

계절양수가 하천건천화에 미치는 영향

이현주¹ · 구민호^{1*} · 임진실¹ · 유병호² · 김용철³

¹공주대학교 지질환경과학과

²(주)유신

³한국지질자원연구원

Impacts of Seasonal Pumping on Stream Depletion

Hyeonju Lee¹ · Min-Ho Koo^{1*} · Jinsil Lim¹ · Byung-Ho Yoo² · Yongcheol Kim³

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

²Yooshin Engineering Corporation

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

Visual MODFLOW was used for quantifying stream-aquifer interactions caused by seasonal groundwater pumping. A hypothetical conceptual model was assumed to represent a stream-aquifer system commonly found in Korea. The model considered a two-layered aquifer with the upper alluvium and the lower bedrock and a stream showing seasonal water level fluctuations. Our results show that seasonal variation of the stream depletion rate (SDR) as well as the groundwater depletion depends on the stream depletion factor (SDF), which is determined by aquifer parameters and the distance from the pumping well to the stream. For pumping wells with large SDF, groundwater was considerably depleted for a long time of years and the streamflow decreased throughout the whole year. The impacts of return flow were also examined by recalculating SDR with an assumed ratio of immediate irrigation return flow to the stream. Return flow over 50% of pumping rate could increase the streamflow during the period of seasonal pumping. The model also showed that SDR was affected by both the conductance between the aquifer and the stream bed and screen depths of the pumping well. Our results can be used for preliminary assessment of water budget analysis aimed to plan an integrated management of water resources in riparian areas threatened by heavy pumping.

Key words: Stream Depletion Rate (SDR), Stream Depletion Factor (SDF), Stream-aquifer interaction, Seasonal pumping, Visual MODFLOW

1. 서 론

최근 국내에서는 무분별한 지하수 개발로 인해 지하수 고갈문제가 발생하고 있으며, 종종 대규모 하수처리시설의 건설 및 불투수면적의 증대 등이 물의 순환을 차단하여 이러한 상황을 더욱 악화시키고 있다(Lee et al., 2010). 지하수 고갈문제는 지하수를 주로 사용하는 하천변 농업지대에서 많이 관측되고 있으며, 시설재배와 수막재배 면적의 증가로 농업용 지하수 이용량은 현재도 꾸준히 증가하는 추세이다(Korea Water Resources Corporation,

2009). 통계에 따르면 연간 농업용수 및 수막재배에 이용되는 지하수량은 각각 약 17 억 톤 및 15 억 톤으로(Korea Water Resources Corporation, 2007; Rural Development Administration, 2007), 그 이용이 주로 겨울철에 집중되어 있다. 강수량이 적은 시기에 편중된 이 같은 지하수 이용형태는 지하수 고갈을 야기할 수 있으며, 하천유지에 필요한 공급원으로서의 지하수 유출량 또한 감소시킬 수 있다. 실제로 겨울철 지하수량이 부족하여 수막재배에 어려움을 겪는 사례들이 증가하고 있으며, 소하천의 경우 하천수량이 감소하는 현상도 많이 관측되고 있다.

*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

Received : 2015. 9. 30 Reviewed : 2015. 10. 23 Accepted : 2015. 11. 20

Discussion until : 2016. 4. 30

하천건천화는 그 과정을 지속적으로 관찰하기가 쉽지 않고, 이를 발생시키는 요소들이 복합적으로 작용하기 때문에 이에 대한 정량적인 접근이 어렵다(Jung et al., 2003). 또한 양수에 의한 하천건천화는 주로 지방2급 하천과 소하천에서 발생하기 때문에 수문관측자료를 취득하기 어려운 실정이다(Ministry of Science and Technology, 2003). 이에 하천건천화 평가 및 개선방안에 대한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다. Kim et al.(2012c)은 유역단위 통합수문해석모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 복하천 지류인 신둔천 유역에 대해 지하수 이용에 따른 하천수 감소량을 모의하였다. Lee and Kim(2013)은 고성군에 위치한 봉현천과 석지천 내 건천화 구간에 대한 현장조사를 통해 건천화된 하천의 시공간적 특성을 분석하였다. Lee et al.(2010)은 하천유지용수 확보사례를 소개함으로써 지속가능한 건천화 방지대책을 제시하였으며, Jun et al.(2012)은 중소규모 하천 또는 도시하천의 건천화를 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. Lee et al.(2013)은 단일 관정의 양수가 하천수 감소에 미치는 영향을 평가하였고, 하천건천화를 평가하는 인자들의 국내 적용성을 검토하였다. 또한 Jenkins(1968b)는 양수가 하천유량에 미치는 영향을 평가하기 위해 하천과의 이격거리와 대수층의 수리상수로 구성된 함수를 제시하였으며, Bredehoeft and Kendy(2008)는 이 함수 값에 따른 하천건천화 정도를 비교하고 양수에 의한 하천건천화를 예방할 수 있는 방법을 제시하였다.

