

하천변 지하수 양수로 인한 하천수 감소 영향의 공간적 평가 - 죽산천 유역을 중심으로 -

Spatial Assessment of Effects of Near-Stream Groundwater Pumping on Streamflow Depletion

이 정 우* / 김 남 원** / 정 일 문*** / 이 민 호****
Lee, Jeongwoo / Kim, Nam Won / Chung, Il Moon / Lee, Min Ho

Abstract

The objective of this study is to spatially assess the streamflow depletion due to groundwater pumping near the main stream of Juksanchoen watershed. The surface water and groundwater integrated model, SWAT-MODFLOW, in this study, was used to simulate streamflow responses to each groundwater pumping from wells located within 500 m from the stream. The simulated results showed that the streamflow depletion rate divided by the pumping rate for each well location ranges from 20% to 96%. In particular, the streamflow depletion exceeds 60% of pumping rate if the distance between stream and well is lower than 100 m, hydraulic diffusivity is higher than $500 \text{ m}^2/\text{d}$, and streambed hydraulic conductance is above 25 m/d . The simulated results were also presented in the form of spatial distribution maps that indicate the fraction of the well pumping rate in order to show the effect of a single well more comprehensively and easily. From the developed areal distribution of stream depletion, higher and more rapid responses to pumping occur near middle-downstream reach, and the spatially averaged percent depletion is about 66.7% for five years of pumping. The streamflow depletion map can provide objective information for the near-stream groundwater permission and management.

Keywords : Near-stream groundwater pumping, Streamflow depletion, SWAT-MODFLOW

요 지

본 연구에서는 죽산천 주변 지역에 대해 지하수 양수에 따른 하천수 감소 영향을 공간적으로 분석하였다. 하천 주변 500 m 이내에 위치한 지하수 관정 각각에 대해 지표수-지하수 결합모형 SWAT-MODFLOW를 이용하여 양수 후 하천수 감소량을 반복적으로 모의하였다. 모의 결과, 양수량 대비 하천수 감소율이 20~96%의 범위로 큰 차이를 보였으며, 특히, 하천과 관정간 이격거리가 100 m 이내, 수리확산 계수가 $500 \text{ m}^2/\text{d}$ 초과, 하천바닥층 수리전도성이 25 m/d 를 초과한 경우에 양수량 대비 하천수 감소율이 60%를 넘어 양수 영향이 큰 것으로 분석되었다. 지하수 관정의 공간적인 위치에 따른 하천수 감소 영향을 정량적으로 쉽게 파악할 수 있도록 관정 위치별 하천수 감소량을 양수량 대비 퍼센트 값을 가지는 등치선 곡선으로 나타내었다. 죽산천 중하류구간 주변지역이 상류지역에 비해 지하수 양수로 인한 영향이 단기간에 크게 하천에 도달하였으며, 양수기간 5년 동안 평균적으로 약 66.7%의 하천수 감소율이 발생하는 것으로 분석되었다. 하천수량에 미치는 지하수 양수 영향을 공간적으로 표출함으로써 하천변 지하수 허가 관리에 있어 객관적인 정보로 활용할 수 있을 것이다.

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

* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원 (e-mail: ljw2961@kict.re.kr)
Senior Researcher, Dept. of Hydro-Science, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0529)
Corresponding Author, 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, 연구원(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, 연구사(e-mail: leeminho@korea.kr)
Researcher, Han River Flood Control Office, 328 Dongjakdae-ro, Seocho-gu, Seoul 137-049, Korea

1. 서론

농작물 재배 및 생공용수 공급을 위해서 하천 주변에서 많은 양의 지하수가 채수되어 사용되고 있다. 과도하게 지하수를 장기간 채수할 경우에는 지하수위 저하와 함께 하천으로 배출되는 지하수 유출량이 줄어들어 결국 하천 수량의 감소를 일으키며 심해지면 하천이 말라버리는 건천화 문제까지 야기할 수 있다. 따라서 지하수 개발·이용은 하천수의 안정적인 사용과도 직결된 문제로 하천 주변의 지하수를 적절하게 이용하고 관리해야 한다. 효율적인 하천변 지하수 관리를 위해서는 우선적으로 지하수 이용이 수량 측면에서 하천에 미치는 영향을 정량적으로 예측, 평가해야 한다.

