

죽산천 주변 암반층 지하수 양수로 인한 하천수 감소 영향 분석 Assessment of Effects of Groundwater Pumping from Deep Aquifer on Streamflow Depletion

이 정 우* / 김 남 원** / 정 일 문*** / 차 준 호****

Lee, Jeongwoo / Kim, Nam Won / Chung, Il Moon / Cha, Joon Ho

Abstract

The streamflow depletion due to groundwater pumping from deep aquifer near the Juksan stream has been simulated, in this study, by using the surface water and groundwater integrated model, SWAT-ODFLOW in order to analyze the relationship between the stream depletion and hydraulic properties of aquifer and streambed, and to spatially assess the streamflow depletion. The simulated results showed that the streamflow depletion rate divided by the pumping rate for each well location ranges from 10% to 90% with reflecting the various well-stream distance, transmissivity, storativity, and streambed hydraulic conductance. In particular, the streamflow depletion exceeds about 50% of pumping rate for conditions with transmissivity higher than $10 \text{ m}^2/\text{day}$ or storage coefficient lower than 0.1. The simulated results in the form of spatial maps indicated that the spatially averaged percent depletion of streamflow is about 53.6% for five years of pumping which is lower than that for shallow aquifer pumping by 12.9%. From the spatially distributed stream depletion, it was found that higher and more rapid stream depletion to pumping occurs near middle-downstream reach.

Keywords : groundwater pumping from deep aquifer, streamflow depletion, SWAT-MODFLOW

요 지

본 연구에서는 죽산천 주변 지역에 대해 SWAT-MODFLOW 결합모형으로 암반층 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 모의하여 하천-관정 이격거리, 대수층 및 하천바닥층 수리특성 등과의 관계를 파악하고, 양수 위치에 따른 하천수 감소량을 공간적으로 표출하여 그 특징을 분석하였다. 양수정 위치에 따른 하천과의 이격거리, 투수량계수, 저류계수, 하천바닥층 수리전도성 등의 차이로 인해 지하수 양수량 대비 하천수 감소량 비율이 10~90%의 범위를 나타내었으며, 투수량계수가 $10 \text{ m}^2/\text{day}$ 보다 크거나 저류계수가 0.1보다 작은 경우 대부분 관정에서 하천수 감소율이 50%를 초과하는 것으로 분석되었다. 암반층에서 지하수를 양수할 경우 5년 동안 평균적으로 53.6%의 하천수 감소율을 나타내어 충적층 양수에 비해 12.9% 만큼 덜 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 죽산천 중하류부에서 양수 영향이 비교적 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

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

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원 (e-mail: ljw2961@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0529)

Corresponding Author, Senior Researcher, Dept. of Hydro-Science, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

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

Senior Research Fellow, Dept. of Hydro-Science, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

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

Research Fellow, Dept. of Hydro-Science, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

**** 한강홍수통제소 하천정보센터, 하천예보실장 (e-mail: jhcha@korea.kr)

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

1. 서론

지하수 개발·이용 허가를 득하기 위해서는 지하수 영향 조사를 통해 주변지역에 미치는 영향을 사전에 검토하도록 지하수법(KMGL, 2015)에 명시되어 있으며, 특히 하천 인근 지하수 개발·이용 시설에 대해서는 지하수 양수가 하천수량에 미치는 영향을 추가적으로 검토하도록 되어 있다. 이는 하천에 인접한 지역에 대해서는 지하수를 개별적이 아닌 하천수와 연계하여 관리함으로써 합리적이고 안정적인 수자원 이용을 도모하기 위한 정책적 노력의 일환이라 할 수 있다. 따라서 이러한 정책의 실효성을 높이기 위해서는 하천 주변 지역에서의 지하수 개발·이용 행위가 수량 측면에서 하천에 얼마나 영향을 미치는지를 예측, 평가할 수 있도록 기술적 뒷받침이 이루어져야 한다.

지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 산정하기 위한 방법으로 하천-대수층 연계시스템을 단순화한 조건에 대해 유도된 해석해를 이용하는 방법(Glover and Balmer, 1954; Hantush, 1965; Hunt, 1999; Singh, 2000; Butler et al., 2001), 복잡한 실제 시스템을 보다 현실적으로 반영하기 위해서 지하수유동 모형을 이용하거나(Sophocleous, 1995; Nyholm et al., 2003; Zume and Tarhule, 2008; Kim and Jung, 2009) 지표수-지하수 결합모형을 이용하는 방법(Chung et al., 2011a; Kim et al., 2012a, b, c; Kim et al., 2013), 현장에서 하천수 감소량을 직접 측정하는 방법(Hunt et al., 2001; Nyholm et al., 2001, 2003; Kim et al., 2012a), 그리고 상관관계식 형태의 경험공식을 이용하는 방법(Kim et al., 2012c) 등이 있다. 이러한 여러 방법 중에서 시간이나 비용 측면을 고려하여 적절한 방법을 택하여 지하수 양수 영향을 평가할 수 있다.

지하수 양수 위치에 따라 대수층 및 하천바닥층의 수리 지질학적 특성이 다양하여 양수로 인한 하천수량에 미치는 영향 정도가 공간적으로 다르게 나타난다. 따라서 지하수 양수 위치에 따른 하천수 감소량을 공간적으로 표출하여 양수 영향을 종합적으로 분석한 연구가 수행되었다. Hurr and Schneider (1972a, 1972b)는 상기 언급한 지하수 양수에 따른 하천수 감소량 산정 방법 중에서 해석해를 이용하여 미국 South Platte 강 주변 지역에 대해 양수 영향을 공간적으로 나타내었다. Leake et al. (2008a), Leake et al. (2008b), 그리고 Leake and Pool (2010)은 지하수 유동 모형 MODFLOW를 이용하여 각각 미국 Colorado강 유역, Sierra Vista 유역, Verde Valley 유역내 하천 주변 지역에 대해 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 모의하여 공간적으로 분석하였다. 국내에서는 Lee et al. (2015)이 지표수-