지하수 이용과 하천수량 변화와의 상관관계를 규명하기 위해서는 우선적으로 하천-대수층 상호작용에 대한 연구가 선행되어야 한다(Kim et al., 2012b). Kim et al.(2004)은 자연적인 상태에서의 지표수 유량 변화를 관측하여 지하수-지표수 상호 작용을 해석하였으며, Kim et al.(2012a)은 관측자료에 기초하여 낙동강 하류 주변지역 지하수위 변동의 시공간적 특성을 파악하고자 하였다. Lee(2004)는 물 동위원소 추적자를 이용한 지하수-지표수 탐사 방법에 대해 살펴보았다. 특히, 최근에는 수자원 확보를 위한 인공함양 및 지하댐의 중요성이 인식되면서 이와 관련된 연구도 활발히 수행되고 있다(Lee et al., 2004; Kim et al., 2009; Lee et al., 2014).

이상의 연구 결과가 보여주는 바와 같이 하천과 대수층은 수리적으로 연결된 하나의 수체로 끊임없는 상호작용을 통하여 하천수위와 지하수위의 변화가 발생한다(Koo et al., 2013). 국내의 하천건천화는 주로 지하수의 무분별한 사용에 의해 발생할 것으로 예상되지만, 지하수 사용이 하천건천화에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 연구

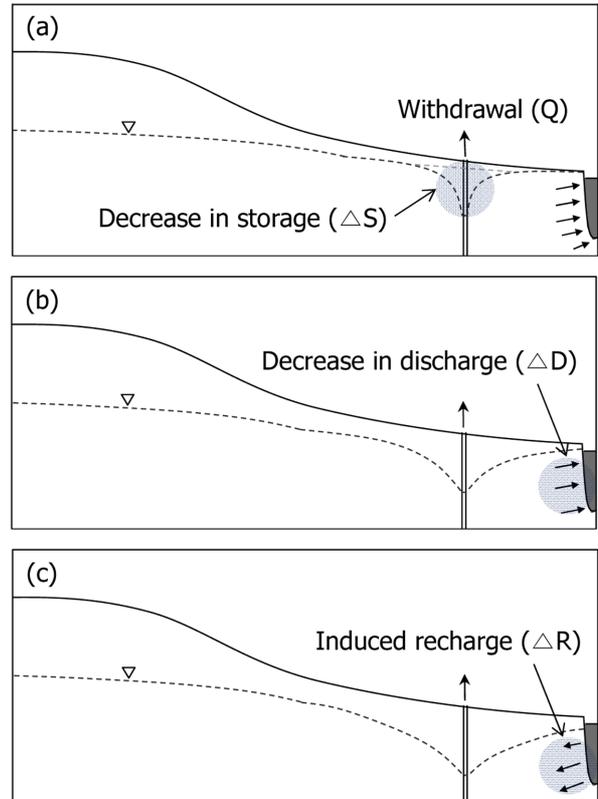


Fig. 1. Schematic diagrams showing progressive stages of the stream-aquifer interaction during groundwater pumping: (a) reduction of aquifer storage (ΔS), (b) reduction of groundwater discharge to the stream (ΔD), and (c) induced groundwater recharge from the stream (ΔR).

는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지하수 모델링 기법을 이용하여 국내 수변지역 총적대수층에서의 하천-대수층 상호작용을 살펴보았으며, 수막재배와 같이 특정 계절에 지하수 이용이 집중되는 계절양수가 하천건천화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 하천고갈율과 하천고갈인자

자연 상태의 대수층에서는 강수에 의해 함양된 지하수가 하천과 같은 저지대로 유출되면서 저유량 변화가 발생하며, 매년 유사한 패턴으로 반복되는 강수량의 주기적인 변화로 인하여 대수층의 물수지도 연 변화를 보이면서 동적 평형상태를 유지한다. 강수에 의한 지하수 함양과 배출에 의해 만들어진 이러한 동적 평형은 우물과 같은 수리적 스트레스에 의하여 깨지게 되며, 충분한 시간이 경과하면서 하천-대수층 상호작용을 통해 다시 새로운 평형상태에 도달하게 된다.

