

단일 관정 지하수 양수에 따른 하천수 감소량 평가

Assessment of Streamflow Depletion Due to Groundwater Pumping from a Well

이 정 우* / 김 남 원** / 정 일 문***

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

Abstract

Groundwater pumping from a well has different impacts on streamflow depletion because hydraulic properties of the aquifer and the stream bed differ depending on its location. Therefore, quantitative assessment of streamflow depletion due to each groundwater pumping with different well locations is needed for the effective groundwater development and streamflow management. In this study, a watershed-based surface water and groundwater integrated model, SWAT-MODFLOW was used to assess the streamflow depletion near stream reach due to groundwater pumping from a well located within the Sinduncheon watershed. The arbitrary 50 wells among the currently used groundwater pumping wells were selected within the study area and the streamflow responses to each groundwater pumping were simulated at nearby and downstream reaches. In particular, the applicability of the Stream Depletion Factor (SDF) and Stream Bed Factor (SBF), which are widely used for evaluating the degree of streamflow depletion due to groundwater pumping, was evaluated. The simulated results demonstrated that the streamflow depletion rate divided by the pumping rate significantly differ depending on well locations and distance between well and stream, showing a wide range of values from below 20% to above 90%. From the simulated results, it was found out that the SDF or the SBF can be a partial referred value but not an absolute criterion in determining whether a pumping well has a great impact on streamflow depletion or not.

Keywords : a groundwater pumping well, streamflow depletion, SWAT-MODFLOW, Stream Depletion Factor, Stream Bed Factor

요 지

지하수 양수정의 위치는 대수층내 지하수 유동과 하천-대수층의 상호작용에 영향을 미치므로 효과적인 지하수 개발·이용 및 하천수 관리를 위해서는 개별적인 지하수 관정의 양수 위치에 따른 하천수량 변화를 정량적으로 분석하는 과정이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 경기도 이천에 위치한 신둔천 유역에 대해서 단일 관정으로부터의 지하수 양수가 인근 하천구간에 미치는 영향을 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 이용하여 모의, 분석하였다. 유역내에 존재하는 지하수 관정들 중 임의로 50개를 선별하고 각각의 단일 관정의 양수로 인한 인접 및 하류부 하도 구간의 하천수 감소에 미치는 영향을 평가하였고, 특히 양수로 인한 하천 영향 판별 지표로 많이 사용되고 있는 하천고갈인자 및 하천바닥

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원 (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, 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

*** 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

인자의 적용성을 검토하였다. 각각의 단일 관정의 지하수 양수 전·후의 하천유량을 비교한 결과 양수량 대비 하천수 감소량은 작게는 20% 미만에서 크게는 90%가 넘는 등 지역 및 하천-관정 이격거리에 따라 큰 차이를 나타내었다. 하천고갈인자와 하천바닥인자 모두 하천수감소량과는 상관성이 높지 않아 양수로 인한 하천에 미치는 영향을 판정하는 절대적인 기준이 될 수는 없는 것으로 분석되었다. 하지만, 하천-관정 이격거리가 약 500m 이내인 경우에는 하천바닥인자는 하천 영향 정도를 평가하는 지표로 사용이 가능할 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 단일 지하수 관정, 하천수 감소, SWAT-MODFLOW, 하천고갈인자, 하천바닥인자

1. 서 론

하천인근 지역에서의 지하수의 과도한 이용은 지하수위의 저하를 일으켜 대수층과 연결된 하천으로의 지하수 유출량이 줄어들고 결국 하천수 감소를 유발할 수 있다(Kim et al., 2012). 따라서 하천인근에서의 지하수 개발·이용으로 인한 하천수에 미치는 영향을 예측, 평가하는 것은 효율적인 수자원 이용·관리 측면에서 매우 중요한 문제이다.

지하수 양수로 인한 하천수량의 변화를 파악하기 위해서 양수시 하천유량의 변화를 직접 관측하는 것이 가장 이상적이나 현실적으로는 직접 관측법은 비용이나 시간적인 면에서 어려우며 양수로 인한 하천수량 변화를 감지할 수 있을 정도로 매우 정밀한 측정이 요구되기 때문에 지하수 모델링 또는 지표수-지하수 통합 모델링을 통해 지하수 양수로 인한 하천 영향을 간접적으로 예측하는 것이 효과적이다. 따라서 지하수 양수로 인한 하천수량의 변화를 분석하기 위한 모델링 기반의 다양한 연구들(e.g., Sophocleous, 1995; Perkins and Sophocleous, 1999; Sophocleous and Perkins, 2000; Nyholm et al., 2003; Zume and Tarhule, 2008; Kim and Jeong, 2009)이 수행되어 왔다. 특히 최근 들어 국내에서는 유역 단위로 지하수 이용 영향을 분석한 연구들(Lee et al., 2006; Lee, 2008; Chung et al., 2011; Kim et al., 2012)이 있었다. Lee et al. (2006)은 안양천 상류유역에 대해 준분포형 장기유출모형인 SWAT을 이용하여 지하수 취수량과 건기의 하천유출감소량 간의 관계를 도출하였고, Lee (2008)는 하천-대수층 상호호흡을 모의하기 위해 총괄형 장기유출모형 TANK를 수정한 TANK-GS을 개발하고 이를 갑천 유역에 적용하여 지하수 개발 시나리오에 따른 하천유출의 장기변화를 분석하였다. Chung et al. (2011)과 Kim et al. (2012)은 지표수와 지하수의 통합거동을 유역 스케일로 장기간 모의할 수 있고 하천과 대수층의 상호유동, 양수정의 공간분포 등을 고려할 수 있는 지표수-지하수 통합수문모형 SWAT-MODFLOW를 무심천 유역과 신둔천 유역에 각각 적용하여 유역내 지하수 이용에

따른 하천수량의 변화를 분석하였다.

