하천수 취수, 하수처리수 방류, 농업용 저수지 관개, 지하수 양수 등 유역의 물 이용 상황을 복합적으로 고려하였고, 특히 농업용 저수지 운영 및 지하수 배출수의 회귀 영향을 모의할 수 있도록 모형 개선을 수행하였다. 지하수 양수 유무에 따른 모의 결과, 신둔천 유역은 지하수 양수로 인해서 연평균 하천유량이 10% 넘게 감소하였고, 갈수량은 약 40% 만큼 감소한 것으로 평가되었다. 특히 겨울철 비닐하우스 지역의 과잉 양수로 인한 지하수위 저하 영향이 수막시설재배가 종료된 후 농번기인 4월에서 6월 동안에 크게 발생하였다. 하천과 관정간 이격거리별 지하수 이용에 따른 하천수 감소량을 모의한 결과, 신둔천 유역은 300 m 이내의 관정이 하천유량 감소에 지배적인 영향을 미치는

* 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, Tel: 031-910-0529)

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: gyoun@korea.kr)

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

것으로 나타났다.

핵심용어 : SWAT-MODFLOW, 지하수 양수, 하천수 감소량, 하천인근

1. 서 론

지하수의 과도한 이용은 지하수위 저하를 일으켜 대수층에서 하천으로의 지하수 유출량이 감소되어 결국 하천수의 감소를 초래한다. 지하수 이용이 더욱 과할 경우에는 하천수위보다 지하수위가 낮아 하천수가 지하수계로 유입되는 손실하천이 되어 하천 건천화의 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 지하수의 개발·이용은 하천수의 안정적인 취수와도 직결된 문제로 지하수 이용이 하천에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 효율적인 수자원의 통합관리가 이루어져야 한다.

지하수 양수로 인한 하천수 감소를 평가할 때 사용의 간편성 때문에 해석해를 이용하는 방법(Glover and Balmer, 1954; Hantush, 1965; Hunt, 1999; Singh, 2000; Butler et al., 2001)이 많이 이용되고 있으며, 복잡한 실제 조건을 보다 자세하게 모사하기 위해서 MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988)와 같은 지하수 유동 수치해석 모형 (Sophocleous, 1995; Nyholm et al., 2003; Zume & Tarhule, 2008; 김형수와 정재훈, 2009)이 이용되고 있다. 그러나 해석해를 이용하는 방법은 단일 양수정에 의한 영향을 해석하는데 적합하며, 주로 소규모 지역에 이용되고 있는 지하수 유동 수치해석 모형을 이용하는 방법은 장기간의 변동하는 수문학적 특성을 충분하게 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서 다양한 수문조건을 고려하고 상류지역의 변화가 하류지역에 미치는 거시적인 장기 영향을 파악하기 위해서는 유역수문모형이나 지표수-지하수 결합모형을 이용한 유역단위의 접근 방식이 적절하다.

유역 규모로 지하수 이용에 따른 하천유출량의 변화를 분석한 연구로서 Perkins and Sophocleous (1999)는 SWAT 모형의 지하수 해석 부분을 강화하고자 유역수문모형 SWAT과 지하수 유동모형 MODFLOW를 순차적으로 결합한 SWATMOD 모형을 개발하였고, 이를 미국 캔자스주 북중부에 위치한 Lower Republican 강에 적용하여 관개용 양수가 하천유량에 미치는 영향을 평가하였다. Sophocleous et al. (1999)은 캔자스주 북중부에 위치한 Rattlesnake Creek 유역에 대해 SWATMOD 모형을 적용하여 가상의 양수량 변화 시나리오에 따른 미래의 지하수위와 하천유량의 변화를 모의하였으며, Sophocleous and Perkins (2000)

는 역시 SWATMOD 모형을 동일 유역에 적용하여 안정적인 목표 하천유량을 유지하기 위해서는 연평균 관개이용량의 12% 절감이 필요하다 하였다. Kim et al. (2008)은 순차적 결합방식이라는 SWATMOD 모형의 단점을 극복하고자 함양, 하천-대수층 교환, 지하수 양수, 증발산, 물 이동 등을 완전연동형으로 결합한 SWAT-MODFLOW 통합모형을 개발하고 이를 무심천 유역에 적용하여 지하수 이용에 따른 지하수위 저하 및 하천유출량 감소를 평가하였으며, Chung et al. (2011)은 이 모형을 제주도 표선유역에 적용하여 양수량 증가에 따른 대수층 저류량, 하천유출량, 해안으로의 지하수 유출량 등의 변화를 고찰하였다. Werner et al. (2005; 2006)은 호주의 퀸즈랜드에 위치한 Sandy Creek과 Pioneer Valley 대수층에 MODHMS 모형을 적용하여 하천에서 250 m와 1,000 m 떨어진 곳에 위치한 가상의 지하수 관정으로부터 양수에 따른 하천수 감소량을 모의하고 Hunt의 해석해(Hunt, 1999)와 비교하여 모의 초기에는 두 결과값이 유사함을 보였다. Said et al. (2005)은 MODFLOW 모형과 유역수문모형 HSPF이 결합된 FHM (Florida Hydrological Model)을 미국 플로리다주의 Big Lost River 유역에 적용하여 지하수 이용량을 고려한 물수지 분석을 실시하였고 효율적 물이용을 위해서 지표수와 지하수의 연계 이용이 필요함을 강조하였다. 유역수문모형 또는 지하수유동모형 단독 적용으로 지하수 양수에 따른 하천유량 변화를 유역규모로 해석한 연구로서 Lee & Chung (2007)은 SWAT (Arnold et al., 1993)을 소규모 유역에 적용하여 기후 및 토지이용과 지하수 양수와 같은 유역계의 변화가 하천유량에 미치는 영향을 분석하였고, Constantz & Essaid (2007)은 가상 유역에 대해서 지하수 양수 및 댐 제거에 따른 하천유량 변화를 모의하여 자연상태에 비해 하천유량이 크게 감소할 수 있음을 보였다.