Fig. 1은 수변지역에서 지하수 양수 시 하천-대수층 상

호작용의 변화를 보여준다. 시설재배, 농업용수 등의 목적으로 지하수를 양수(Q)할 경우 초기에는 양수량만큼 지하수 저유량이 감소하면서(ΔS) 원추형의 수위강하 구역이 형성된다(Fig. 1a). 지하수위가 점차 하강함에 따라 하천으로의 지하수 유출량은 감소하여(ΔD) 결국 우물의 양수량과 같아지며, 동적 평형상태에 도달하게 된다(Fig. 1b). 만약 지하수 양수량이 많거나 취수정의 하천과의 거리가 가까우면 하천수가 유입되면서(ΔR) 새로운 평형상태에 도달하게 된다(Fig. 1c). 이와 같은 지하수 흐름은 특히 하천에 인접한 강변여과 관정에서 양수를 하는 경우에 쉽게 발생할 수 있다.

Fig. 1과 같이 수변지역에서 양수를 할 경우 지하수 유출량 감소 및 하천수 유입에 의하여 하천유량은 감소하며, 이때 양수가 하천유량 감소에 미치는 영향은 양수량, 양수기간, 대수층의 수리특성 및 양수정 위치에 따라 달라진다(Sophocleous, 2002). 하천고갈율(stream depletion rate: SDR)은 양수로 인해 발생한 하천유량 감소를 수치적으로 표현한 무차원 값이다.

$$SDR = \frac{\Delta D + \Delta R}{Q} \quad (1)$$

여기서 ΔD 와 ΔR 은 양수에 의해 발생한 지하수 유출량 감소분 및 하천수 유입량 [L^3/T]이며, Q 는 양수량 [L^3/T]이다. 지하수 저유량이 주로 감소하는 양수 초기에 SDR은 0이며, 시간이 충분히 경과하여 지하수 유출량 감소분과 하천수 유입량 증가분의 합이 양수량과 같아지면 SDR은 1이 된다.

SDR의 시간적 변화는 양수정 위치와 수리확산계수에 의해 결정된다. Jenkins(1968b)는 양수로 인한 지하수 유출량 감소를 대수층의 수리적 연결성과 관련하여 평가하기 위해 하천고갈인자(stream depletion factor: SDF)를 제시하였다. SDF는 하천과 우물사이 거리의 제곱을 수리확산계수로 나눈 값으로, 시간의 차원을 갖는다.

$$SDF = a^2 S/T \quad (2)$$

여기서 a 는 하천과 우물사이의 거리 [L], T 는 투수량계수 [L^2/T]이며, S 는 저유계수이다. 위 식과 같이 우물의 하천과의 이격거리는 SDF에 큰 영향을 주며, 이와 함께 수리확산계수(T/S)는 지하수 함양과 같이 대수층에 가해진 수리적 스트레스가 해소되는데 걸리는 시간을 결정한다(Koo and Lee, 2002). 우물이 하천에서 멀어질수록, 저유계수가 클수록, 투수량계수가 작을수록 SDF는 증가하며, 이는 양수의 영향으로 하천수량이 감소하여 새로운 평형상태에 도달하기까지 오랜 시간이 걸리는 것을 의미한다. 양수가

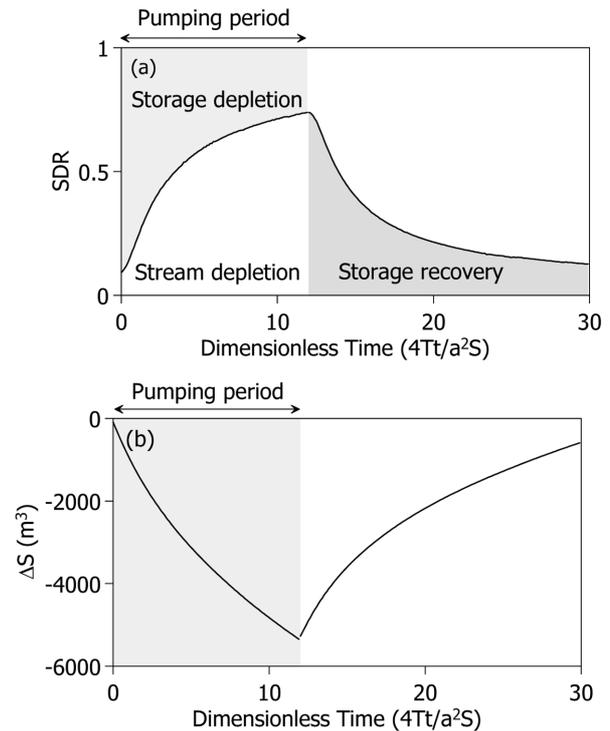


Fig. 2. Impact of seasonal pumping on (a) SDR and (b) aquifer storage (ΔS).