이러한 연구들은 유역내에 위치한 모든 관정들의 군집 영향을 분석한 것으로 유역의 수자원 관리에 유용한 정보들을 제공하고 있다. 그러나 유역내 전체 관정의 복합적인 영향을 파악하기에 앞서 각각의 개별 관정이 하천에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 연구가 우선적으로 수행될 필요가 있다. 지하수 양수정의 위치에 따라 지하 대수층 및 인근하천의 수리적 특성이 상이하기 때문에 각각의 단일 지하수 관정의 공간적 위치에 따른 하천수량 변화를 정량적으로 분석하는 것은 중요한 문제라 할 수 있다. 국내 지하수법에서도 하천인근에서의 지하수개발·이용을 허가할 때에는 지하수 양수로 인한 하천에 미치는 영향을 사전에 검토하도록 되어 있으며 이때의 관심사는 다수 지하수 관정의 군집 영향이라기보다는 단일 지하수 관정의 하천영향을 평가하는 것이므로, 단일 관정의 지하수 양수로 인한 하천수량 변화의 정량적 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 단일 관정으로부터의 지하수 양수가 인근 하천구간에 미치는 영향을 분석하고자 경기도 이천에 위치한 신둔천 유역을 연구대상유역으로 선정하고, 이 유역에 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 적용하여 지하수 양수 영향 모델링을 수행하였다. 유역내에 존재하는 지하수 관정들 중 임의로 50개를 선별하고 각각의 단일 관정의 양수로 인한 인접 및 하류부 하도구간의 하천수에 미치는 영향을 평가하였고, 특히 하천과의 이격거리, 대수층 및 하천의 수리적 특성 등의 함수로 표현된 양수로 인한 하천 영향 판별 지표인 하천고갈인자(Stream Depletion Factor)과 하천바닥인자(Stream Bed Factor)의 국내 유역 적용성을 검토하였다.

2. 지표수-지하수 통합모델 구축

2.1 대상유역

북하천의 제1지류이고 경기도 이천에 위치한 신둔천의 중점을 유역출구로 하는 유역을 본 연구의 대상유역으로

선정하였다. 대상구역의 면적은 53.45 km², 유로연장은 12.59 km이다. 신둔천 유역은 지하수 이용에 따른 하천 영향 평가를 위한 시험유역으로 선정(MLTL, 2011)되어 현재까지 계속적으로 하천수와 지하수의 상호유동 특성 분석, 지하수 이용량과 하천수 감소량간 상관관계 파악 등의 분석이 정밀하게 이루어지고 있는 유역이다. 이 유역은 논, 밭 등 농경지가 40% 넘게 상당 부분 차지하고 있으며, 신둔천 주위로 층적대수층이 넓게 분포해 있고 하천과 대수층간 수리학적 연결성이 양호하여 지하수 양수가 하천에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 지역이다. 특히 하천인근에 비닐하우스 시설재배 지역이 많이 분포해 있어 많은 양의 지하수가 연중 채수되고 있는 지역이기도 하다.

2.2 SWAT-MODFLOW 모형

SWAT 모형(Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2005)은 다양한 토양 및 토지이용 조건에 따른 물, 유사, 농업화학물질 등의 장기간 부하량을 예측하고 농업관리 방법에 따른 영향을 예측하기 위해 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 유역모델로서, 강수차단, 지표유출 및 침투, 증발 및 증산, 중간유출 및 침투, 함양, 지하수유출 등 일련의 수문순환 과정을 모의할 수 있고, 수문성분 이외에 기상, 유사, 토양온도, 작물성장, 영양물질, 살충제 등의 여러 성분 과정 또한 모의할 수 있다.

이러한 SWAT 모형의 지하수 유출해석 기능을 강화하고자 SWAT에 지하수 유동모형 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)를 완전 연동형으로 결합한 모형인 SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2004; Kim et al., 2008)

이다. 이 통합모형에서는 지하 대수층을 선형저수지로 간주하여 저수지 추적을 하는 SWAT의 지하수 해석 방법과 MODFLOW 모형으로 유동장을 계산하는 방법 중 사용자가 택일할 수 있다. SWAT의 함양량 계산 서브루틴과 MODFLOW의 함양 패키지, SWAT의 하도추적 서브루틴과 MODFLOW의 하천 패키지, SWAT의 증발산 서브루틴과 MODFLOW의 증발산 패키지, 그리고 SWAT의 물이동 계산 서브루틴과 MODFLOW의 우물 패키지 및 배수 패키지 등이 서로 연동된다. 본 연구에서는 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 이용하여 단일 관정의 지하수 양수 영향 분석을 위한 기본 모형으로 활용하였다. 단일 관정에 비해 모델링 영역이 매우 커서 연산 시간이 과다 소요되지만, 하나의 모델 구축만으로도 임의의 원하는 위치에 관정을 설정하여 모의를 할 수 있어, 전통적인 지하수 유동모형만을 이용할 경우 관심 관정 각각에 대해 개별적으로 모델링 영역을 구축하고 경계 조건도 일일이 부여해야 하는 해야 번거로움이 없는 장점이 있다. 또한 장기간의 수문, 기상학적 인자를 고려할 수 있고, 상하류가 연계된 모델링 영역이기에 단일 관정의 양수이더라도 상류지역의 변화가 하류지역에 미치는 영향 분석이 가능하다.