지하수 이용이 하천유량에 미치는 영향을 유역 규모 단위로 분석한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Lee et al. (2006)은 안양천 상류유역에 대해 준분포형 미 농무성에서 개발한 유역수문모형 SWAT (Arnold et al., 1998)을 이용하여 지하수 취수량과 하천유출감소량 간의 관계를 분석하였고, Lee (2008)는 총괄형 장기유출모형 TANK의 지하수 부분을 개선한 TANK-GS 모형을 갑천 유역에 적용하여 지하수 개발 시나리오에 따른 장기적인 하천유출변화를 분석하였다. Kim et al. (2008)은 유역수문모형 SWAT과 지하수 유동모형 MODFLOW가 결합된 지표수-지하수 결합모형 SWAT-MODFLOW를 개발하고 이를 무심천 유역에 적용하여 유역 내 지하수 이용에 따른 하천 유량의 변화를 분석하였다. Chung et al. (2011)은 SWAT-MODFLOW 모형을 제주도 표선 유역에 적용하여 양수량 증가에 따른 대수층 저류량, 하천유출량, 해안으로의 지하수 유출량 등의 변화를 고찰하였다. Kim et al. (2013)은 역시 이 모형을 이용하여 죽산천 유역에 대해 지하수 양수 및 농업용 저수지가 하천유량에 미치는 영향을 분석하였다.

지하수를 개발·이용하고자 하는 위치에 따라 대수층 및 하천바닥층의 수리 특성이 다양하여 하천-대수층간 상호유동 특성 및 양수로 인한 하천에 미치는 영향 정도가 공간적으로 다르게 나타난다. 따라서 유역 단위보다 작은 규모 즉, 지역 혹은 지점 단위로 지하수 양수 영향을 분석하고 공간적으로 그 정도를 평가하는 것이 중요하다. 해외에서는 지하수 양수 영향을 공간적으로 쉽게 파악할 수 있도록 지하수 관정의 위치에 따른 하천수 감소량을 지도상에 표출하고 지역적 특성을 분석한 연구가 수행되었다. Hurr and Schneider (1972a, 1972b)는 미국 South Platte 강 주변 지역에 대해서 해석적 모형을 이용하여 양

수량 대비 하천수 감소량이 28%가 될 때의 양수 경과시간을 등치선 형태로 나타내었다. Leake et al. (2008a)은 미국 콜로라도강 주변 지역에 대해서 지하수 유동모형 MODFLOW를 이용하여 지하수 관정 위치에 따른 양수 후 100년 경과시 하천수 감소량을 모의하고 그 결과를 공간분포화하여 나타내었다. Leake et al. (2008b)은 미국 아리조나주 남동부에 위치한 Sierra Vista 유역에 대해 지하수 양수 혹은 인공함양이 하천이나 샘으로의 유출량, 그리고 증발산량에 미치는 영향을 역시 MODFLOW 모형을 이용하여 분석하였으며, 양수 후 10년, 50년 경과했을 때 임의 위치별로 유출 및 증발산 감소량 혹은 증가량의 합을 양수량으로 나누어 무차원화하고 공간분포화하였다. Leake and Pool (2010)은 미국 아리조나주 중앙부에 위치한 Verde Valley 유역에 대해 지하수 양수의 공간적 위치에 따른 지표수와 증발산량에 미치는 영향을 MODFLOW 모형으로 모의하고 양수 후 10년과 50년 뒤의 지표수와 증발산량 감소량을 공간분포화하여 나타내었다.

국내에서는 앞서 기술했듯이 유역 단위로 지하수 양수가 하천유량에 미치는 영향을 분석한 연구(Lee et al., 2006; Lee, 2008; Chung et al., 2011)가 주를 이루고 있으며, 하천 주변 지역을 분할하고 각 구역별로 지하수 관정들의 군집적인 영향을 분석(Kim et al., 2012)하거나 각각의 지하수 관정 위치별로 개별적인 영향을 분석(Lee et al., 2013)한 연구가 수행되었다. 그러나 해외 연구(Leake et al., 2008a; Leake et al., 2008b; Leake and Pool, 2010)처럼 지하수 양수 영향을 공간분포화하여 종합적으로 분석한 국내 사례는 찾아보기 어렵다. 따라서 유역 혹은 공단위로 단편적 해석에 국한하였던 기존 연구과는 달리 본 연구에서는 지하수 양수 위치에 따른 하천수 감소량을 공간적으로 표출하여 양수 영향을 종합적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 경기도 안성에 위치한 죽산천 유역에 대해 하천 주변에 위치한 실제 지하수 관정 각각을 대상으로 지표수-지하수 결합모형 SWAT-MODFLOW로 하천수 감소량을 반복적으로 모의하고 그 결과를 등치선 형태로 도시하여 양수 기간에 따른 공간적 영향 정도를 정량적으로 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상 유역

지하수 양수정의 공간적 위치에 따른 하천수 감소량 변화를 분석하기 위해서 Fig. 1과 같이 청미천 지류인 죽산천 유역을 연구의 대상유역으로 선정하였다.