국내 연구로서 이길성 등(2006)은 옷우물교를 출구점으로 하는 안양천 상류유역에 대하여 SWAT 모형을 이용하여 지하수 취수량에 대한 건기 총 유출량의 민감도를 제시하고 지하수 취수량과 건기 총 유출감소량 간에 로그형태의 회귀식을 도출하였으며, 더 나아가 기후 및 토지이용 변화까지 복합적으로 고려하여 기후, 토지이용, 지하수 취수량과 건기 총 유출감소량간의 관계식을 유도하여

미래 수자원 현황을 예측하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대하였다. 국토해양부, 한국건설교통기술평가원(2007)에서는 무심천 유역에 대하여 공간적으로 분포하고 있는 실제 관정들의 양수량과 지표수-지하수 상호흐름을 종합적으로 고려하여 지하수 양수에 따른 지하수위의 저하를 SWAT-MODFLOW 모형을 이용하여 모의하였다. 특히 최대토출량 양수 유무에 따른 하천유출량의 변화 및 유황의 변화를 분석하여 양수로 인해서 연간 약 50 mm의 하천유출 감소가 발생할 수 있음을 나타내었다. 이우석(2008)은 유역 단위의 지하수 함양 및 유출 특성을 분석하고 하천-대수층 상호흐름을 모의하기 위해 탱크모형을 선정하고 하천-대수층 상호흐름을 모의할 수 있도록 개선하였다. 개선된 탱크모형 TANK-GS를 금강의 지류인 갑천 유역에 적용하여 하천-대수층 상호흐름을 개선한 SWMM-GE 모형에 의한 결과와 비교하여 모형의 성능을 검증하였다. 또한 시나리오별 지하수 개발에 따른 하천유출의 장기변화를 TANK-GS로 모의하여 지하수 양수에 따른 기저유출량의 감소와 하천에서 대수층으로의 함양량 증가를 평가하였고, 물순환계가 평형상태에 도달하는 시간을 예측하고 지하수의 공급신뢰도를 만족시키기 위한 지하수 개발량 규모를 설정하였다. 국토해양부(2010a)에서는 완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형으로 무심천, 미호천 유역에 대해서 지하수 양수량 변화에 따른 하천으로의 지하수 유출의 감소를 모의하여 양수량 대비 지하수 유출량이 선형적으로 감소하고 있음을 보여주었고, 공간적인 양수량 변화에 따른 지하수위 강하량의 공간적인 분포 및 고갈층 발생 지역, 대수층의 장기간 저류량의 변화 등을 파악하였다. 또한 지하수 양수량을 소유역별, 계절별로 다르게 가상적으로 분포시켜 양수에 따른 지하수 강하량과 지하수유출량의 변화를 분석하여 지하수 개발, 이용량을 시공간적으로 차등 설정하여 지하수 및 하천수를 탄력적으로 관리할 수 있음을 시사하였다. 국토해양부(2010b)에서는 갑천, 남천, 경안천, 왕숙천 4개의 시범지역을 선정하여 SWMM-GE 모형을 이용하여 지하수 이용 및 토지이용변화에 대한 하천 건천화에 미치는 기여특성을 분석하였으며, 후처리 시나리오를 이용하여 하천수 취수, 하수처리, 저수지 운영 등에 대한 기여특성을 분석하였다. 4개의 시범지역 각각에 대해 인위적 요소 변화에 따른 하천의 유황곡선 변화를 제시하였고, 특히 간접적 건천화 원인 중 지하수 이용 증가가 불투수 면적 증가 등의 토지이용 변화에 비해 하천유량 감소에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

이상과 같이 장기 유역수문해석 모형 및 지표수-지하

수 결합모형을 이용하여 지하수 이용 등 인위적 변화에 따른 하천유량 감소 영향을 정량적으로 평가하려는 연구가 국내외적으로 진행되어 왔다. 그러나 지하수 양수정의 공간적 분포를 고려하여 분포형 모델링으로 지하수 유동 해석을 수행한 일부 연구(e.g., Kim et al., 2008)를 제외하고는 대부분의 연구가 지하수 유동 해석을 총괄형으로 모델링하였거나 지표수-지하수 결합모형을 사용하여 공간적 지하수 유동을 모의한 경우에도 개별 지하수 양수정의 공간분포를 고려하지 않고 지하수 이용량을 소유역별 균집하여 처리하였다. 유역의 총괄적인 차원에서 접근하는 방식은 양수정의 위치 등 인위적 요소의 공간적인 영향 평가에는 제약이 있기 때문에 하천변에서의 지하수 양수에 의한 영향과 같이 지역적 특성을 평가하기 위해서는 지하수 유동해석을 분포형 모델링으로의 접근 방식이 바람직하다.

본 연구에서는 지표수와 지하수의 통합거동을 유역 스케일로 장기간 모의할 수 있고 양수정의 공간분포를 고려할 수 있는 유역단위 통합수문해석모형 SWAT-MODFLOW를 신둔천 유역에 적용하여 지하수 이용에 따른 수문성분량의 변화, 하천유황 변화 등을 모의하였다. 또한 하천 주변의 어느 영역대에 위치한 지하수 양수정이 하천에 지배적인 영향을 미치는 지를 평가하기 위해서 하천-양수정 간 이격거리별로 하천수 감소량을 모의, 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상유역

본 연구에서는 복하천의 지류인 신둔천을 연구 대상유역으로 선정하였다. 신둔천은 경기도 이천시 신둔면 용면리에서 발원하여 동류하다가 복하천에 합류되는 지방하천이다(Fig. 1). 신둔천 유역 면적은 53.45 km²로서 복하천 유역의 전체 면적의 약 1/6을 차지하고 있으며, 유로연장은 12.59 km, 유역평균경사는 20.2%, 유역평균폭(A/L)은 4.25 km, 유역형상계수(A/L^2)는 0.337이다. 유역의 평균고도는 해발 117.5 m이고 해발 100 m 이하의 지역이 50% 이상이며, 취락은 대부분 경사가 완만한 해발 100~150 m 사이에 분포하고 있다. 신둔천 유역내에는 신둔천으로 합류되는 지방하천인 신대천과, 수남천 인배천 인후천 등 23개 소하천이 있다. 신둔천 유역의 토지이용은 농경지 23.17 km² (43.3%), 임야 21.63 km² (40.4%), 대지 7.32 km² (13.7%), 하천 1.27 km² (2.4%), 기타 0.07 km² (0.5%)로 구성되어 있으며(경기도, 2006), 신둔천 유역의 특징으로서 복하천 유역의 중하류부의 최상류 유역(headwater basin)으로 상류 유역의 하천수 및 지하수 이용에 의한 하천유

Fig. 1. Study Watershed

량 교란 영향을 받지 않아 분석 대상 유역내의 지하수 이용의 영향만을 평가하기에 적절한 유역이다. 유역 면적은 지하수 이용의 영향이 하천에 나타날 수 있을 정도로 규모 면에서 분석 대상 유역으로 적절하며, 유역내 토지피복상 태는 논, 밭 등 농경지가 상당 부분 차지하고 하천 인근 지역에서 비닐하우스 시설재배가 많이 이루어지고 있어 지하수 이용이 많은 지역으로 분석 대상 지역으로 적합하다.