지하수 결합모형 SWAT- MODFLOW를 죽산천 주변 층적 대수층에 적용하여 지하수 양수 위치에 따른 하천수 감소량을 등치선 형태로 나타내고 양수 기간에 따른 공간적 영향 정도를 정량적으로 평가하였다. 이상과 같이 층적층 지하수 양수를 대상으로 한 Lee et al. (2015)의 연구를 제외하고는 양수 위치에 따른 하천수량에 미치는 영향을 공간적으로 분석한 국내 사례는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 Lee et al. (2015) 연구의 연장선으로 암반층에서 지하수를 양수를 했을 경우 하천수량 감소에 미치는 영향을 공간적으로 분석하고자 하였다. 경기도 안성에 위치한 죽산천 주변 지역에 대해 SWAT-MODFLOW 결합모형으로 깊은 대수층 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 모의하여 하천-관정 이격거리, 대수층 및 하천바닥층 수리특성 등과의 관계를 분석하고, 양수 기간 및 양수 위치에 따른 하천수 감소량을 공간적으로 표출하여 그 영향 정도를 정량적으로 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상 유역

지하수 양수정의 공간적 위치에 따른 하천수 감소량 변화를 분석하기 위한 대상유역으로 청미천 지류인 죽산천 유역을 선정하였다. Fig. 1에서 청색 외곽선이 청미수위표 상류유역을 나타낸 것이고, 적색 외곽선은 본 연구의 대상유역인 죽산천 유역 경계이다.

죽산천 유역의 면적은 54.20 km², 유로연장은 15.32 km, 유역평균고도는 해발 154 m, 유역평균경사는 16.1%, 유역평균폭은 3.78 km, 유역형상계수는 0.26이다. 토지이용현황은 농경지 21.86 km² (39.75%), 임야 31.86 km² (57.81%), 도시 0.45 km² (0.82%), 초지 0.89 km² (1.62%)로서 농경지와 산림 지역이 거의 대부분을 차지하고 있다(Gyeonggi Provincial Government, 2003). 유역내에 덕산, 용설 등 수 개의 작은 산업단지가 위치해 있긴 하지만 농경지 경작이 주요 경제활동인 전형적인 농촌 유역이다.

2.2 SWAT-MODFLOW 모형

연구 대상유역에 대해서 지하수 양수에 따른 하천수 감소 영향을 모의하기 위해서 준분포형 유역수문모형인 SWAT (Arnold et al., 1998)과 3차원 지하수유동모형 MODFLOW가 완전연동형으로 결합된 SWAT-MODFLOW 모형(Kim et al., 2008)을 이용하였다. 이 결합모형은 SWAT의 지하수 계산 서브루틴을 MODFLOW로 대체한 것으로, SWAT의 함양량 계산 서브루틴, 하도추적 서브루틴, 물이동 서



Fig. 1. Study Watershed (Kim et al., 2015)

브루틴 등이 MODFLOW의 함양 패키지, 강 패키지, 우물 패키지 등과 각각 연결되어 있다. SWAT의 기본 연산 단위인 HRU (Hydrologic Response Unit)와 MODFLOW의 이산화된 셀의 공간적 위치가 서로 연결되었으며, 따라서 SWAT의 HRU 단위의 함양량이 해당 위치의 MODFLOW 셀에 자동 입력된다. 또한 MODFLOW에서 셀 단위로 입력한 지하수 양수량은 그 셀이 위치한 SWAT의 HRU 또는 기타 목적지로 보내지며, 셀 단위로 계산된 하천수-지하수 교환량은 하도구간별로 합산되어 SWAT의 하도추적 모듈로 전달된다.

SWAT-MODFLOW 모형을 이용하면, 토지피복 및 토양 특성에 따른 비균질적 함양 특성, 지하수 시스템의 공간적인 수리지질특성과 지하수 양수정의 위치, 하천과 지하수간 상호유동현상을 고려한 정밀한 지표수-지하수 통합모의를 수행할 수 있다. 이외에 저수지 운영, 하천수 취수, 하수처리수 방류 등 복잡한 물 이용체계를 동시에 고려한 모델링 또한 가능한 장점이 있다.

SWAT-MODFLOW 결합모형의 적용 사례로서 Kim et al. (2008)과 Chung et al. (2011a)은 이 모형을 이용하여 무심천 유역 내 지하수 이용에 따른 하천유량의 변화를 모의하였고, Chung et al. (2011b)은 제주도 표선 유역에 대해 지하수 양수량 증가에 따른 대수층 저류량, 하천 유출량, 해안유출량 등의 변화를 모의, 분석하였으며, Kim et al. (2011)은 쌍천 지하댐의 효율성을 평가하기 위해서 댐 설치 후 지하수위 상승 및 하천유량 개선 효과를 분석하였다. 또한, Kim et al. (2012b)과 Lee et al. (2013)

은 신둔천 하천유량에 미치는 지하수 양수정의 군집적인 영향과 개별적인 영향을 분석하기 위해서 그리고, Kim et al. (2013)은 죽산천 유역에 대해 농업용 저수지 및 지하수 양수의 개별적, 복합적 영향을 분석하기 위해서 SWAT-MODFLOW 모형을 적용하는 등 지표수-지하수 통합 수문해석을 위해 유용하게 활용되고 있다.

2.3 모형의 구축

모형의 공간정보 입력자료로서 1:5,000 NGIS 수치지도로부터 해상도 30×30m의 DEM을 구축하고, 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복도와 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀토양도를 이용하여 모형의 기본 연산단위인 HRU를 생성하였다. 기온, 습도, 풍속, 일조시간 등의 기상 자료는 2001년 이후의 이천 기상 관측소 자료를 모형에 입력하였고, 강수량 자료는 국토교통부 삼죽 관측소 자료를 입력하였다.