Fig. 1. Study Watershed

죽산천은 덕산저수지에서 발원하여 청미천에 합류되는 지방하천이며, 죽산천 출구를 기준으로 유역면적은 54.20 km², 유로연장은 15.32 km, 유역의 평균경사는 16.1%이다. 죽산천 유역은 행정구역상 경기도 안성시 죽산면과 삼죽면에 속하며, 토지이용현황으로 농경지 21.86 km² (39.75%)와 임야 31.86 km² (57.81%)가 유역의 대부분을 차지하고 있다(Gyeonggi Provincial Government, 2003). 유역 내에 농업용수는 덕산, 용설, 장계 저수지 관개와 지하수에 의존하고 있으며, 수 개의 산업단지도 위치해 있어 지하수가 공업용수의 주공급원이 되고 있다.

2.2 모형의 구축

연구 대상유역에 대해서 지하수 양수에 따른 하천수 감소 영향을 모의하기 위해서 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 이용하였다. 이 모형은 토양과 토지이용 관리 조건에 따른 물, 유사, 농업화학물질의 장기간 부하

량을 예측할 수 있는 준분포형 유역수문모형인 SWAT (Arnold et al., 1998)에 지하수 해석 기능을 강화하고자 3차원 지하수유동 해석모형 MODFLOW가 완전연동형으로 결합된 모형이다(Kim et al., 2008). SWAT-MODFLOW 결합 모형은 지하수 양수, 저수지 운영, 하천수 취수 등 복잡한 물 이용체계를 동시에 고려할 수 있는 장점이 있어 본 연구 대상유역과 같이 지하수 이용도가 높고 수개의 농업용 저수지가 위치한 지역에 적용하기에 매우 적합한 모형이다.

모형 구동을 위해서 1:5,000 NGIS (National Geographic Information System) 수치지도로 부터 해상도 30×30 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 구축하고, 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복도(2009년)와 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀토양도(2006년)를 이용하였다. 온도, 습도, 풍속, 일조시간 등의 기상 자료는 이천 기상 관측소, 강수량 자료는 국토교통부 삼죽 관측소 자료를 이용하였다. 죽산천 유역 내에 존재하는 지하수 이용 조건과 덕산, 용설, 장계 3개의 농업용 저수지 관개 등 물 이용체계를 고려하여 모형을 구축하였으며, 농어촌공사 시추자료 및 수리지질자료와 실제 일부 지역에 대하여 현지 대수성 시험 수행 결과를 바탕으로 지하수계를 모형화하였다. 모형 구축 및 검보정에 관한 자세한 사항은 Kim et al. (2012)과 Kim et al. (2013)을 참고할 수 있다.

2.3 분석 방법

죽산천 상류부 덕산저수지 직하류부부터 죽산천 출구까지 하천구간에 대해 Fig. 2와 같이 하천 주변 500 m 이내에 위치한 실제 지하수 관정 624개에 대해서 각각의 관정으로 부터 양수로 인한 하천수 감소량을 모의하였다.