2.3 모형의 입력자료 구축

모형의 공간입력자료는 1:5,000 NGIS 수치지도를 이용하여 Fig. 1과 같이 해상도 30 × 30 m의 DEM을 구축하였고, 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복도(2009년) 및 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀토양도

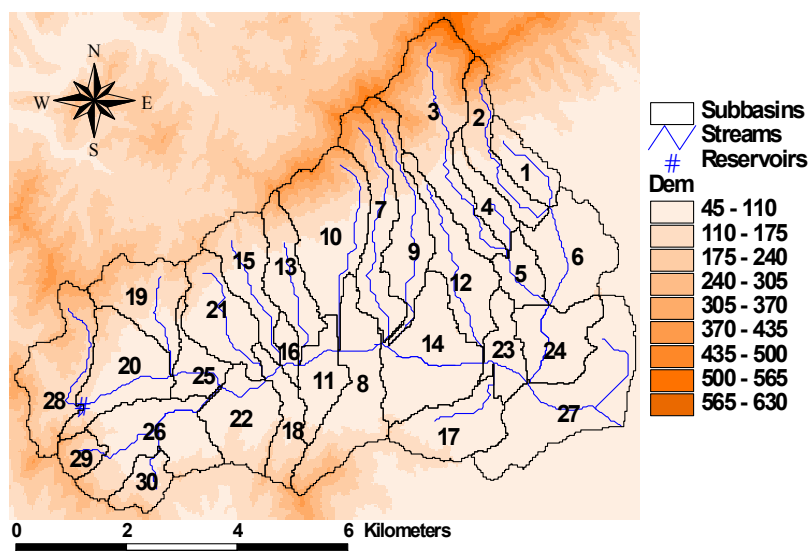


Fig. 1. DEM and Subbasins for the Sinduncheon Watershed (Kim et al., 2012)

(2006년)를 이용하였다.

온도, 습도, 풍속, 일조시간 등의 기상 자료는 기상청 이천 관측소 자료를, 강수량 자료는 국토교통부 이천 관측소 자료를 1995년부터 2011년까지 구축하였다. 지하수 이용량 자료는 이천시 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정의 일 이용량 자료(자료 누락시 취수계획량 사용)를 수집하여 모형에 입력하였고, 겨울철 수막시설재배 기간의 인한 지하수 이용량을 고려하기 위해서 관측유량 자료로부터 산정한 비닐하우스 지역의 수막시설재배용 원단위 지하수 이용량(MLTL, 2011)을 적용하여 비닐하우스 지역에서 추가로 양수되도록 모형에 입력하였다. 대상유역내 지하수 이용 총량은 약 38,000 m³/일로 추정되었고, 이중 농업용이 전체의 약 62%를 차지하고 있으며, 관정별로는 생공용 관정은 작제는 10 m³/일 미만에서 최대 800 m³/일까지, 농업용 관정은 작제는 10 m³/일 미만에서 최대 250 m³/일까지 양수되는 것으로 조사되었다.

지하수 관정 위치는 MODFLOW의 기본 연산단위인 셀과 SWAT의 기본 연산단위인 HRU를 연결하였고, 각각의 지하수 관정으로부터 양수된 물은 셀에서 HRU의 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 있게 하였다.

지하수 유동모형을 위해서 연구 대상유역을 30 m 격자 크기의 299행, 380열, 2층으로 구성하였으며, 상부의 1층은 충적층의 자유면대수층으로, 하부의 2층은 암반층인 피압/자유면대수층 변환층으로 설정하였다. 충적층 바닥고는 농어촌 공사 시추조사 자료, 이천지역 지하수 기초조사 자료 등을 이용하여 크리깅(Kriging) 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰고, 암반층 바닥고는 -100 m로 설정하였다. 대수층의 수리전도도와 저류계수는 이천지역 지하수기초조사자료, 농촌공사 보유자료, 국토해양부(MLTL, 2011)의 대수성 시험 자료 등 이용하여 크리깅을 통해 격자별 값을 보간하여 충적층은 수리전도도 약 0.4~513 m/일, 저류계수 약 0.01~0.05, 암반층은 수리전도도 약 0.018~1.17 m/일, 저류계수 약 0.001~0.009의 값을 입력하였다. 경계조건으로 유역경계부에는 무흐름 조건, 최상위 활성셀에 함양이 일어나도록 함양률 경계조건, 신둔천 및 지류에 대해 지하수 유출입이 일어나는 하천셀로 지정하여 시간중속수두 경계조건을 부여하였다. 함양률 값은 SWAT으로부터 일단위로 모의되어 MODFLOW의 활성셀에 자동으

로 입력되고, 하천수위 역시 SWAT으로부터 계산된 값이 MODFLOW로 전달되어 지하수위와 하천수위간 수위차와 하천바닥층의 수리전도성의 함수인 Eq. (1)에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다.

$$Q_{gw} = \frac{KWL}{M} (H_{gw} - H_{riv}) = \lambda L (H_{gw} - H_{riv}) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{KW}{M} \quad (2)$$

여기서, Q_{gw} 는 지하수 유출량, K 는 하천바닥층의 수리전도도, W 는 하폭, L 은 하도구간길이, M 은 하천바닥층 두께, H_{gw} 는 지하수위, H_{riv} 는 하천수위, 그리고 λ 는 Eq. (2)와 같이 표현된 하천바닥퇴적층 수리전도성이다. 이와 같이 하천바닥을 통한 지하수 유출입량은 수위차 뿐만 아니라 하천바닥층 수리전도도, 하폭, 하천바닥층두께의 값도 중요한 매개변수이다. 하폭은 SWAT 모형 구축시 DEM 자료로부터 자동 생성된 값을 하천기본계획상 하천 횡단면 자료를 토대로 보정하여 입력하였으며, 하천바닥층 수리전도도 및 하천바닥층두께는 Kim et al. (2012) 논문에서 소유역 8번 하도구간에서 침윤계 실험을 통해 산정한 하천수-지하수 상호유동량과 수두차와의 관계로부터 추정된 하천바닥층 수리전도성 값을 참고값으로 하고 지하수 유출 모의시 검보정 과정을 통해서 그 값을 결정하였다.