죽산천 유역 내 지하수 관정과 농촌공사 관할의 덕산, 용설, 장계 농업용 저수지를 고려한 물 이용체계를 구축하여 입력하였다. 죽산천 유역의 지하수 시스템을 모형화하기 위해서 1개의 충적층(얕은 대수층) 및 1개의 암반층(깊은 대수층)으로 단순화하였고, 모형의 연산시간을 고려하여 셀 크기 30×30m의 272행, 386열로 이산화하였다. 충적층은 자유면대수층으로, 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 설정하였으며, 충적층 저면 고도는 해당 유역내 포함된 시추조사 자료, 안성지역 지하수 기초조사 자료(CTM et al., 2007) 등을 이용하여 공간적으로 분포

시켰으며, 암반층의 저면 고도는 해발고도를 수평으로 설정하고 모형의 검보정 과정을 통해 결정하였다. 대수층의 수리특성값은 농촌공사 보유자료, 안성지역 지하수기초조사자료(CTM et al., 2007), 본 연구에서 수행한 대수성 시험 자료 등을 이용하여 충적층 및 암반층 각각에 대해 공간분포시켰다.

지하수 이용량 자료는 안성 지자체의 허가 및 신고 관정 자료를 수집하여 모형에 입력하였다. 농업용 저수지의 저류 및 관개 영향을 고려하기 위해서 저수량 관측 자료와 저수지 유입량 모의 자료를 기반으로 저수지 물수지 분석을 통해 도수로 방류량 및 하천 방류량을 추정하도록 모형을 개선하고, 유역내에 존재하는 덕산, 용설, 장계 저수지의 저수량을 모형에 입력하였다.

모형의 검보정을 위해서 안성 지하수 기초조사(CTM et al., 2007)에서 측정한 죽산천 하류부(용설천 합류부)에서의 측정한 저수량 자료와 유역내 지하수위 관측자료로부터 도출한 등수위분포도를 활용하였다. 관측 유출 및 지하수위의 적합할 때까지 반복 모의를 통해 유출곡선 지수 CN2, 경사장 SLSOIL, 함양지체시간 GWDELAY, Manning 조도계수, 하상수리전도도, 2층 바닥고 등의 매개변수를 보정하였다. Fig. 2는 죽산천 유역에 대한 관측 및 모의 지하수위로 부터 얻어진 등수위도를 비교한 것으로 모의 지하수위가 실제 지하수위의 공간적인 분포양상을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 모형의 구축 및 검보정에 관해 자세한 사항은 Kim et al. (2012)과 Kim et al. (2013)을 참조할 수 있다.

2.4 분석 방법

Lee et al. (2015)에서는 죽산천 주변 500m 이내에 위치한 실제 지하수 관정 각각에 대해 충적층 지하수 양수

로 인한 인근 하천의 유량 변화를 모의하여 그 결과를 공간적으로 나타내었다. 본 연구에서도 이와 같은 방법을 준용하였으며, 지하수 관정의 중방향 위치를 1층 충적층에서 2층 암반층으로 조정하여 상대적으로 투수성과 저류성이 작은 깊은 대수층에서 양수했을 경우 하천수 감소량을 모의하였다.

Fig. 3은 충적층 및 암반층의 수리확산계수(=투수량계수/저류계수) 분포도로서 횡축의 TMX, 종축의 TMY는 각각 TM 좌표계의 X 및 Y 좌표를 의미하며 동그라미 심볼의 위치가 지하수 관정의 위치이고 그 크기가 수리확산계수의 크기를 나타내고 있다. 암반층의 수리확산계수가 전반적으로 충적층에 비해 작으며, 따라서 암반층 양수 영향이 하천에 도달하는 시간이 충적층 양수의 경우보다 보다 지체될 것임을 예상할 수 있다.

각 지하수 관정에 대한 하천수 감소량은 지하수 양수가 없을 때의 하천유량에서 지하수 양수가 있을 때의 하천유량과의 차이로부터 구하였다. 이를 하천변 및 하저면의 수리특성값에 따라 도시하여 상호간의 양상을 분석하였고, 각 관정 위치별 하천수 감소량을 공간적으로 보간하여 하천수 감소량도를 작성하고 그 특성을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대수층 및 하상 수리특성에 따른 지하수 양수 영향

죽산천 양안 500m 이내에서 선별한 관정 각각에 대해 생공용 지하수 허가량의 기준이 되는 100 m³/day를 허가 기간 5년 동안 암반층에서 양수했을 때 인근 하도 구간의 하천수 감소량을 모의하여 그 결과를 Figs. 4~6에 나타내었다.