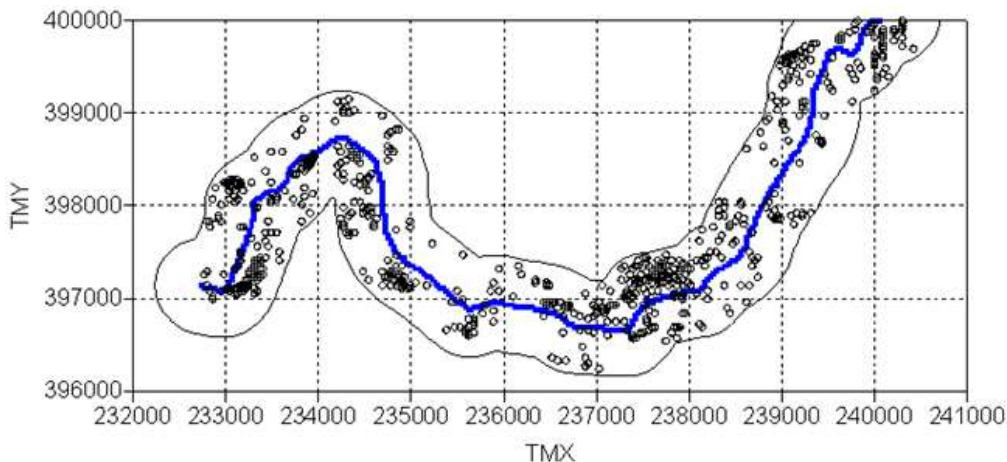


Fig. 2. Selected Wells for Simulation

유역 내에 위치한 전체 지하수 관정들의 양수량을 고려하여 현재 상태의 하천유량을 모의하고, 이어서 지하수 관정을 모두 제거하여 자연 상태의 하천유량을 산정하여 하천수 감소 평가의 기준값으로 활용하였다. 자연 유량 산정에 관한 자세한 사항은 Kim et al. (2013)의 논문을 참조할 수 있다. 자연유량에서 각 관정으로부터 양수를 하였을 경우의 하천유량값을 감한 그 차이를 하천수 감소량으로 간주하였다. 하천변 및 하저면의 수리적 조건과 하천수 감소량 간의 관계를 분석하고, 각 관정별 양수에 따른 하천수 감소량 모의치를 공간적으로 표출하여 그 특성을 고찰하였다.

기존의 해외 연구(Leake et al., 2008a; Leake et al., 2008b; Leake and Pool, 2010)에서는 계절 혹은 연 평균 함양량과 하천수위 조건에 대해 지하수 유동 모형 MODFLOW로 비교적 긴 시간간격으로 모의를 수행하여 하천수 감소량을 산정하였기 때문에 시기별 지하수위 및 하천수위의 동적 특성을 정밀하게 고려하지 못하였다. 그러나, SWAT-MODFLOW 통합모델링에 기반한 본 연구의 분석 방법은 강수, 증발, 침투, 지표면 및 중간유출, 함양, 지하수 유출 등의 수문학적 프로세스를 일 단위로 모의하고, 토지피복 및 토양 특성에 따른 비균질적 함양량과 일별로 변하는 하천 및 지하수의 수위 등 동적인 수문수리학적 조건을 보다 정밀하게 반영한 장점이 있다. 따라서 시공간적 스케일의 정밀도를 높이고, 하천수 감소량 산정에 기준이 되는 자연 유량을 산정하기 위해서 지하수 이용, 농업용 저수지 등 복합적 물이용 체계까지 고려한 점에서 해외 연구사례에 비해 진보된 방법이라 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

축산천 양안 500m 이내에서 선별한 관정 각각에 대해 생공용 지하수 허가량의 기준이 되는 $100\text{m}^3/\text{d}$ 를 허가 기간 5년 동안 총적층에서 양수했을 때 인근 하도 구간의 하천수 감소량을 모의하여 그 결과를 그림 Figs. 3~5에 나타내었다.

Fig. 3은 모의한 5년 평균 하천수 감소량을 하천과 관정간의 이격거리에 따라 도시한 것으로 이격거리가 증가할수록 하천수 감소량이 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 특히 이격거리 100m 이내에서는 양수량 대비 60~96%의 하천수 감소가 일어나고 있다. 국내 지하수법에서 하천인근 300m 이내에서 지하수개발·이용시설에 대해서는 지하수 양수로 인한 하천에 미치는 영향을 사전에 검토한 후 허가를 내주도록 되어있는데, 검토 대상 영역인 300m

이내에서는 27~96%로 이격거리에 따라 큰 편차를 보이고 있다. 이는 하천과 관정간의 이격거리가 하천수 감소의 정도에 영향을 미치는 중요한 인자이지만 이격거리가 큰 경우에도 투수량계수 등 다른 인자들의 복합적 영향으로 하천수 감소량이 크게 발생할 수 있음을 의미한다.