모형의 검보정에 대해서는 선행 논문인 Kim et al. (2012)에 자세히 기술되어 검보정 절차만 간략히 기술하였다. 1995년부터 2005년까지는 통합모형의 워밍업 기간으로 설정하고 2006년부터 2011년까지를 검보정 및 분석 기간으로 설정하였다. 신둔천 유역 출구에는 관측유량이 존재하지 않아 신둔천 유역을 포함하는 복하천 유역에 대해 검보정이 완료된 SWAT 모형으로 모의한 신둔천 출구에서의 일 유출량을 관측치로 간주하고 이와 적합할 때까지 SWAT-MODFLOW 모형의 매개변수 보정 및 검증을 수행하였고, 신둔천 중류부 구간에서 실측한 하천유량 자료(MLTL, 2011)와의 적합과정, 그리고 이천 지하수 기초조사(MLTL and KWRC, 2011)에서 측정한 지하수위 관측 자료를 이용하여 공간분포시킨 등수위도와의 적합과정 등을 통해서 모형의 매개변수 검보정을 수행하였다(Kim et al., 2012).

2.4 분석 방법

분석 절차로는 먼저 Fig. 2의 검정색 빈 동그라미로 표시된 바와 같은 유역내 위치한 전체 지하수 관정들의 양수량을 고려하여 현재 상태의 하천유량을 모의하고, 이어

서 지하수 관정을 모두 제거하여 자연 상태의 하천유량을 산정한 후, 다시 채워진 동그라미로 나타낸 각각의 단일 관정만을 고려하여 하천유량을 산정하는 순으로 하였다. 하천수 감소량은 개별 관정만을 고려했을 때와 자연 상태 일 때의 하천유량 간의 차이를 구하여 산정하였다. 시범 유역내 존재하는 관정들 중에서 비교적 양수량이 큰 지하수 관정들 50개를 선택하고 각각의 관정에 의한 하천수감소량을 산정하여 하천에 미치는 영향을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 관정의 지하수 양수에 따른 하천수 감소량

선별된 임의의 관정 50개 각각에 대해 단일 관정의 양수 전·후의 하천유량을 모의하고 그 차이를 계산하였으며, 결과의 예를 Figs. 3~6에 나타내었다. Fig. 3은 소유역 8

번 하도구간에서 약 210m 떨어진 관정에서 지하수 양수로 인한 연평균 하천수 감소량을 모의하여 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 관정이 위치한 소유역 8번의 하도 중점에서는 양수량 30m³/day의 약 73%인 22m³/day의 하천수 감소가 발생하였고, 다음 하도구간에서는 양수량 대비 약 95%인 28m³/day의 하천수 감소가 발생하였다. 관정에서 가장 인접한 하도구간보다 다음 하도구간에서 더 큰 하천수 감소량을 보이는 것은 양수로 인한 영향반경, 즉 지하수위 저하가 하류쪽 하도 인근까지도 미치고 있음을 의미한다. 이러한 하천수 감소영향이 신둔천 하류로 전달되어 유역 출구부 하도구간(소유역 27번)에서도 양수량 대비 약 95%의 하천수 감소가 발생하였다. 반면에 관정 상류쪽인 하도구간 11번, 지천 7번과 10번에서는 상대적으로 매우 작은 하천수 감소가 발생하고 있어 양수의 영향은 하류부에서 지배적으로 발생함을 알 수 있다.