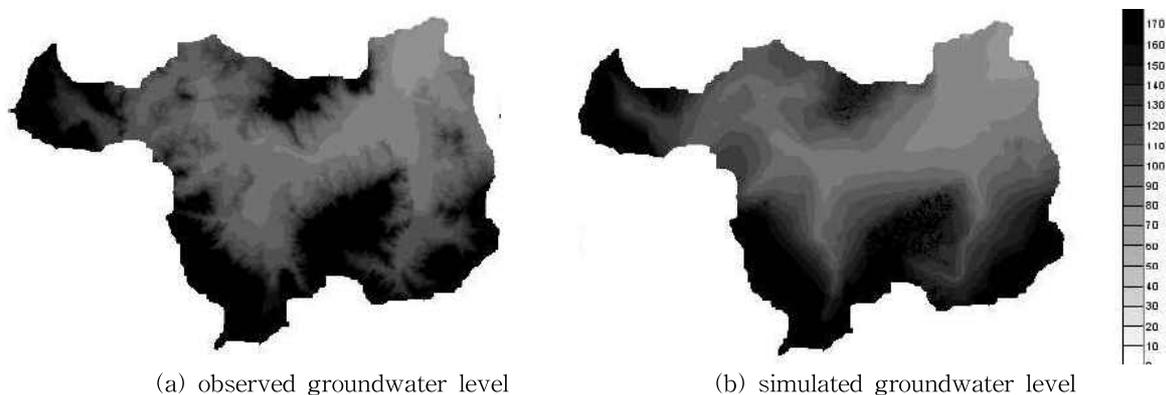
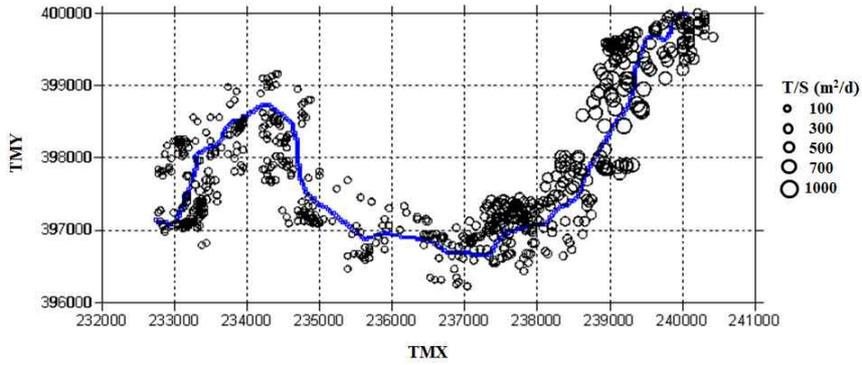
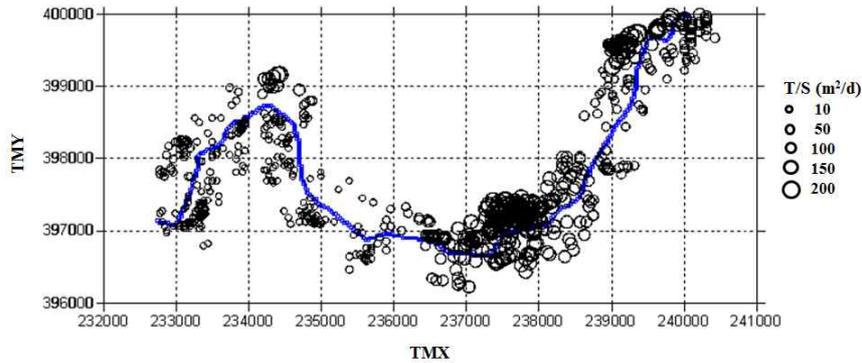


Fig. 2. Comparison of Observed and Simulated Groundwater Level for Juksancheon Watershed (Kim et al. 2012)



(a) 1st layer



(b) 2nd layer

Fig. 3. Hydraulic Diffusivity at Selected Wells

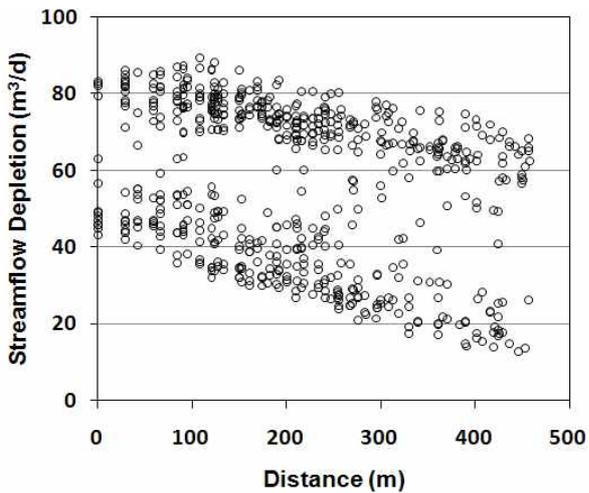


Fig. 4. Streamflow Depletion according to Well-stream Distance

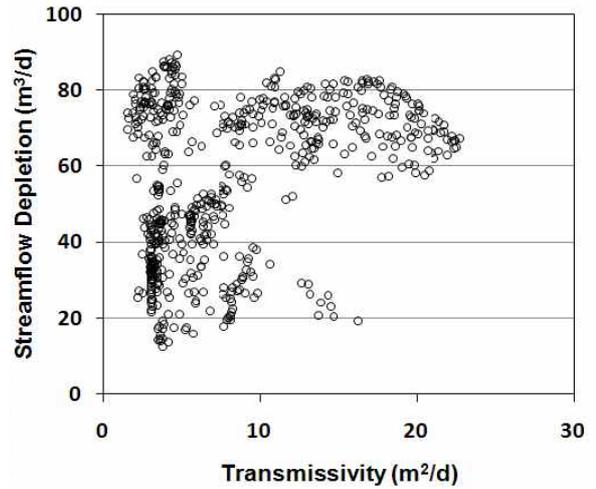


Fig. 5. Streamflow Depletion according to Transmissivity

Fig. 4는 모의한 5년 평균 하천수 감소량을 하천과 관정 간의 이격거리에 따라 도시한 것으로 이격거리가 증가할수록 하천수 감소량이 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 이격거리의 영향은 받고 있지만 투수량계수, 저류계수, 하저면 수리특성치 등 다른 인자들과의 복합적 영향으로 양수

량에 대한 하천수 감소량인 하천수 감소율은 10~90% 범위로 큰 편차를 보이고 있다. 이격거리에 따른 하천수 감소량 분포가 두 개의 선형 분포로 구분되어 나타나는데, 이는 Fig. 3의 수리확산계수 분포도에서 보이는 바와 같이 중류 구간 및 최하류부 좌안측처럼 수리확산계수가 큰 지

역과 그 외 작은 지역이 구분되어 분포되었기 때문이다.

Fig. 5는 양수 기간 5년 동안의 하천수 감소량 평균치를 암반층 투수량계수에 따라 도시한 것으로 전반적으로 투수량계수가 증가할수록 하천수 감소량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 일부 관정을 제외하고는 투수량계수가 약 $10\text{ m}^2/\text{day}$ 를 넘어서부터는 하천수 감소율이 대부분 60%를 초과하고 있다. 투수량계수가 상대적으로 작은 경우 저류계수, 하천과의 이격거리 등 다른 변수와의 복합적 영향으로 하천수 감소율의 편차가 매우 크게 나타나고 있다.