Fig. 4는 양수 기간 5년 평균 하천수 감소량을 투수량계수를 저류계수로 나눈 수리확산계수(hydraulic diffusivity)에 따라 도시한 것으로 수리확산계수가 증가할수록 하천수 감소량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 수리확산계수가 클수록 양수 후 대수층이 더 빠르게 동적평형상태로 진행해 가면서 대수층 보다 하천수 감소분이 지배적으로 변하기 때문이다. 하천-관정 이격거리가 가깝거

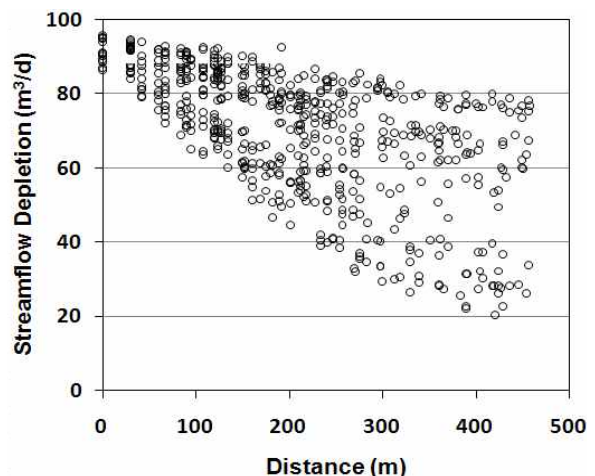


Fig. 3. Streamflow Depletion according to Well-stream Distance

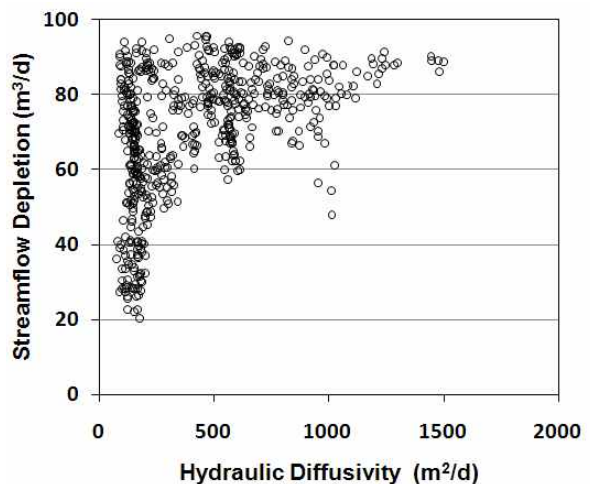


Fig. 4. Streamflow Depletion according to Hydraulic Diffusivity

나 하천바닥층의 수리전도성이 큰 경우에는 수리확산계수가 작더라도 하천수 감소량이 큰 값을 보이고 있다.

Fig. 5는 양수 기간 5년 평균 하천수 감소량 모의치를 하천바닥층의 수리전도성에 따라 나타낸 것으로 수리전도성이 커질수록 하천수 감소량이 증가하는 양상을 보이고 있으며, 상대적으로 하천바닥층 수리전도성이 작더라도 하천-관정 이격거리, 대수층의 투수성 등의 영향으로 하천수 감소량이 크게 산정되는 영향으로 편차가 크게 발생하고 있다.

Figs. 3~5로부터 하천-관정 이격거리, 대수층의 투수량계수 및 저류계수, 하천바닥층의 수리전도성 등의 복합적 영향으로 지하수 양수가 하천수량에 미치는 영향이 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 관정의 위치에 따라 하천 및 주변 대수층의 수리적 특성이 상이하어 양수에 따른 하천수 감소량의 차이가 발생한다.