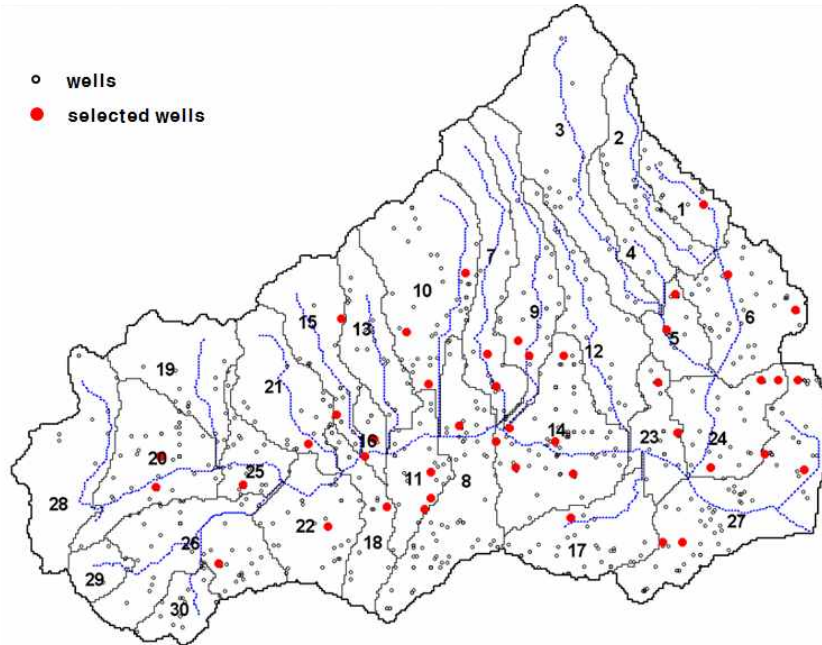


Fig. 2. Wells within Sinduncheon Watershed and Selected Wells for Analysis

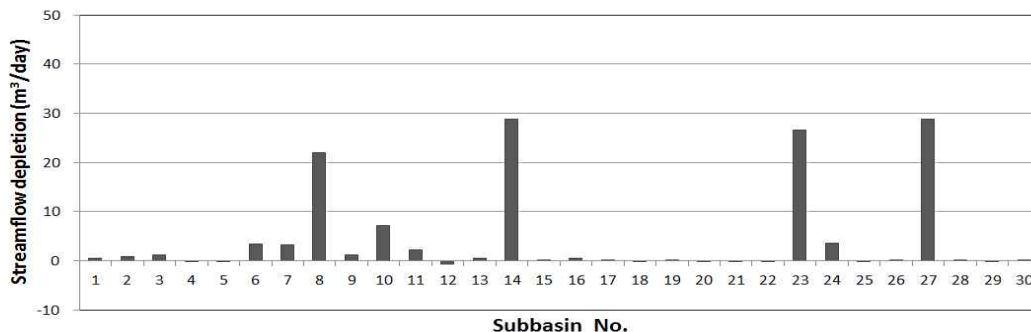


Fig. 3. Streamflow Depletion Due to Groundwater Pumping from a Well within Subbasin No. 8

Fig. 4는 소유역 21번 하도구간에서 약 110m 떨어진 관정에서 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 나타낸 것으로 양수량 55m³/day에 근접하는 하천수 감소량이 발생하였으며, Fig. 3과 마찬가지로 하천수 감소의 영향이 하류부로 전달되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 소유역 6번 하도구간에서 약 30m 떨어진 관정에서 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 나타낸 것으로 인접 하도에서는 양수량 100m³/day의 약 90%인 90m³/day의 하천수 감소가 발생하였으며 유역출구부에서는 양수량에 근접하는 하천수 감소가 발생하였다. Figs. 3~5의 경우처럼 지하수 관정이 하천에서 가까이 위치한 경우 양수량의 상당 부분이 하천수 기여분임을 알 수 있다.

Fig. 6은 앞선 Figs. 4 and 5의 경우에 비해 관정-하천간 이격거리가 긴 경우로, 소유역 23번 하도구간에서 약 510m 떨어진 관정의 지하수 양수 80m³/day로 인한 하천수 감소량 모의치를 나타낸 것이다. 관정에서 가장 가까운 23번 하도에서는 양수량의 약 50%인 40m³/day, 그 다음으로 가까운 24번 하도에서는 양수량의 약 40%인 32m³/day의 하천수 감소가 발생하였다. 두 하도구간의 하천수 감소 영향이 중첩되어 유역출구부에서는 양수량의 약 83%의 하천수 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 이처럼 관정이 하천 사이에 위치한 경우 양쪽 인근 하천 모두에 영향을 주어 합류후 하천수 감소량이 커지는 효과가 발생할 수도 있다.

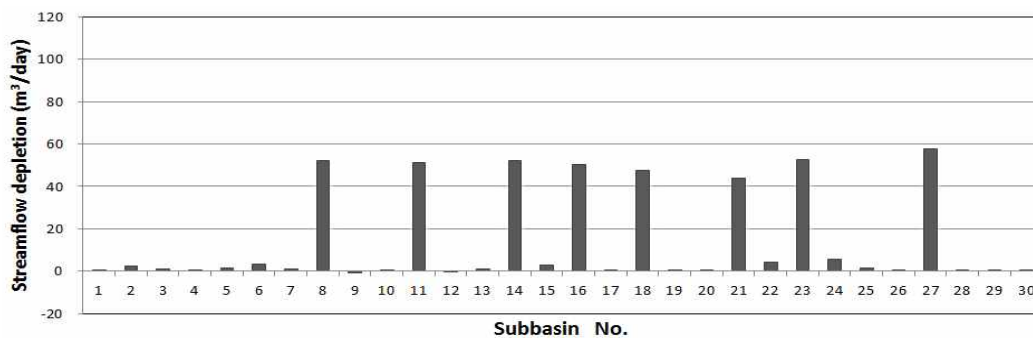


Fig. 4. Streamflow Depletion Due to Groundwater Pumping from a Well Within Subbasin No. 21

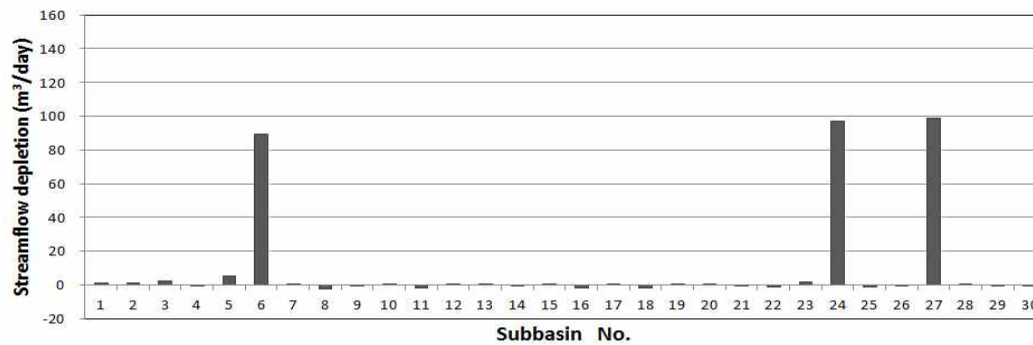


Fig 5. Streamflow Depletion Due to Groundwater Pumping from a Well Within Subbasin No. 6