저류계수는 투수량계수와 함께 수리확산 정도를 결정하는 중요한 변수로 저류계수가 작을수록 수리확산계수(=투수량계수/저류계수)가 커지기 때문에 양수 영향이 하천에 도달하는 시간적 반응 속도가 빨라진다. 양수 기간 5년 동안의 하천수 감소량 평균치를 암반층 저류계수에 따라 Fig. 6과 같이 도시하였다. 전반적으로 저류계수가 작을수록 하천수 감소량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 대수층의 저류능력이 낮을수록 외부 스트레스에 따른 지하수두의 동적 변화가 크게 발생하기 때문에 지하수 양수로 인한 큰 폭의 지하수두 감소가 하천으로의 유동량 감소를 크게 유발한 것이다.

Fig. 7은 양수 기간 5년 평균 하천수 감소량 모의치를 하천바닥층 수리전도도와 하폭의 곱을 하천바닥층 두께로 나눈 값인 하천바닥층의 수리전도성에 따라 나타낸 것으로 수리전도성이 커질수록 하천수 감소량이 증가하는 양상을 보이고 있다. 약 $10\text{ m}/\text{day}$ 전, 후로 하천수 감소량 변동폭이 큰 것으로 나타나고 있으며 하천-관정 이격거리, 대수층의 투수성 등 다른 인자들과의 복합적 영향으

로 그 크기가 결정되고 있다.

3.2 공간적 지하수 양수 영향

지하수 관정의 공간적인 위치에 따른 하천수량에 미치는 영향을 보다 용이하게 파악할 수 있도록 Figs. 8~11과 같이 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 공간적으로 표출하였다. Fig. 8은 죽산천 좌우안 500m 이내 지역에 대해 양수 후 1년 경과하였을 때 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것이며, 그림 우측의 스케일은 양수량 대비 하천수 감소량인 하천수 감소율(%)을 나타내고 있다. 하천에서 멀어질수록 하천수 감소 영향이 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 하류부가 하천과 대수층간 수리적 연결성이 크기 때문에 하천수 감소율이 큰 값을 보이고 있다. 죽산천 주변 500m 이내 지역에서는 하천수 감소율이 20% 미만인 지역의 면적은 전체 면적 대비 약 39.2%, 감소율이 20~40% 지역은 17.9%, 감소율이 40~60% 지역은 20.8%, 감소율이 60~80% 지역은 19.1%, 그리고 감소율이 80% 초과 지역은 3.0%로 산정되었다.

Fig. 9는 양수 후 2년 경과하였을 때 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것으로서 Fig. 6에 비해 하천수 감소 영향이 제내지쪽으로 더 크게 미치고 있다. 그림에서 하천수 감소율이 20% 미만인 지역은 전체의 약 13.7%, 감소율이 20~40% 지역은 28.0%, 감소율이 40~60% 지역은 14.7%, 감소율이 60~80% 지역은 26.0%, 감소율이 80% 초과 지역은 17.6%로 분석되었다.

Fig. 10은 양수 후 5년 경과하였을 때 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것으로서 하천수 감소율이 20% 미만인 지역은 전체의 약 0.0%, 감소율이 20~40% 지역은