2.2 SWAT-MODFLOW 모형의 개요

미국 농무성에서 개발된 유역수문모형 SWAT (1993, Arnold et al.)은 CREAMS (Knisel, 1980), GLEAMS (Leonard et al., 1987), EPIC (Izaurre et al., 2006)을 통합한 SWRRB (Arnold & Williams, 1990) 모형을 근간으로 하고 있으며, 여기에 하도내 유출 및 유사의 추적을 모 의하는 모형인 ROTO (Arnold et al., 1995)가 결합된 구조를 가지고 있다. SWAT으로 모의할 수 있는 주요 성분 요소는 수문, 기상, 유사, 토양온도, 작물성장, 영양물질, 살충제, 농업관리 등이며, 이 중 수문성분 모의 절차는 강 수차단, 지표유출 및 침투, 증발 및 증산, 중간유출 및 침 투, 함양, 지하수유출 순으로 이루어진다. 지표유출량은 토양수분량에 따라 유출곡선지수값(CN)을 계산하는 수정 NRCS 유출곡선지수법을 근간으로 산정되며, 이 외에 Green-Ampt 방식에 의해서도 산정될 수 있다. 잠재증발 산량은 Penman-Montieth, Priestley-Taylor, Hargreaves 방식의 3가지 중 하나를 선택하여 계산할 수 있다. 중간유 출량은 토양층의 포화수리전도도, 경사장 및 경사 등의 함수인 운동학적 저류모델(kinematic storage model)로 계산되며, 연직하향으로의 침투량은 저류추적법(storage

routing method)을 이용하여 중간유출량과 동시에 계산 된다. 토양층 최하단부를 통과한 물이 얇은 대수층까지 도달하는 지하수 함양량은 시간적 지체를 고려하기 위해 서 지수형 감쇠 가중함수로 나타내고 있으며, 지하수 유 출량 역시 감쇠 가중함수를 사용하여 금일 함양량과 작일 배출량의 가중합으로 계산된다. 상기 절차에 따라 계산된 각 소유역내 HRU별 지표유출, 중간유출, 지하수 유출량 은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 유입되며 하도추적 과정을 거쳐 유출량이 산정된다.

지하수 유동 모의를 위해 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 MODFLOW는 연속방정식과 Darcy 법칙을 통해 유 도된 지하수 유동 방정식을 유한차분법에 의해 수치해를 구하는 3차원 지하수 유동 해석 모형이다. MODFLOW 모 형은 주 프로그램과 여러 모듈(module)이라고 불리는 서 브루틴을 갖고 있으며, 이 모듈들은 패키지(package)로 묶 여진다. 하천(RIVER), 배수(DRAIN), 함양(ReCHARGE), 증 발산(EVapo Transpiration), 우물(WELL), 일반수두경계 (General Head Boundary) 등의 여러 패키지와 PCG (Pre-conditioned Conjugate Gradient), SIP (Strongly Implicit Procedure), SOR (Successive Over-Relaxation) 등의 해 석기(solver)가 있어 사용자가 선택하여 사용할 수 있다.

SWAT 모형은 수리지질특성 및 인위적인 지하수 이용의 공간분포를 정밀하게 구현하는데 한계가 있으며, MODFLOW는 지하수 흐름 해석을 제외한 나머지 물 순환 성분 에 대한 해석방법이 포함되어 있지 않아 주요 입력자 료인 지하수 함양량 및 하천수위의 결정에 어려움이 많다. 따라서 두 모형간의 단점을 상호 보완하기 위해서 결합된 모형이 SWAT-MODFLOW 모형(Kim et al., 2008)이다. 이 모형에서는 MODFLOW가 SWAT 내에서 호출되는 형식으로 결합되었으며, 일별 함양량의 공간적 분포를 SWAT모형으로부터 추출하여 MODFLOW모형의 함양 패 키지 통해 자동 입력되고, 하천과 대수층의 상호작용을 모 의하기 위해 SWAT의 하도추적 서브루틴과 MODFLOW 의 하천 패키지가 연동된다. 또한 SWAT의 증발산 계산 서브루틴과 MODFLOW의 증발산 패키지, 그리고 SWAT 의 물이동 계산 서브루틴과 MODFLOW의 우물 패키지 및 배수 패키지와의 서로 연결되어 있다.

2.3 모형의 입력자료 구축

2.3.1 수치주제도 및 소유역 분할

신둔천 유역에 대해 SWAT-MODFLOW 모형의 구동 을 위한 입력자료를 구축하였다. 신둔천 유역 출구에는

토지이용도는 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복도(중분류)를 적용하였고, 토양도의 경우 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀토양도(토양통 분류)를 이용하였다. Fig. 3(a)는 신둔천 유역의 토지이용도를 나타

2.3.2 수문기상자료

SWAT-MODFLOW 모형으로 지표수-지하수 통합모델링을 수행할 때에는 모의 지하수위의 안정화기간이 상당기간 필요하다. 따라서 수문기상자료는 1995년부터 2011년까지 구축하고 이 중 1995년부터 2005년까지의 자료는 통합모형의 워밍업 기간으로 활용하고 2006년부터 2011년까지의 자료는 분석을 위한 입력 자료로 활용하였다. 북한천 중상류 유역에 영향을 미치는 강우관측지점은 상품, 여주, 이천, 남곡, 태평, 설성, 산죽 강우관측소 및 이

Fig. 2. DEM and Subwatersheds

Fig. 3. Land Use and Soil Class Maps for Sinduncheon Watershed

천기상대로 모두 8지점이며, 이를 바탕으로 티센망을 구축하여 소유역별 평균강우량을 산정하여 모형에 입력되도록 하였다. 북한천 중상류 유역에 입력한 소유역별 평균강우량을 신둔천 유역에도 동일하게 입력하였다. 이는 북한천 유역의 소유역에 해당하는 신둔천 유역의 소유역은 모두 같은 강우량 자료를 적용함으로써 유역의 수문총량을 동일하게 하기 위함이다. 북한천 중상류 및 신둔천 유역에 영향을 미치는 기상관측소는 이천기상대 한 지점으로, 모형구축기간에 해당하는 월평균 최고/최저 기온, 상대습도, 풍속, 일사량을 모형에 입력하였다. 이천 지역의 2006년부터 2011년까지의 평균적인 기온은 6.3~17.6℃, 상대습도는 68.3%, 풍속은 1.3m/s, 일사량은 13.7MJ/m²이다.