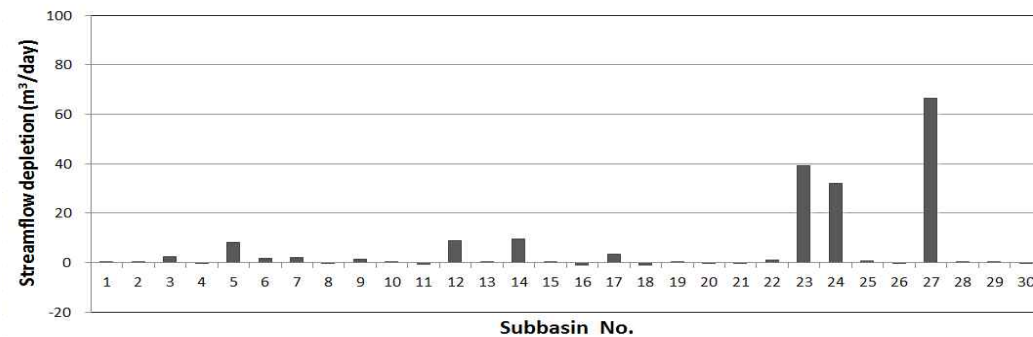


Fig. 6. Streamflow Depletion Due to Groundwater Pumping from a Well Within Subbasin No. 23

각각의 관정에 대해 모의한 최인접 하도구간의 하천수 감소량을 양수량으로 나누어 무차원 하천수 감소량을 Fig. 7에 도시하였다. 지하수 관정의 위치에 따라 양수량 대비 하천수 감소량이 작게는 20% 미만에서 크게는 90%가 넘는 등 지역 및 하천-관정 이격거리에 따라 큰 차이를 나타내었다. 전반적으로 하천 가까이에 위치한 관정들은 큰 값을 보이고 있고, 하천에서 멀리 떨어져 있는 관정일수록 작은 값을 보이고 있다. 그러나 10년 소유역 중상류에 위치한 관정과 같이 하천에 인접한 관정이라도 작은 값을, 하천에서 먼 관정임에도 큰 값을 보이는 경우도 존재한다. 즉, 이격거리 이외의 대수층 혹은 하천바닥층의 수리적 특성 등으로 지역별로 큰 차이를 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

하천과 관정의 이격거리에 따른 영향을 보다 명확하게 확인하기 위해서 Fig. 8과 같이 이격거리에 따른 무차원

하천수 감소량을 도시하였다. 전반적으로 이격거리가 증가할수록 무차원 하천수 감소량이 줄어드는 경향을 나타내고 있어 관정-하천간 이격거리는 하천에 영향을 미치는 정도를 결정하는데 중요한 인자이다. 이격거리가 약 500 m 보다 큰 경우에는 무차원 하천수 감소량 값이 0.4 미만으로 하천보다는 대수층이 양수량의 기여도가 큰 것을 알 수 있다. 500 m 보다 작은 이격거리에서는 무차원 하천수 감소량이 비교적 큰 값을 보이고는 있지만, 그림에서 좌하단부처럼 작은 값을 보이는 경우도 있는 등 값 크기에 있어서 큰 편차를 나타내고 있다. 즉, 지하수 양수로 인한 하천 영향은 단순히 하천과 관정간 이격거리만의 함수는 아니며 앞서 언급했듯이 대수층의 특성, 하천바닥의 특성 등 다른 요인에 의한 영향이 복합적으로 작용하고 있는 것이다.