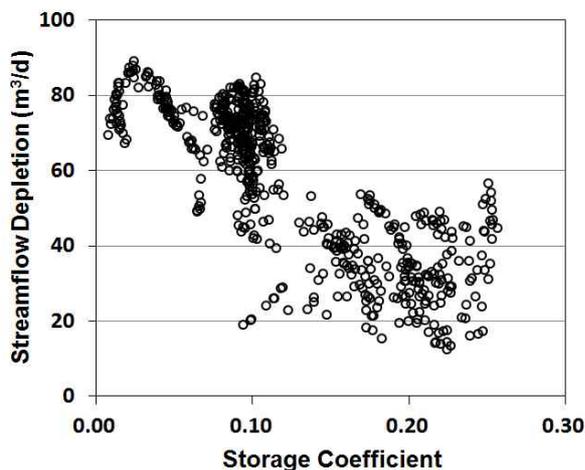


Fig. 6. Streamflow Depletion according to Storage Coefficient

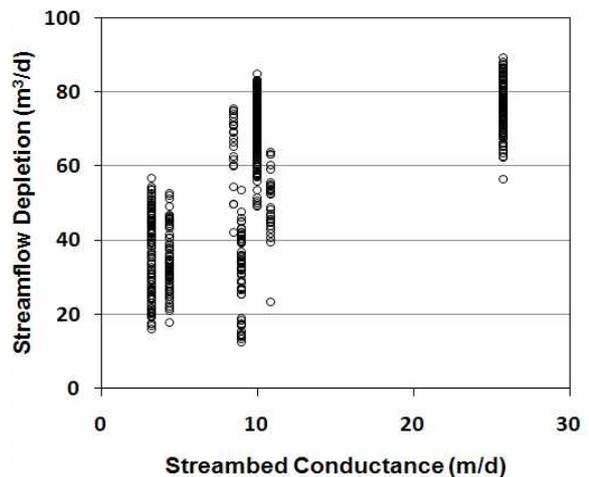


Fig. 7. Streamflow Depletion according to Streambed Hydraulic Conductance

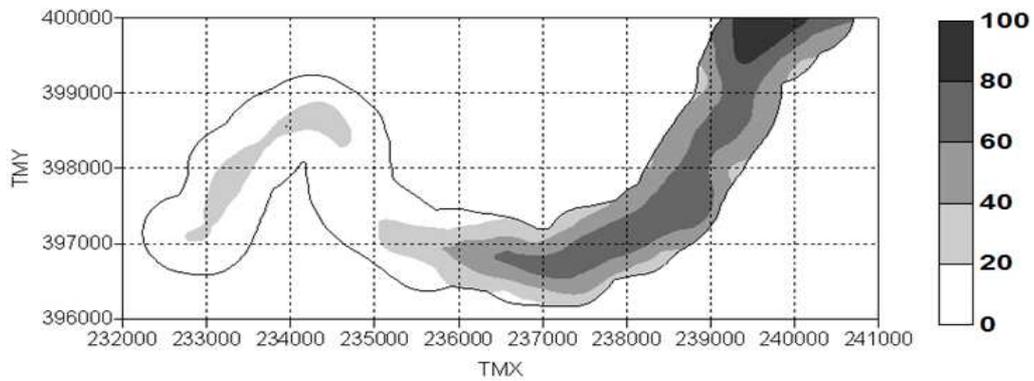


Fig. 8. Percent Streamflow Depletion in 1 Year by Pumping Wells

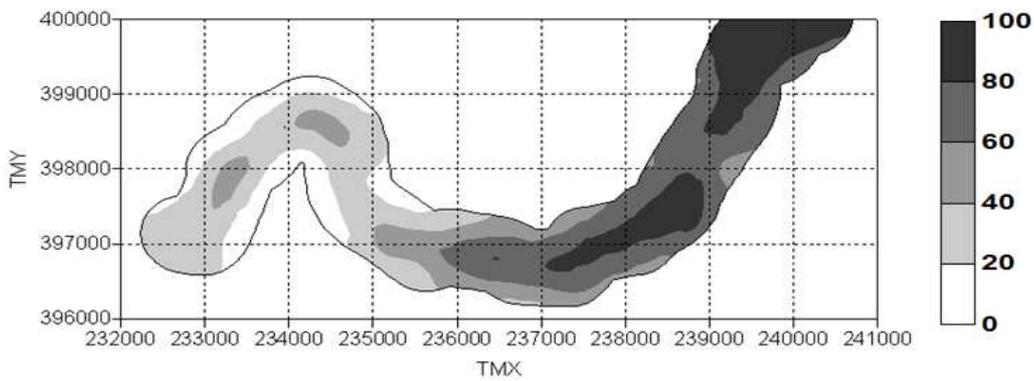


Fig. 9. Percent Streamflow Depletion in 2 Years by Pumping Wells

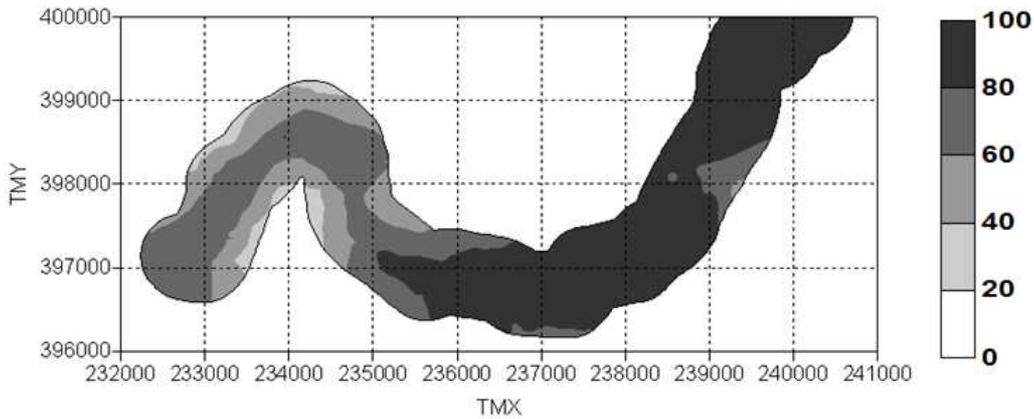


Fig. 10. Percent Streamflow Depletion in 5 Years by Pumping Wells

3.5%, 감소율이 40~60% 지역은 15.3%, 감소율이 60~80% 지역은 30.2%, 감소율이 80% 초과 지역은 51.0%로 분석되어 대부분의 지역이 감소율이 60%를 넘는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 양수기간 5년 동안 평균적인 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것으로서 중하류부 구간은 하천수 감소율이 대부분 60%를 넘고 있으며 국지적으로 80%를 넘는 지역이 일부 나타나고 있다. 상류구간은 하천수 감

소율이 20~40%인 지역이 지배적으로 중하류부에 비해 지하수 양수로 인한 영향이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 하천수 감소율이 20% 미만인 지역은 전체의 약 4.9%, 감소율이 20~40% 지역은 24.5%, 감소율이 40~60% 지역은 25.7%, 감소율이 60~80% 지역은 37.3%, 감소율이 80% 초과 지역은 7.7%로 분석되었다. 전체 공간 평균은 53.6%의 감소율로 산정되어 선행 논문(Kim et al., 2015)의 충적층에 대한 결과 66.7%에 비해 약 12.9% 감소하는