2.3.3 물이용 자료

북한천 중상류 유역에 대한 지하수 이용량은 이천시 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정의 일 이용량 자료를 수집하여 모형에 입력하였고, 일이용량 자료가 누락된 경우는 취수계획량 자료로 대신하였다. 모형 내에서 지하수 관정 위치와 SWAT 모형의 연산 기본단위인 HRU를 연결하여 각각의 지하수 관정으로부터 양수된 물을 해당 HRU의 얕은 혹은 깊은 대수층에서 지표면으로 보내지도록 처리하였다. 이 때 지하수 용도가 생공용수인 경우에는 유역외로의 물이동 또는 HRU에서 소모되어 전량 제거되도록 처리하였고, 농업용수인 경우에는 HRU의 피복 강수에 더해지도록 처리하여 수문순환 과정을 거쳐 다시 하천으로 일부 회귀되는 영향을 반영할 수 있도록 처리하였다. 신둔천 유역내의 지하수 이용량은 이천시 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정 중 신둔천 유역내에 위치한 관정만을 발췌하여 각 관정의 일 이용량을 모형에 입력하였다. 북한천 유역과 마찬가지로 지하수 이용량 중 농업용은 대수층에서 지표면으로의 물이동을 고려할 수 있도록 하여 양수량의 회귀 효과를 반영하였다. 특히 겨울철 수막시설재배로 인한 지하수 이용량을 고려하기 위해서 관측유량자료로부터 산정(국토해양부 홍수통제소, 2011)한 비닐하우스 지역의 수막시설재배용 원단위 지하수 이용량을 이용하여 비닐하우스 지역에서 추가로 양수되도록 하였다. 수막시설재배기간에는 비닐하우스 지역에서 양수한 지하수를 다시 하천으로 직접 배출되도록 모델화하였다. 지하수 관정 위치는 MODFLOW의 기본 연산단위인 셀과 SWAT의 기본 연산단위인 HRU를 연결하였고, 각각의 지하수 관정으로부터 양수된 물은 셀에서 source 향으로 배출되고 다시 HRU의 지표면으로 보내지도록 처리하였다. 따라서 양수량의 일부가 자연적으

로 회귀되는 영향을 고려할 수 있다.

북한천 중상류 유역 내에 진리정수장과 진로(주) 취수장 두 개의 하천취수장이 있고, 이천, 단월, 오천 등 총 35개의 하수처리 방류장이 위치해 있다. 따라서 모형 구축 시 취수장으로부터 일별 하천수 취수량을 하천유량에서 감해지도록 처리하였고, 하수처리장으로부터의 일별 방류량은 하천유량에 더해지도록 처리하였다.

Fig. 2(a)의 소유역 26번, Fig. 2(b)의 28번 출구부에 해당하는 곳에 농촌공사 관할의 용면 농업용 저수지가 위치해 있다. 저수지로부터 관개기에 농수로로 따라 공급되는 양과 홍수기에 하천으로 방류되는 양을 추정하기 위해서 저수지에서 관측된 저수율과 저수량 자료, 저수지 상류유역에 대한 유입량 모의자료, 저수지의 수면을 통한 증발량 모의자료 등에 기초한 저수지 물수지 해석이 수행되도록 모형을 개선하였다. 추정 관개수량은 하류부 수혜 논 지역으로 물 이동되도록 하여 논 지역 HRU 피복에 더해져 침투, 작물소모 등의 증발산 등의 수문학적 과정을 거쳐 일부가 다시 하천으로 회귀되도록 처리하였다.

2.3.4 대수층 공간 설정 및 수리지질 자료

SWAT-MODFLOW 모형의 하부구조인 MODFLOW 모형의 입력 자료로는 지하수 이용량 자료뿐만 아니라, 지층 구조, 수리전도도와 저류계수 등의 수리특성 자료가 필요하다. 대상지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 1개의 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면 대수층으로, 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 충적층의 공간적인 분포는 해당 유역 내 포함되는 농어촌 공사 시추조사 자료, 이천지역 지하수 기초조사 자료 등을 이용하여 충적층 바닥고를 크리깅(Kriging) 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰다. 굴착 깊이까지의 충적층의 바닥고는 지층 구성별 심도로부터 산정할 수 있으나, 굴착심도 이상의 암반의 분포심도는 명확하지 않은 상황이므로 암반층 바닥고는 수평으로 놓고 그 심도는 검보정에 의해 결정하였다. 모델 영역은 가로 11,400 m, 세로 8,970 m로 면적 102.25 km²이고, 지하수 분수령이 유역의 경계와 같다고 가정하였으므로 실제 모사에 적용된 면적은 활성격자만을 고려하여 54.58 km²이다. 모델 격자는 299행, 380열, 2층으로 구성되며 수평방향 격자 한 개의 크기는 30×30 m이다. 각 층의 수문지질 단위로서 제1층은 충적층, 제2층은 암반층으로 구분하였다. 앞서 기술한 대로 제1층의 저면 고도는 69개소의 주상도 자료를 이용하여 크리깅을 수행하여 격자별로 저면 고도를 생성하였으며, 최하부층인 제2층의 저면 고도는

임의적인 해발고도를 수평으로 설정하였다. 크리깅 결과를 토대로 상위대수층(제1층)의 두께는 5.5~48m로 결정하였으며, 기반고로부터 1층의 두께를 감하여 1층의 저면 고도를 생성하여 모형의 입력자료로 활용하였다.

모델링을 위한 대수층의 수리전도도와 저류계수는 이천지역 지하수기초조사자료, 농촌공사 보유자료, 본 과업에서 수행한 대수성 시험 자료를 이용하여 공간분포시켰다. 제1층의 수리전도도와 저류계수는 각각 18개와 6개소의 측정값을 이용하여 크리깅을 통해 공간분포시켜 모델의 입력자료로 이용하였고, 제2층의 수리전도도와 저류계수는 각각 8개와 6개소의 측정값을 역시 크리깅을 통해 격자별 값을 보간하여 생성하였다. 모델에 입력한 수리전도도값은 층적층에 대해서는 0.4~513 m/일, 암반층에 대해서는 0.018~1.17 m/일이다. 또한, 수리전도도 입력시 이방성에 관한 자료는 전무하므로 수평방향으로 수리전도도는 등방성인 것으로 가정하였고, 수직 수리전도도는 전 구간에 대해 수평수리전도도의 1/10에 해당하는 것으로 가정하여 적용하였다.