지하수 개발·이용자 및 허가 관련 행정기관이 지하수 관정의 공간적인 위치에 따른 하천수량 감소를 정량적으로

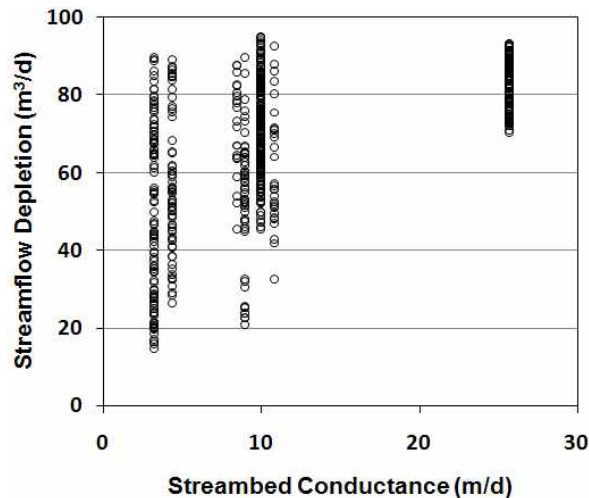


Fig. 5. Streamflow Depletion according to Streambed Hydraulic Conductance

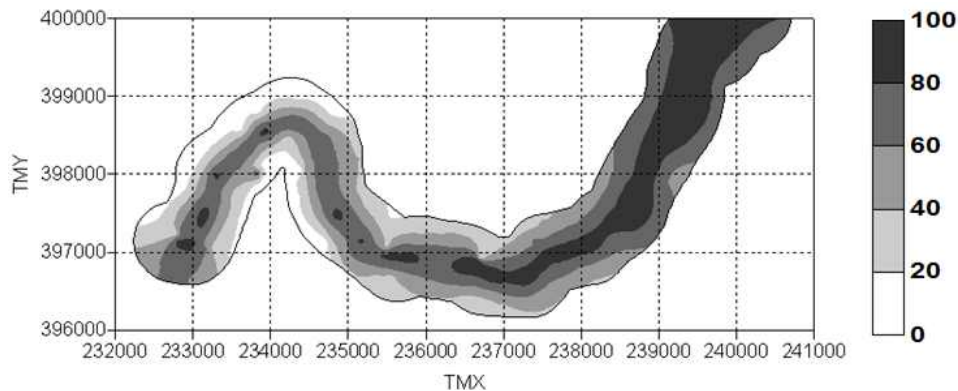


Fig. 6. Percent Streamflow Depletion in 1 Year by Pumping Wells

로 쉽게 파악할 수 있도록 Figs. 6~9와 같이 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 공간적으로 표출하였다.

Fig. 6은 죽산천 양안쪽으로 500 m 이내 지역에 대해 양수 후 1년 경과하였을 때 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것으로서 그림에서 좌측이 상류부이고 우측이 하류부이며 바깥쪽 실선이 하천에서 500 m 떨어진 위치를 나타내고 있다. 그림 우측의 스케일은 하천수 감소량을 나타낸 것으로 양수량이 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 이므로 양수량 대비 하천수 감소량의 백분율, 즉 하천수 감소율이기도 하다. 상류쪽에서 하류부로 내려올수록 양수에 따른 하천수 감소량이 증가하고 있으며 이는 하류부가 하폭이 커서 하천바닥층의 수리전도성이 상류에 비해 상대적으로 큰 점과 하류부 주변이 대수층의 투수량계수 및 수리확산계수가 큰 데서 기인한다. 그림에서 양수량 대비 하천수 감소량인 하천수 감소율이 20% 미만인 지역은 전체의 약 9.4%, 감소율이 20~40% 지역은 16.6%, 감소율이 40~60% 지역은 22.6%, 감소율이 60~80% 지역은 32.2%, 감소율이 80% 초과 지역은 19.8%로 분석되었다.

Fig. 7은 양수 후 2년 경과하였을 때 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것으로서 Fig. 6에 비해 하천수 감소 영향이 제내지쪽으로 더 크게 미치고 있으며 특히 하류부는 80% 초과 지역이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 하천수 감소율이 20% 미만인 지역은 전체의 약 3.9%, 감소율이 20~40% 지역은 10.1%, 감소율이 40~60% 지역은 18.1%, 감소율이 60~80% 지역은 33.6%, 감소율이 80% 초과 지역은 34.4%로 분석되었다.

Fig. 8은 양수 후 5년 경과하였을 때 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것으로서 하천수 감소율이 20% 미만인 지역은 전체의 약 0.0%, 감소율이 20~40% 지역은 1.3%, 감소율이 40~60% 지역은 11.4%, 감소율이 60~80% 지역은 18.6%, 감소율이 80% 초과 지역은 68.7%로 분석되어 대부분의 지역이 감소율이 60%를 넘는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 양수기간 5년 동안 평균적인 하천수 감소량의 공간분포를 도시한 것으로서 하천수 감소율이 20% 미만인 지역은 전체의 약 1.2%, 감소율이 20~40% 지역은 10.6%, 감소율이 40~60% 지역은 19.2%, 감소율이 60~80% 지역은 39.6%, 감소율이 80% 초과 지역은 29.3%로 분석되었으며, 전체 공간 평균은 66.7%의 감소율을 보였다.

이상의 결과를 Table 1과 같이 종합적으로 나타내었다. 경과년수가 증가할수록 하천수 감소율이 상대적으로 작은 지역(<60%)은 줄어들고 하천수 감소율이 매우 큰 지역(>80%)이 점차 늘어나는 양상을 확인할 수 있다.