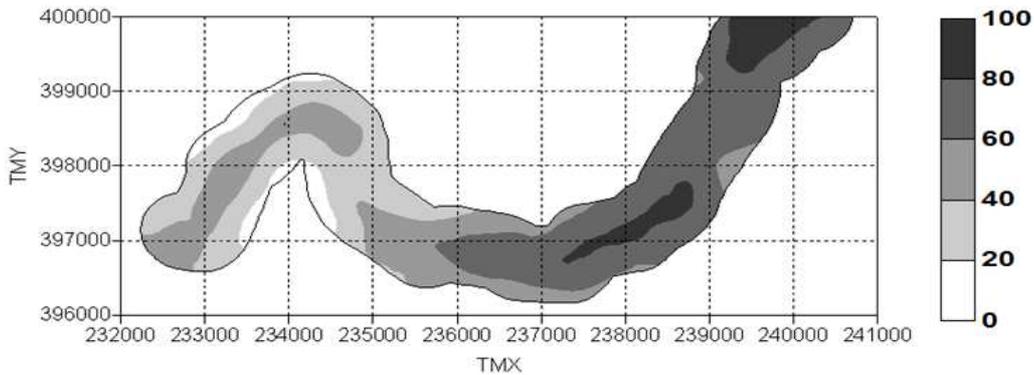


Fig. 11. Percent Streamflow Depletion for 5 Years by Pumping Wells

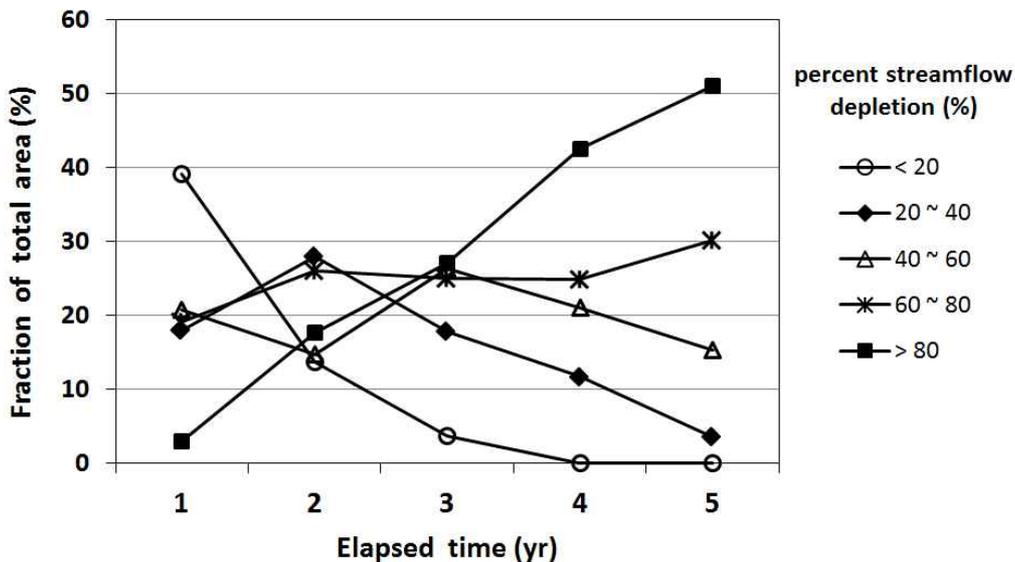


Fig. 12. Fraction of Total Area for Percent Streamflow Depletion according to Elapsed Time

것으로 나타났다.

Fig. 11을 이용하면 지하수 개발·이용 허가기간 5년 동안 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 추정할 수 있다. 예를 들어 TMX 236000, TMY397000 지점에서 지하수 양수를 200 m³/day를 할 경우 예상되는 하천수 감소량은 Fig. 9에서 해당 좌표에 대한 약 60%의 하천수 감소율에 양수량 200 m³/day을 곱해 약 120 m³/day 만큼 발생하는 것으로 추정할 수 있다.

이상의 결과로부터 Fig. 12와 같이 하천수 감소율 구간을 5개로 구분하고 경과년수에 따른 각 구간별 지배면적을 표시하였다. 지역에 따른 대수층 및 하천바닥의 수리 특성의 차이로 양수 경과년수에 따른 하천수 감소율 구간별 지배면적이 변하고 있음을 알 수 있다. 경과년수가 증가할수록 하천수 감소율이 큰 지역이 점차 증가하고 있으

며, 특히 경과년수 4년 이후에는 하천수 감소율이 전 지역이 20%를 초과하고, 경과년수 5년에는 80%를 넘는 지역이 연구 대상 면적의 약 50%를 차지하고 있으며 대부분의 지역이 60%를 넘는 것으로 분석되었다.

Table 1은 경과년수에 따른 하천수 감소율 구간별 지배면적을 정리한 것으로 선행 논문(Kim et al., 2015)을 참조하여 충적층에 대한 결과와의 차이를 괄호 안에 함께 나타내었다. 괄호 안의 값은 암반층에 대한 결과에서 충적층의 결과를 감한 값으로 하천수 감소율이 80% 초과 구간에서는 모두 음의 값을 보여 충적층 양수의 경우에 비해 지배면적이 감소하였다. 암반층 5년 양수기간 동안 평균적으로 하천수 감소율이 60%를 넘는 지역이 충적층에 비해 줄어들었으며, 특히 80% 초과 지역이 21.6% 만큼 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Fraction of Total Area (unit: %)

Elapsed time(yr) Stream depletion ratio(%)	1	2	3	4	5	0~5(avg)
< 20	39.2(29.8)	13.7(9.8)	3.7(3.0)	0.0(-0.1)	0.0(0.0)	4.9(3.7)
20~40	17.9(1.3)	28.0(17.9)	17.8(8.9)	11.7(5.7)	3.5(2.2)	24.5(13.9)
40~60	20.8(-1.8)	14.7(-3.4)	26.4(10.8)	21.0(9.0)	15.3(3.9)	25.7(6.5)
60~80	19.1(-13.1)	26.0(-7.6)	25.0(-11.0)	24.9(0.3)	30.2(11.6)	37.3(-2.3)
> 80	3.0(-16.8)	17.6(-16.8)	27.1(-11.7)	42.5(-14.7)	51.0(-17.7)	7.7(-21.6)