유역경계를 기준으로 바깥쪽은 무흐름으로 간주하여 분수령을 따라 불투수경계로 설정하였다. 따라서 활성셀은 유역의 형상과 동일한 것으로 가정하였다. 모델 대상지역의 지하수 공급원은 지표에서의 지하수 함양과 대상지역 내에 포함되어 있는 하천이다. 지하수 함양은 모사영역 내에서 수직 방향의 모든 최상위 활성 셀에 함양이 일어나도록 함양률 경계조건을 부여하였다. 즉, 임의 셀이 건조셀이 되면 그 하부에 있는 지층으로 함양이 일어나도록 함양패키지에서 해당 옵션을 주었다. 함양률 값은 SWAT으로부터 일 단위로 모의 되어 MODFLOW의 지하수 활성셀에 자동으로 입력되게 하였다. 하천경계는 신둔천 본류를 비롯하여 Fig. 3에 보이는 지류에 적용하였다. 하천경계는 지하수 유출입이 일어나는 하천셀로 지정하였다. 이 하천셀에서 시간중속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모형의 보정 및 검증

SWAT 모형이 미계측 유역에 적용할 수 있도록 개발되었고(Arnold et al., 1998), 대부분의 입력 변수들이 물리적 의미를 가지고 있으며 GIS 정보, 기상정보, 토양 및 작물 DB 등을 이용하여 자동적으로 추정할 수 있기 때문에(Fontaine et al., 2002) 보정 없이도 양호한 유출모의 결

과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 모형의 정확도를 높이기 위해서는 모형의 보정 및 검증 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 복하천 증상류 유역의 출구부인 홍천 수위관측소 지점의 관측 일 유출량 자료를 이용하여 SWAT 모형의 보정(calibration) 및 검증(validation)을 실시하였다. 실측자료의 질이 양호한 2006년부터 2010년까지를 모형의 보정 및 검증 기간으로 설정하였고, 2009년과 2010년의 관측 유출량 자료는 보정에, 2006년부터 2008년까지의 관측 유출량 자료는 검증에 활용하였다. 보정 및 검증 결과에 따른 모형의 적합성을 판단하기 위한 통계값으로 결정계수(Determination Coefficient, R^2)를 사용하였고 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe의 모형효율성계수(NSE)를 사용하였다.

일반적으로 민감도 분석을 통해 매개변수를 선정하고 이를 모형의 보정에 활용한다. 이도훈(2006)은 보청천 유역에 대해 SWAT 모형의 민감도를 분석하여 CH_2N (Manning's n value), $SURLAG$ (surface runoff lag time), $CN2$ (AMC-II runoff curve number), $ALPHA_{BF}$ (baseflow recession constant) 등의 변수가 총유출량에 대한 민감도가 크다고 하였다. 박종윤 등(2008)이 경안천 유역에 대해 수행한 민감도 분석 결과에 따르면 지표면 유출은 $CN2$, $ESCO$ (soil evaporation compensation factor), SOL_{AWC} (available water capacity of the soil) 순으로, 지하수 유출은 $GWQMN$ (threshold depth for return flow to occur), GW_{REVAP} (groundwater revap coefficient), $REVAPMN$ (threshold depth for evap to occur) 순으로 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다. White and Chaubey (2005)는 $CN2$, $ESCO$, SOL_{AWC} , $SLSUBBSN$ 등의 변수가 지표면유출량과 총유출량에 대해 민감도가 큰 것으로 분석하였다. 이러한 민감도 분석 결과는 모의유출량과 관측유출량간의 차이가 클 경우 매개변수 추정시 효과적으로 활용될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 모형에서 제공하는 기본값(default)을 이용하고도 모의유출량이 관측치에 비교적 잘 적합하기에 별도의 민감도 분석을 실시하지 않고 선행 민감도 분석 결과를 참고하고 경험에 의존해서 보정 매개변수를 선정하였으며, 일 유출수문곡선에 대하여 모의치와 관측치의 적합이 잘 이루어질 때까지 수동 보정을 실시하였다.

모형의 보정을 위해서 일 유출수문곡선의 첨두부와 감수부의 형태를 관측치에 적합하도록 관련 매개변수값을 조정하게 된다. 첨두유출량을 관측치에 잘 적합시키기 위해서 앞서 민감도 분석 사례에서 기술했듯이 $CN2$, $ESCO$, SOL_{AWC} 값을 일반적으로 조정하게 되나 본 연구 대상

유역에 대해서는 이들 값 조정 없이 침투유출량을 잘 구현할 수 있어 보정 매개변수에서 제외하였으며, 다만 지표면유출의 지체 등 수문곡선의 형태를 매끄럽게 보정하기 위해서 SURLAG값을 0.5로 낮추었다. 감수부 이하 지하수유출 부분이 관측치에 비해 다소 크게 모의되어 지표하 중간유출량에 영향을 미치는 변수인 유역평균경사(SLOPE)와 경사장(SLSOIL)를 각각 기본(default)값에 비해 2배, 0.7배하여 중간유출량을 다소 증가시키고 증산보상계수(EPCO)값을 1.0로 하여 증산량을 크게 발생하게 함으로써 연직하향으로의 침투 및 지하수 유출을 작게 하는 효과를 주었다. 대상유역은 지하수 심도가 깊지 않은

점을 감안하여 토양층을 통해 침투된 물이 지하수면까지 도달하는 지체시간과 관련된 함양지체변수(GWDELAY)를 0.033로 작게 하여 강우에 의한 영향이 비교적 빠르게 지하수면에 도달하도록 하였다. 하도추적과 관련된 변수인 CH_N(Manning's n value)는 신문천 유역내 하천이 잡초가 있는 자연하천임을 고려하고 수치적 안정성 확보 측면을 고려하여 모형의 기본값 0.014보다 큰 값인 0.030으로 보정하였다.