경과년수에 따른 하천수 감소율 구간별 지배면적이 변하는 것은 지역에 따라 하천과 대수층간의 수리적 연결성 정도가 달라 지하수 양수 영향이 하천에 도달하는 시간적 지체가 상이하기 때문이다. 경과년수가 1년인 경우에는 하천수 감소율 구간별 지배면적이 큰 차이를 보이고 있지 않지만, 경과년수 2~3년인 경우에는 하천수 감소율이 60%, 경과년수 4~5년인 경우는 하천수 감소율이 80%를 넘는 지역이 두드러지게 나타나고 있는 등 수년 후에는 하천수 감소율이 큰 지역이 지배적이다. 이는 수리확산계수 및 하천바닥층 수리전도도가 작아 하천과 대수층간 수

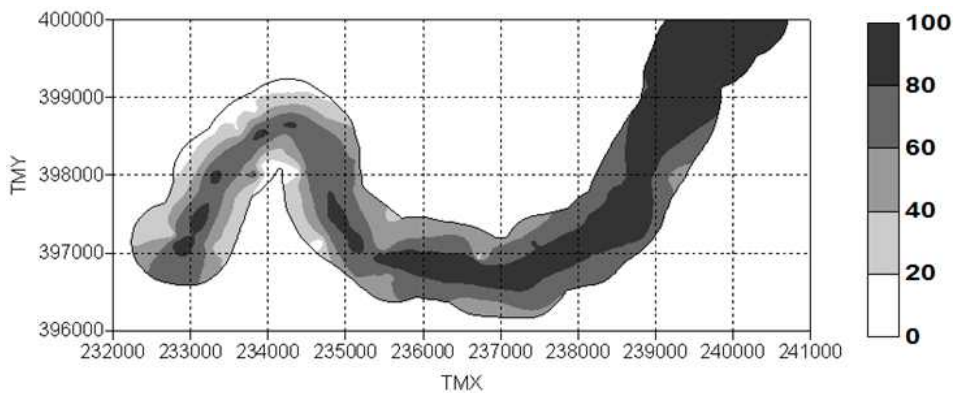


Fig. 7. Percent Streamflow Depletion in 2 Years by Pumping Wells

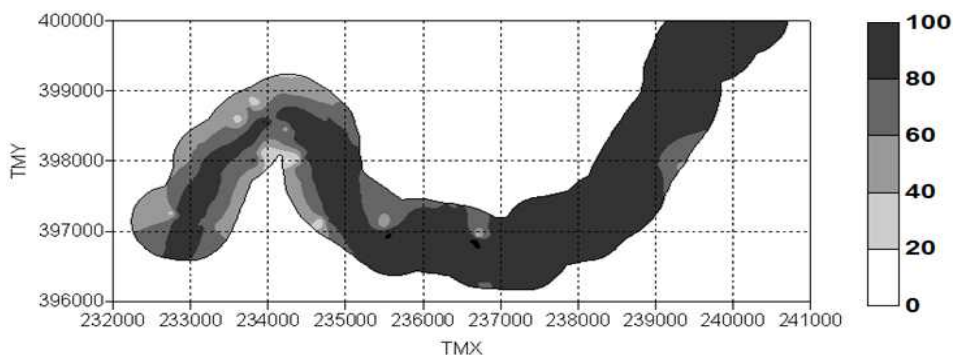


Fig. 8. Percent Streamflow Depletion in 5 Years by Pumping Wells

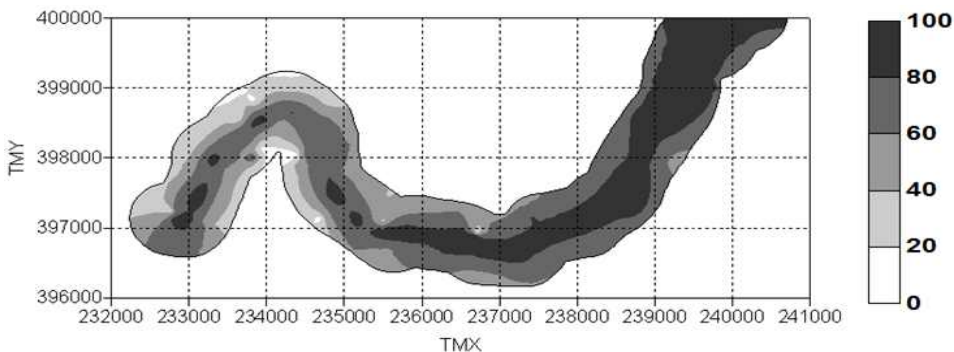


Fig. 9. Averaged Percent Streamflow Depletion for 5 Years by Pumping Wells

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

Elapsed time (yr) \ Stream depletion ratio (%)	1	2	3	4	5	0~5 (avg)
< 20	9.4	3.9	0.7	0.1	0.0	1.2
20 ~ 40	16.6	10.1	8.9	6.0	1.3	10.6
40 ~ 60	22.6	18.1	15.6	12.0	11.4	19.2
60 ~ 80	32.2	33.6	36.0	24.6	18.6	39.6
> 80	19.8	34.4	38.8	57.2	68.7	29.3

리적 연결성이 작은 지역이더라도 지하수 양수가 수년간 진행되면서 그 영향이 하천에 도달함을 의미한다.