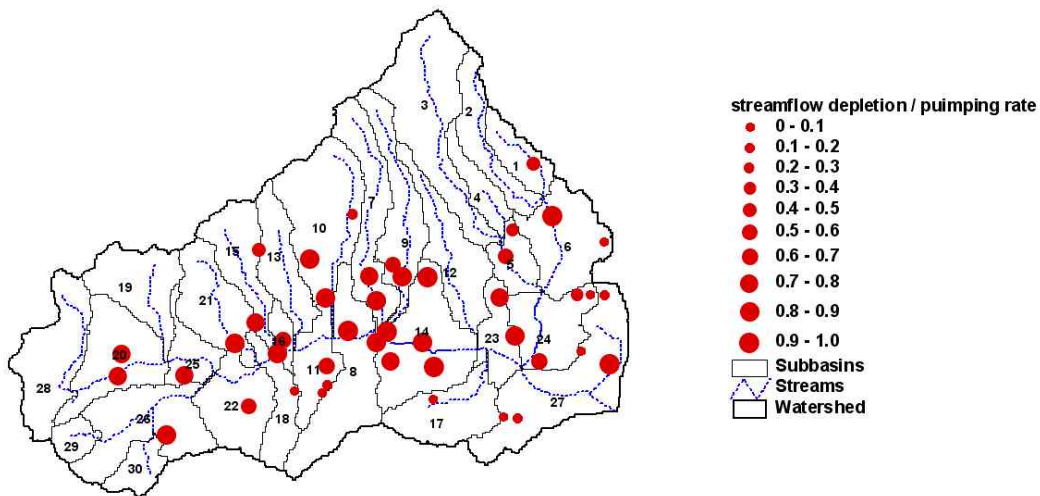


Fig. 7. Simulated Dimensionless Streamflow Depletion at Selected Wells

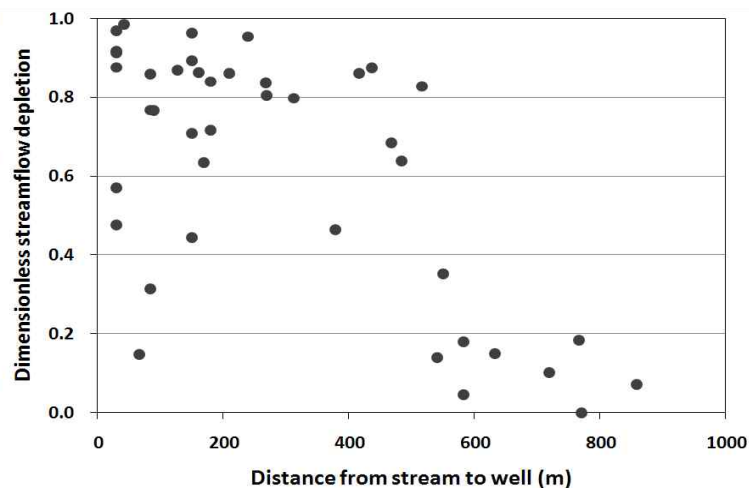


Fig. 8. Dimensionless Streamflow Depletion according to Well-stream Distance

3.2 하천 영향 평가 지표 국내 적용성 검토

지하수 양수가 하천에 영향을 주는 정도를 평가하기 위한 지표로 Eqs. (3) and (4)와 같은 하천고갈인자(SDF)와 하천바닥인자(SBF)가 사용되고 있다. 하천고갈인자는 저류계수와 하천-관정 이격거리 제곱의 곱을 투수량계수로 나눈 값으로 Eq. (3)과 같이 표현된다. 반면 하천바닥인자는 Eq. (4)와 같이 하천바닥퇴적층 수리전도성(streambed hydraulic conductance)과 이격거리의 곱을 투수량계수로 나눈 무차원 값으로, 하천바닥퇴적층 수리전도도와 하폭의 곱을 하천퇴적층 두께로 나눈 하천바닥퇴적층 수리전도성을 고려함으로써 하천바닥의 수리적 특성을 반영한 점이 그 특징이다.

$$SDF = \frac{S l^2}{T} \quad (3)$$

$$SBF = \frac{\lambda l}{T} \quad (4)$$

여기서, S 는 저류계수, l 은 하천과 관정의 이격거리, T 는 투수량계수, 그리고 λ 는 하천바닥퇴적층 수리전도성이다. 2.3절에서 언급했듯이 수리전도도, 저류계수 등은 크리깅을 통해 보간하여 격자별로 입력하였는데, 관정별 하천고갈인자 및 하천바닥인자 값을 구하기 위해 관정이 위치한 격자의 수리전도도, 대수층 두께 및 저류계수 값을 사용하였다. 양수로 인한 지하수위 저하는 대수층 두께에 비해 작다고 가정하여 충적층의 대수층 두께는 양수 전 상태일 때의 값을 사용하였다. 하천바닥퇴적층 수리전도성은 일부 측정값을 기본값으로 하고 모델링의 검보정을 통해 산정된 값을 사용하였다.

해외 연구에 따르면 하천고갈인자 값이 10보다 크거나 하천바닥인자 값이 10보다 작은 경우에는 지하수 양수가 하천에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다 (Environment Canterbury, 2000). 본 연구에서는 Eqs. (3) and (4)와 같은 양수로 인한 하천 영향 지표의 국내 적용성을 검토하였다. 이를 위해서 앞서 선별한 50개 관정에 대해 하천고갈인자 및 하천바닥인자 등에 따른 양수량 대비 하천수 감소량을 Figs. 9 and 10에 도시하였다. 관정-하천 이격거리 500 m를 기준으로 작은 경우를 채워진 동그라미 심볼로, 큰 경우를 빈 동그라미 심볼로 구분하여 나타내었다. Fig. 9는 하천고갈인자와 무차원 하천수 감소량을 나타낸 것으로 두 변수간에 큰 상관성을 보이고 있지 않으며 해외 권장값인 10을 기준으로 하는 하천수 감소 영향의 정도를 판별하기 어렵다. 특히 관정-하천 이격거리가 500 m 이내에서는 하천수 감소량이 하천고갈인자에 따라 큰 편차를 보이고 있어 하천 영향의 경중을 분간할 수 있는 명확한 기준 값을 찾기 어렵다. 반면에 이격거리가 500 m 보다 큰 경우에는 하천고갈인자가 10을 초과한 경우에는 일부를 제외하고는 무차원 하천수 감소량이 0.2 미만으로 비교적 작아 상대적으로 하천 영향이 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 하천바닥인자와 무차원 하천수 감소량을 나타낸 것으로 이격거리가 500 m 이내로 하천에서 비교적 가까이 위치한 관정인 경우에는 하천바닥인자가 작아질수록 하천수 감소량의 편차가 커지면서 그 정도의 크고 작음을 판별하기 어려운 것으로 나타났다. 하천바닥인자 값이 해외 권장값 10을 기준으로도 상대적 영향 크기를 결정하기 어렵지만, 그 값이 약 100을 넘어서부터는 무차원 하천수 감소량 값이 0.6을 초과하는 것으로 나타나 하