4. 결 론

본 연구에서는 경기도 안성에 위치한 죽산천 주변 지역에 대해 SWAT-MODFLOW 결합모형으로 암반층 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 모의하여 하천-관정 이격거리, 대수층 수리특성, 하천바닥층 수리특성 등과의 관계를 분석하고, 양수 위치에 따른 하천수 감소량을 공간적으로 표출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하천 주변에 실제로 위치한 지하수 관정 각각에 대해 양수 전·후의 5년 평균 하천유량 차이를 분석한 결과 지하수 양수량 대비 하천수 감소량은 하천과 관정간의 이격거리가 증가할수록 감소하는 양상을 나타내었으나 지역적으로 투수량계수, 저류계수, 그리고 하천바닥층 수리전도성의 차이로 인해 10~90%의 범위를 보이는 것으로 분석되었다.
- 2) 하천수 감소량은 투수량계수 및 하천바닥층 수리전도성이 크고 저류계수가 작아짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 일부 관정을 제외하고는 투수량계수가 약 10 m²/day, 하천바닥층 수리전도성이 약 25 m/day를 넘거나 저류계수가 0.1보다 작은 경우에 하천수 감소율이 대부분 50%를 초과하였다.
- 3) 지하수 양수정 위치에 따라 대수층 및 인근 하천의 수리지질학적 특성이 상이하여 지하수 양수로 인한 하천수 감소량이 공간적으로 다르게 나타남을 확인할 수 있었으며, 양수가 진행될수록 하천수 감소율이 큰 지역이 점차 제내지쪽으로 확대되어 경과년수 5년에는 대부분의 지역이 하천수 감소율이 60%를 넘는 것으로 분석되었다.
- 4) 죽산천 주변 지역 암반층에서는 양수 기간 5년 동안 평균적으로 53.6%의 하천수 감소율을 보여 층적층에 대한 결과 66.7%에 비해 12.9% 만큼 감소하였으며, 특히 하천수 감소율이 80% 초과하는 지배면적이 크게 감소하는 것으로 분석되었다.

- 5) 죽산천 중하류부 구간 주변지역은 양수기간 5년 동안 하천수 감소율이 대부분 60%를 넘으며, 반면에 상류 구간 주변지역은 전반적으로 40% 미만의 하천수 감소율을 보이고 있어 지하수 양수로 인한 영향이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 하천수량 관리측면에서만 보면, 죽산천 상류부와 같이 하천에 미치는 영향이 작은 지역은 하천수 취수보다는 지하수 개발·이용을 권장하고, 죽산천 하류부와 같이 지하수 양수 영향이 큰 지역은 층적층보다는 암반 대수층에서 지하수를 채수하도록 하여 하천수량에 미치는 영향을 최소화하도록 유도해야 할 것이다.

감사의 글

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

References

- 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.
- 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. (2011a). "Integrated surface-ground-water analysis for the Pyoseon region, Jeju Island in

- Korea." *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 27, No. 6, pp. 875-886.
- Chung, I.-M., Lee, J., and Kim, N.W. (2011b). "Estimating exploitable groundwater amount in Musimcheon watershed by using an integrated surface water-groundwater model." *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 44, No. 5, pp. 433-442.
- Construction and Transportation Ministry, Korea Water Resources Corporation, and Korea Rural Community (2007). Basic groundwater investigation for Anseong province.
- 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 (2003). General planning on Chungmi stream maintenance.
- 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. 37, pp. 98-102.
- Hunt, B., Weir, J., and Clausen, B. (2001). "A stream depletion field experiment." *Ground Water*, Vol. 39, No. 2, pp. 283-289.
- Hurr, R.T. and Schneider, Jr. P.A. (1972b). *Hydrogeologic characteristics of the valley-fill aquifer in the Sterling reach of the South Platte River valley, Colorado*, U.S. Geological Survey Open-File Report 73-126.
- Hurr, R.T., and Schneider, Jr. P.A. (1972a). *Hydrogeologic characteristics of the valley-fill aquifer in the Julesburg reach of the South Platte River valley, Colorado*, U.S. Geological Survey Open-File Report 73-125.
- 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.
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M., and Kim, C.H. (2012a). "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.
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M., and Lee, M.H. (2013). "Combined effects of groundwater abstraction and irrigation reservoir on streamflow." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 7, pp. 719-733.
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M., and Sung, G.Y. (2012b). "Analysis of effects of groundwater abstraction on streamflow for Sinduncheon watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 12, pp. 1259-1273.
- Kim, N.W., Lee, J., Lee J.E., and Won, Y.S. (2012c). "Development of relational formula between groundwater pumping rate and streamflow depletion." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 12, pp. 1243-1258.
- Kim, N.W., Na, H., and Chung, I.M. (2011). "Integrated surface-groundwater hydrologic analysis for evaluating effectiveness of groundwater dam in Ssangcheon watershed." *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 44, No. 6, pp. 525-532.
- Korea Ministry of Government Legislation, KMGL (2015). Law of groundwater, <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=166554#0000>.
- Leake, S.A., and Pool, D.R. (2010). *Simulated effects of groundwater pumping and artificial recharge on surface-water resources and riparian vegetation in the Verde Valley sub-basin, central Arizona, U.S.* Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5147, p. 18.
- Leake, S.A., Greer, W., Watt, D., and Weghorst, P. (2008a). *Use of superposition models to simulate possible depletion of Colorado River water by groundwater withdrawal*, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5189, p. 25.
- Leake, S.A., Pool, D.R., and Leenhouts, J.M. (2008b). *Simulated effects of ground-water withdrawals and artificial recharge on discharge to streams, springs, and riparian vegetation in the Sierra Vista Subwatershed of the Upper San Pedro Basin, southeastern*

- Arizona, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008- 5207, p. 14.
- Lee, J., Kim, N.W., and Chung, I.M. (2013). "Assessment of streamflow depletion due to groundwater pumping from a well." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 11, pp. 1079-1088.
- Lee, J., Kim, N.W., Chung, I.M., and Lee, M.H. (2015). "Spatial assessment of effects of near-stream groundwater pumping on streamflow depletion." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA (in press).
- 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.
- Nyholm, T., Christensen, S., and Rasmussen, K.R. (2001). "Flow depletion in a small stream caused by groundwater abstraction from wells." *Ground Water*, Vol. 40, No. 4, pp. 425-437.
- 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.
- 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.
- Singh, S.K. (2005). "Rate and volume of stream flow depletion due to unsteady pumping." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 6, pp. 539-545.
- 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.

<p>paper number : 15-046 Received : 15 June 2015 Revised : 20 July 2015 / 4 August 2015 Accepted : 4 August 2015</p>