결론적으로 죽산천 중하류구간 주변지역이 지하수 양수로 인해서 비교적 단기간에 하천에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 상류구간 주변은 지하수 양수의 영향이 지연되어 상대적으로 적은 하천수 감소량을 유발하는 것으로 나타났다. 따라서 하천수량에 미치는 영향을 고려해 볼 때 죽산천 상류구간 주변지역은 지하수를 개발·이용하는 것이 유리할 것이고, 반면에 하류구간 주변지역은 지하수를 하천수 관리에 준해서 관리할 필요가 있다.

4. 결 론

지하수를 개발·이용하고자 하는 위치에 따라 대수층 및 인근 하천의 수리지질학적 특성이 상이하어 지하수 양수로 인한 하천수에 미치는 영향 정도가 공간적으로 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 죽산천 유역을 연구 대상으로 선정하고 지하수 관정 위치에 따른 하천수 감소량을 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW로 모의, 분석하였다.

대상 유역내에 위치한 전체 지하수 관정들의 양수량을 고려하여 현재 상태의 하천유량을 모의하고 이어서 지하수 관정을 모두 제거하여 자연 상태일 때의 하천유량을 산정하여 이를 하천수 감소량 산정의 기준이 되는 하천유량으로 설정하였다. 자연 상태의 조건에서 임의 위치에 지하수 관정을 개별적으로 입력하여 반복모의를 통해 하천유량을 산정하고 기준이 되는 하천유량에서 이를 감하여 하천수 감소량을 산정하였다. 죽산천 주변 500 m 이내에 위치한 지하수 관정 각각에 대한 양수 모의실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하천 주변에 위치한 임의 지하수 관정 624개에 대해 양수 전, 후의 5년 평균 하천유량 차이를 분석한 결과 하천-관정 이격거리가 작을수록, 대수층의 수리

확산계수가 클수록, 그리고 하천바닥층의 수리전도성이 클수록 하천수 감소량이 커지는 것을 확인하였으며, 전체적으로 양수량 대비 하천수 감소율은 20~96%의 범위로 큰 차이를 나타내었다.

- 2) 하천과 관정간 이격거리가 100 m 이내, 수리확산계수가 500 m²/d 초과, 하천바닥층 수리전도성이 25 m/d를 초과한 경우 하천수 감소율이 60%를 넘는 것으로 분석되었다.
- 3) 지하수 관정의 공간적인 위치에 따른 하천수량 감소를 정량적으로 쉽게 파악할 수 있도록 임의 위치 각각에 대한 하천수 감소량을 크리깅 기법을 통해 양수량 대비 퍼센트 값을 가지는 등치선 곡선으로 나타낸 결과 양수기간이 증가할수록 하천수 감소 영향이 점차 제외지 쪽으로 확대되는 것을 확인할 수 있었다. 죽산천 500 m 주변에서 양수 후 1년 경과시 하천수 감소율이 80%를 넘는 지역이 전체면적의 19.7%에서 양수 후 5년 경과시 68.7%로 크게 증가하였으며, 특히 지하수 개발·이용 허가기간인 5년 동안 평균적으로 약 66.7%의 하천수 감소율을 보였다.
- 4) 죽산천 중하류구간 주변지역과 같이 지하수 양수로 인한 영향이 단기간에 크게 하천에 도달하는 것으로 분석된 지역은 하천수 관리에 준해서 지하수를 관리해야 하며, 상류구간 인근지역과 같이 하천에 미치는 영향이 비교적 작은 지역은 하천수의 직접 취수 보다는 지하수를 이용하는 것이 하천수량 관리측면에서 유리한 지역이다. 이처럼 지하수 양수의 공간적인 영향 평가 결과는 하천수와 지하수 이용에 있어서 효율적인 연계 관리를 위한 기본적인 정보로 활용될 수 있다.

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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 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. (2012). “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.
- 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, 18 p.
- 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, 25 p.
- 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, 14 p.
- 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, 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.

paper number : 15-034

Received : 10 April 2015

Revised : 18 May 2015

Accepted : 18 May 2015