Fig. 4는 보정 및 검증기간동안의 실측치와 모의치의 수문곡선을 비교한 것으로 전체적인 수문곡선의 유출경향으로 볼 때 모의치가 실측치에 잘 적합하고 있다. Table 2

Table 1. Calibrated Model Parameters

Parameter	Definition	Calibrated value
SURLAG	Soil evaporation compensation coefficient	0.5
SLOPE	Average basin slope	2.0 times the default value
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	0.7 times the default value
EPCO	Plant uptake compensation factor	1.0
GWDELAY	Delay of groundwater recharge	0.033
CH_N	Manning's n value	0.030

Fig. 4. Comparison of the Observed and Simulated Streamflows During Calibration and Validation Periods at the Heungcheon Gauging Station

는 보정 및 검증기간동안 실측치와 모의치의 일별 유출량을 비교한 것으로 통계결과는 보정기간은 R^2 는 0.82, NSE는 0.8, 검증기간은 R^2 는 0.70, NSE는 0.66으로 분석되었다.

신둔천 유역 출구에는 관측유량이 존재하지 않아 복하천 유역에 대해 SWAT으로 모의한 결과를 관측치로 간주하여 이를 기준으로 SWAT-MODFLOW 모형의 보정 및 검증을 수행하였다. 앞서 기술한 바와 같이 복하천 유역에 대한 SWAT 모형의 보정 및 검증 결과가 양호하므로 모델링 결과를 관측치에 준하는 실제값으로 간주할 수 있는 것으로 판단하였다. Fig. 2(a)에서 소유역 9번 출구점이 신둔천과 복하천 합류점이다. 따라서 이 지점에 대한 SWAT 모의치 결과를 참값으로 보고 Fig. 2(b)의 소유역 27번 종점(신둔천 유역 출구)에서의 SWAT-MODFLOW 모의치의 적합성을 평가하였다.

SWAT-MODFLOW 모형의 검토정시 SWAT 부분의

각종 매개변수는 일부를 제외하고는 복하천 유역에 적용한 SWAT 매개변수값과 동일한 값을 부여하였다. DEM, 토지이용도, 토양도의 수치주제도와 수문기상자료 역시 SWAT 모델링에 사용한 것과 동일하다. 단, Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에서와 같이 신둔천 유역에 대해 소유역 분할 정도가 다르므로 유역경사처럼 지형과 관련된 입력변수가 다르게 추출되기 때문에 유역평균경사(SLOPE)와 경사장(SLSOIL) 변수는 복하천 유역에 대한 SWAT 보정값을 사용하지 않았고 모형에서 제공하는 기본값을 사용하였다.

Fig. 5는 신둔천 유역 출구에서의 SWAT과 SWAT-MODFLOW에 의한 모의유출량을 비교하여 도시한 것이다. 그림에서와 같이 두 모의값이 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Table 3은 보정 및 검증기간동안 SWAT과 SWAT-MODFLOW의 모의유출량을 비교한 것으로 통계결과는 보정기간은 R^2 는 0.99, NSE는 0.93, 검증기간은

Table 2. Calibration and Validation Results for Daily Streamflows at the Heungcheon Gauging Station

	Year	R^2	NSE
Calibration	2009-2010	0.82	0.81
Validation	2006-2008	0.70	0.66

Fig. 5. Comparison of the Simulated Streamflows by SWAT and by SWAT-MODFLOW for Sinduncheon Watershed

R^2 는 0.99, NSE는 0.94로 분석되었다.

신둔천 유역 출구에 대한 관측자료는 전무하지만, 신둔천 유역 중류부에 일부 관측자료가 존재하여 이를 모형의 검보정에 활용하였다. Fig. 3(a)의 소유역 8번 출구부에서 2010년 11월 1일부터 2011년 5월 20일까지의 관측유출량 자료(국토해양부 한강홍수통제소, 2011)와 갈수기 유출량 모의치가 서로 잘 적합하는지를 검토하였다. Fig. 6과 같이 SWAT-MODFLOW 모의 유출량과 관측 유출량이 도시적으로 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 두 값 간의 결정계수가 0.8 이상으로 양호한 적합 결과를 나타내었다.

본 연구에서 사용한 SWAT-MODFLOW모형은 지하수위와 하천수위의 수위차에 따라 지하수 유출입량이 결정되므로, 모의 지하수위는 하천 유출량에도 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 모의 지하수위의 타당성이 검

토되어야 하며 이에 따라 본 연구에서는 MODFLOW의 대수층 매개변수 자료를 변화시켜가면서 모의 결과를 관측치와 근접하게 조정하는 모델 보정을 수행하였다. 지하수 흐름계를 결정하는 주요 수리 특성인자로서 대수층의 수리전도도 및 저류계수, 하천 바닥 퇴적층의 전도계수, 대수층 두께, 경계조건 등이 있다. 이 중에서 시추자료와 대수층 시험 등을 통하여 얻은 대수층 두께, 수리전도도는 가급적 변화시키지 않고, 자료가 없는 하천 바닥 퇴적층의 전도계수와 2층 바닥고의 값을 변화시켜가면서 모델 보정을 수행하였다. 이전 지역 지하수 기초조사(국토해양부등, 2011)에서 수행한 장단기관측자료를 이용하여 공간분포시킨 등수위도와와의 적합을 모델 보정의 기준으로 하였다.

Fig. 7은 관측된 지하수위와 보정된 모델의 모의 결과를 나타내는 등수위선도를 비교한 것이다. 모의 지하수위가

Table 3. Calibration and Validation Results for Daily Streamflows at the Outlet of the Sinduncheon Watershed

	Year	R^2	NSE
Calibration	2009~2010	0.99	0.94
Validation	2006~2008	0.99	0.93

Fig. 6. Comparison of the Observed and Simulated Streamflows at Subbasin 8 for Sinduncheon Watershed

실제 지하수위의 공간적인 분포양상을 잘 구현하고 있다. EL.180 m 이내의 관측지하수위와 모의지하수위 간에 결정 계수(R^2)는 약 0.9로 양호하게 적합된 것으로 판단된다.