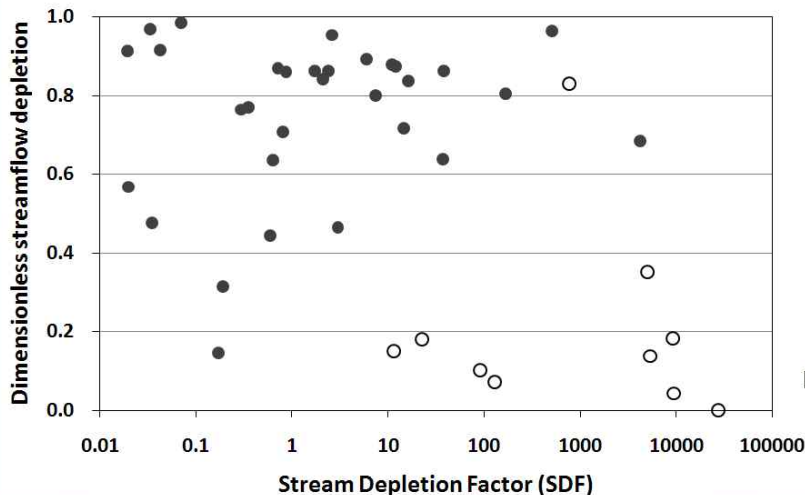


Fig. 9. Dimensionless Streamflow Depletion according to Stream Depletion Factor

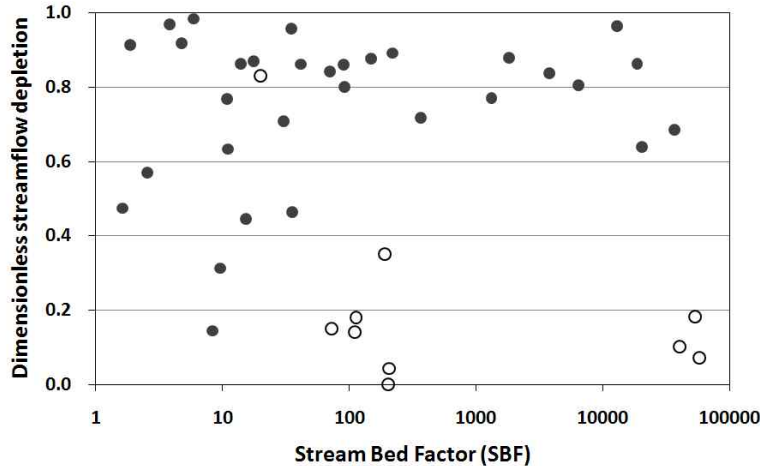


Fig. 10. Dimensionless Streamflow Depletion according to Stream Bed Factor

천에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 하천바닥인자가 클수록 하천수 감소량이 증가하는 것으로 알려져 있으나, 빈 동그라미 심볼처럼 하천바닥 수리전도성이 큰 것보다 이격거리가 커서 하천바닥인자값이 커진 경우에는 하천수 감소영향이 작게 발생하고 있다. Fig. 9와 Fig. 10의 결과로부터 알 수 있듯이 하천고갈인자만으로는 하천수 감소 영향을 절대적으로 판정하기에는 무리가 있고 하천바닥인자는 하천에서 약 500m 이내의 비교적 가까운 관정에서만 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 신둔천 유역에 적용하여 단일 관정으로부터의 지하수 양수가 하천수량에 미치는 영향을 분석하였다. 분석절차로는 먼저 유역내 위치한 전체 지하수 관정들의 양수량을 고려하여 현재 상태의 하천유량을 모의·검증한 후, 지하수 관정을 모두 제거하여 자연 상태의 유출조건을 모의하여 이를 하천수 감소량을 산정하는데 기준이 되는 하천유량을 결정하였으며, 이어서 대상유역내 존재하는 관정들 중 임의로 선별된 50개 각각의 관정에 대해 하천유량을 모의하고 이를 기준이 되는 자연유량으로부터 감하여 하천수 감소량을 산정하였다. 각각의 단일 관정의 지하수 양수에 따른 하천수 감소량 모의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었을 수 있었다.

- 1) 대상유역내에 위치한 임의의 지하수 관정 50개에 대해 양수 전, 후의 하천유량을 모의한 결과 관정의 위치에 따라 양수량 대비 하천수 감소량 값이 작게는 0.2 미만에서 크게는 0.9가 넘는 등 지역 및 하천-관정

이격거리에 따라 큰 차이를 나타내었다. 특히 하천에서 약 500m 이내에 위치한 관정들은 양수량의 상당 부분이 하천수 기여분인 것으로 나타나 하천-관정간 이격거리가 하천수 감소에 지배적인 영향 인자인 것으로 분석되었다. 그러나 공간적 위치에 따라 하천수 기여 정도에 있어서 큰 편차를 보이고 있고 경우에 따라서는 하천에 인접한 관정이 작은 기여를, 하천에서 먼 관정이 큰 기여를 나타내는 경우도 존재한다. 따라서 지하수 양수로 인한 하천 영향은 단순히 하천-관정간 이격거리만의 함수로 국한할 수 없으며 대수층의 특성, 하천바닥의 특성 등 다른 요인에 의한 영향이 복합적으로 고려해서 평가해야 한다.

- 2) 지하수 양수가 하천에 영향을 주는 정도를 평가하기 위한 지표로서 일반적으로 많이 사용되고 있는 하천고갈인자(SDF) 및 하천바닥인자(SBF)의 국내 유역 적용성을 검토한 결과 하천고갈인자는 하천수감소량과 큰 상관성을 보이고 있지 않으며 해외 권장값인 100을 기준으로 하천수 감소 영향의 정도를 결정하기 어려울 것으로 분석되었고, 하천바닥인자 역시 하천수감소량과 상관성이 높지는 않으나 하천에서 약 500m 이내의 관정에서는 해외 권장값 10보다 큰 약 100을 기준으로 하천 영향 정도의 크기를 판단할 수 있는 지표로 사용 가능할 것으로 분석되었다.

감사의 글

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

수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Arnold, J.G., Srinivasan R., Muttiah, R.S., Williams, Jr. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- 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.
- Environment Canterbury (2000). Guidelines for the assessment of groundwater abstraction effects on stream flow.
- 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., 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.
- 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.
- 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, 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 Water Resources Corporation (2011). Basic groundwater investigation for Icheon province.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sophocleous, M., and Perkins, S.P. (2000). "Methodology and application of combined watershed and groundwater 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.
- 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: 13-073	접수: 2013.09.10
수정일자: 2013.09.30	심사완료: 2013.09.30