3.2 지하수 양수 전후의 하천유량 모의 결과

신둔천 유역에 대해 지표수-지하수 통합모델링을 수행 하여 지하수 이용이 하천에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. Fig. 8은 지하수를 사용하고 있는 현재 상태와 지하수 양수를 하지 않았다고 가정한 무양수의 경우에 대해 신둔천 유역의 출구부에서의 모의된 하천유량을 나타 낸 것이다. 양수로 인해서 10월 이후부터 6월까지 하천유 량의 감소를 확인할 수 있으며 연간 하천유량이 약 10% 감소되는 것으로 모의되었다. 겨울철 수막시설재배 기간인 12월부터 3월 동안에는 과다한 지하수 양수로 하 천 인근에서 지하수위가 크게 저하하지만, 배출된 지하수

가 농배수로를 따라 하천으로 직접 유출되기 때문에 지하 수위의 저하로 인한 하천수 감소가 크지 않다. 그러나 수 막재배 기간동안 낮아진 지하수위의 영향이 농번기인 4~6월에 나타나고 있으며, 특히 4월에 가장 하천수 감소가 가장 크게 발생하고 있다. Fig. 9는 지하수 이용에 따른 하 천유량의 변화를 파악하기 위해서 양수 전후의 하천유량 을 함께 도시한 것이다. 유량차이가 큰 것을 알 수 있으며, 특히 355일째(초과확률 약 97.3%)의 하천유량인 갈수량 은 40% 넘게 감소하는 것으로 모의되었다.

3.3 지하수 양수 전후의 수문성분량 모의 결과

지하수 양수에 따른 신둔천 유역의 각종 연평균 수문성 분량 변화를 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 PREC는 강수량, SURFQ는 지표유출량, LATQ는 중간유출량, GWQ는 지하수유출량, PERC는 침투량, SW는 토양수분량,

Fig. 7. Comparison of the Observed and Simulated Groundwater Levels for Sinduncheon Watershed

Fig. 8. Comparison of the Simulated Streamflows with and without Groundwater Pumping for Sinduncheon Watershed

ET는 증발산량, PET는 잠재증발산량, YIELD는 지표유출량과 중간유출량 그리고 지하수유출량의 합인 총 발생량을 의미한다. Fig. 11(a)에서와 같이 지하수 유출량이 연간 150 mm 넘게 감소하여 하천유출에 기여하는 총 발생량이 감소한 것을 볼 수 있다. 모형에서 지하수 관정이 농경지에 위치하여 용도가 농업용 관정인 경우에는 지하대수층으로부터 양수된 물이 피복 강우량에 더해지도록 처리하였기 때문에 지표면유출량, 중간유출량, 침투량, 토양수분량, 증발산량은 다소 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 지하수유출량의 급격한 감소와 기타 수문성분들의 약간의 증가로 인해 하천유출에 영향을 미치는 총 발생량은 Fig. 10(a)와 같이 연간 140 mm 감소하였다. 연평균 변화량을 무양수일 때의 값으로 나누어 무차원화된 연평균 변화율을 Fig. 10(b)에 나타내었다. 지하수 유출성분은 40%넘게 감소하였고, 다른 수문성분들은 상대적으로 작게 증가한 것을 알 수 있으며 결과적으로 신둔천 유역은 지하수 양수로 인해 하천유출이 연평균 10%를 넘게 감소하는 것으로 분석되었다.

3.4 하천-관정 이격거리별 하천수 감소량 모의 결과

현행 지하수법에는 하천구역으로부터 대통령령이 정하는 범위 300 m 안에서 지하수를 개발·이용하는 경우는 지하수영향조사서를 첨부하여 국토해양부 장관과 사전에 협의하도록 명시되어있고, 더욱이 지하수 개발·이용이 하천수량에 영향을 미친다고 인정되는 경우에는 취수량, 취수기간의 제한, 금지 요청까지 할 수 있도록 되어 있다. 이러한 협의 대상 영역인 300 m가 적절한지를 평가하기 위해서 신둔천과 죽산천 유역 내에 위치하는 관정을 하천에서 100 m 간격으로 구분하고 각 간격 내에 위치하는 관정들만 존재한다고 가정하여 지하수 이용에 따른 하천수량 감소량을 모의하였고, 모의 결과를 바탕으로 어느 영역대의 지하수 관정이 하천에 지배적으로 영향을 미치는 지를 평가하였다.

Fig. 11은 각 영역별로 지하수 이용량을 나타낸 것으로 황축의 100~200 m는 하천에서 100~200 m 만큼 떨어진 지역에서의 지하수 관정을 대상으로 하고 있음을 의미한

Fig. 9. Comparison of the Simulated Flow Duration Curves with and without Groundwater Pumping for Sinduncheon Watershed

Fig. 10. Variation of the Simulated Annual Hydrological Components Due to Groundwater Pumping for Sinduncheon Watershed

다. 지하수 이용량은 하천으로부터 이격거리가 커질수록 감소하고 있으며 특히 두 구역 모두 300 m 이내에서의 이용량이 상대적으로 많은 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 하천이격거리 구간별 지하수 이용량에 따른 하천수량 감소량을 나타낸 것으로 관정이 하천에서 멀어질수록 하천수 감소량이 증가하고 있으며, 300 m 이내 구간일 때 하천수 감소량이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 특히 이격거리 300~400 m 구간과 400~500 m 구간의 지하수 이용량은 Fig. 11과 같이 비슷하나 하천수 감소량은 300~400 m 구간의 경우가 더 크다. 이는 하천수 감소가 거리에 영향을 받고 있음을 의미한다.

거리의 영향만을 보기 위해서 하천수 감소량을 지하수 이용량으로 나누어 Fig. 13과 같이 무차원으로 나타내었다. 신둔천 유역의 경우 지하수 이용량 대비 하천수량 감소량은 이격거리 200 m 이내에서는 지하수 이용량의 40%를 넘는 하천수 감소가 크게 일어나고 있다. 이격거리 300 m를 넘어서는 구간에서는 지하수 이용량 대비 하천수 감소량이 작아지고 있어 이격거리가 커짐에 따라 하천수 감소의 영향이 둔화되고 있음을 나타내고 있다. 따라서 신둔천 유역의 경우 이격거리 300 m 이내에 위치한 지하수 관정이 하천에 지배적으로 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Fig. 11. Groundwater Pumping Rate for Each Section Distant from Stream

Fig. 12. Streamflow Depletion for Each Section Distant from Stream

Fig. 13. Ratio of Streamflow Depletion to Groundwater Pumping Rate for Each Section Distant from Stream

4. 결 론

유역단위 지표수-지하수 통합수문해석모형 SWAT-MODFLOW를 이용하여 신둔천과 죽산천 유역에 대해 지하수 이용에 따른 하천수 변화량을 평가하였다. 연구 대상 유역의 하천수 취수, 하수처리방류, 농업용 저수지 관개, 지하수 양수 등 물 체계를 고려하여 모형을 구축하였으며, 특히 농업용 저수지 운영 효과 및 지하수 배출수의 회귀 영향을 모의할 수 있도록 모형의 저수지 모듈과 물 이동 모듈을 개선하였다.

모형의 위밍업 기간을 제외한 모의 기간은 2006년부터 2011까지 6년간이며, 지하수 양수 유무에 따른 하천유출량 및 기타 수문성분량의 변화를 모의하였다. 신둔천 유역의 경우는 지하수 양수로 인해서 지하수 이용이 없는 자연 상태에 비해 연평균 하천유출량이 10% 넘게 감소하였고, 갈수량은 약 40% 만큼 감소한 것으로 분석되었다. 특히 수막시설재배로 인한 지하수위 저하 영향이 수막시설 재배가 종료된 후 농번기인 4월에서 6월 동안에 크게 나타나 지하수 이용의 시기별 효율적 이용, 관리가 필요한 것으로 분석되었다.

하천 인근에서의 지하수영향조사시 협의 대상 영역 300 m의 적정성을 검토하기 위해서 하천에서 이격거리를 100 m 간격으로 구분하고, 각 간격별 이용량만을 고려하였을 때 하천수 감소량을 모의한 결과, 대상 유역은 200~300 m 이내의 관정이 하천수량 감소에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타나 현행 협의 대상 범위는 적절한 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한강홍수통제소 “하천변 지하수 이

용에 따른 영향 평가” 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). “Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development.” *Journal of American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- 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., Sammons, N.B. (1990). *SWRRB-Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*. Texas A&M Press: Texas.
- Butler, J.J. Jr., Zlotnik, V.A., and Tsou, M.-S. (2001). “Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream.” *Ground Water*, Vol. 39, No. 5, pp. 651-659.
- Chung, I.-M., Kim, N.W., Na, H., Lee, J., Yoo, S., Kim, J., and Yang, S. (2011). “Integrated surface-groundwater analysis for the Pyoseon region, Jeju Island in Korea.” *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 27, No. 6, pp. 875-886.
- Constantz, J., and Essaid, H. (2007). “Influence of groundwater pumping on streamflow restoration following upstream dam removal.” *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 2823-2834.
- Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G., and Hotchkiss, R.H. (2002). “Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT).” *Journal of Hydrology*, Vol. 262, pp. 209-223.
- Glover, R.E., and Balmer, G.G. (1954). “River depletion from pumping a well near a river.” *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 353, pp. 468-470.
- Gyeonggi Provincial Government (2006). General planning for Bokha stream, pp. 1-27.
- Hantush, M.S. (1965). “Wells near streams with semi-pervious beds.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 70, No. 12, pp. 2829-2838.
- Hunt, B. (1999). “Unsteady stream depletion from ground water pumping.” *Ground Water*, Vol. 371, pp. 98-102.
- 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. 362-84.
- Kim, H.S., and Jeong, J.H. (2009). “Numerical analysis of horizontal collector well in riverbank filtration.” *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-10.
- 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.
- Knisel, W.G. (1980). *CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. USDA Conservation Research Report, 26.
- Lee, D.H. (2006). “Automatic calibration of SWAT model using LH-OAT sensitivity analysis and SCE-UA optimization Method.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 8, pp. 677-690.
- 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, K.S., and Chung, E.S. (2007). “Hydrological effects of climate change, groundwater withdrawal, and land use in a small Korean watershed.” *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 3046-3056.
- Lee, W.S. (2008). Estimation of sustainable groundwater yield considering stream-aquifer interactions, Ph.D. thesis. Department of Civil Engineering, Seoul National University.
- 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 (2010a). Study on estimation of optimal groundwater development rates, pp. 140-242.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010b). *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.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, and Korea Institute of Construction & Transportation Technology and Evaluation Technology (2007). *Development of optimal recharge estimation method suitable for domestic regional characteristics*, pp. 97-119.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, and Korea Water Resources Corporation (2011). *Basic groundwater investigation for Icheon province, Appendix-II*, pp. 32-46.
- Nyholm, T., Rasmussen, K.R., and Christensen, S. (2003). "Estimation of stream flow depletion and uncertainty from discharge measurements in a small alluvial stream." *Journal of Hydrology*, Vol. 274, pp. 129-144.
- Park, J.Y., Lee, M.S., Lee, Y.J., and Kim, S.J. (2008). "The analysis of future land use change impact on hydrology and water quality using SWAT model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No.2B, pp.187-197.
- Perkins, S.P., and Sophocleous, M. (1999). "Development of a comprehensive watershed model applied to study stream yield under drought conditions." *Ground Water*, Vol. 37, No. 3, pp. 418-426.
- Said, A., Stevens, D.K., and Sehlke, G. (2005). "Estimating water budget in a regional aquifer using HSPF-MODFLOW integrated model." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 1, pp. 55-66.
- Singh, S.K. (2000). "Rate and volume of stream depletion due to pumping." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 336-338.
- Sophocleous, M., and Perkins, S.P. (2000). "Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas." *Journal of Hydrology*, Vol. 236, pp. 185-201.
- Sophocleous, M., Koussis, A., Martin, J.L., and Perkins, S.P. (1995). "Evaluation of simplified stream-aquifer depletion models for water rights administration." *Ground Water*, Vol. 33, No. 4, pp. 579-588.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygar, S.R., and Perkins, S.P. (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.
- Werner, A.D., Gallagher, M.R., and Weeks, S.W. (2005). "Integrated surface-subsurface modelling of Sandy Creek and Pioneer Valley aquifers, north-eastern Australia." Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference: Where Waters Meet, Edited by Acworth, I., Macky, G., and Merrick, N., New Zealand Hydrological Society (NZHS), Auckland, New Zealand.
- Werner, A.D., Gallagher, M.R., and Weeks, S.W. (2006). "Regional-scale, fully coupled modelling of stream-aquifer interaction in a tropical catchment." *Journal of Hydrology*, Vol. 328, pp. 497-510.
- White, K.L., and Chaubey, I. (2005). "Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multi-variable SWAT model." *Journal of the American Water Resources Association* (JAWRA), Vol. 41, No 5, pp. 1077-1089.
- Zume, J., and Tarhule, A. (2008). "Simulating the impacts of groundwater pumping on stream-aquifer dynamics in semiarid northwestern Oklahoma, USA." *Hydrogeology Journal*, Vol. 16, pp. 797-810.

논문번호: 12-068	접수: 2012.06.26
수정일자: 2012.08.09/08.21	심사완료: 2012.08.21