하천에 미치는 영향은 양수 중단 후에도 지속되며, SDF가 클수록 그 기간 또한 길어진다(Jenkins, 1968a). 양수정 위치가 서로 다르더라도 SDF가 같으면 시간에 따른 SDR의 변화는 동일하다(Bredheoef and Kendy, 2008).

한편, SDF는 투수량계수에 의해 계산되기 때문에 대수층 두께가 일정한 피압대수층에 대해 쉽게 적용할 수 있으며, 자유면대수층의 경우 양수 시 시간에 따라 대수층 두께가 감소하기 때문에 SDF를 적용하는데 다소 개념적 불확실성이 존재한다. 이러한 연유로 본 연구에서는 양수에 의한 수위강하가 거의 발생하지 않는 하천 인근 지점의 포화대 두께를 이용하여 SDF를 근사적으로 계산하였다.

Fig. 2는 계절양수 시 SDR과 지하수 저유량의 연 변화를 보여주는 사례이며, 다음 절에서 언급되는 개념모델에 대해 계산된 수치 모델링의 결과이다. 연중 4개월 동안에만 지하수를 양수하는 사례이며, 그림의 x축은 시간을 SDF로 나누어 표현한 무차원의 시간($4Tt/a^2S$)이다. SDF가 클수록 동일한 값의 무차원 시간이 경과하기 위해서는 더 오랜 실제 시간이 필요하며, 이는 양수에 의한 SDR의 변화가 매우 서서히 진행되는 것을 의미한다. Fig. 2a에서 SDR 그래프 상단의 면적은 양수 기간에는 지하수 저유량의 감소분(storage depletion)을 나타내며, 양수 중단 기간에는 지하수 저유량의 회복분(storage recovery)을 나타낸

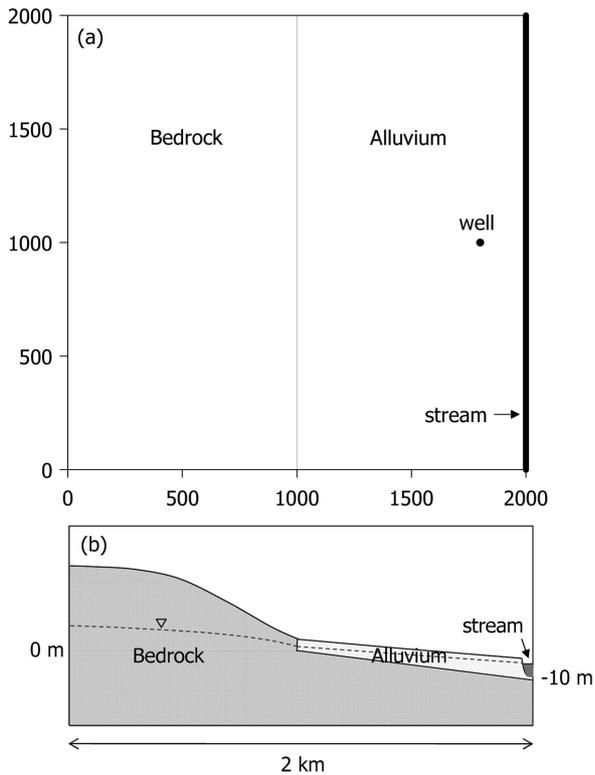


Fig. 3. The conceptual model showing an alluvial stream-aquifer system: (a) plane view and (b) cross-sectional view.

다. 양수 기간 초기에는 지하수 저유량이 크게 감소하고, 지하수 유출량 감소분 또는 하천수 유입량 증가분이 점차 커지면서 SDR은 점진적으로 서서히 증가한다(Fig. 2a). 양수 중단 후에는 지하수 저유량이 크게 증가하면서 SDR은 감소한다. 한편, SDR을 통하여 계산한 지하수 저유량의 변화를 살펴보면(Fig. 2b) 양수 동안에는 대수층의 지하수가 배출되면서 저유량이 감소하며, 양수가 중단된 후 다시 회복되는 양상을 보인다. 저유량 회복기가 끝나는 시점, 즉 다음 해에 양수가 다시 시작되는 시점에서의 저유량은 이전 해의 양수 시작 시점의 저유량보다 작은 것을 볼 수 있다. 양수로 인해 감소된 저유량이 완전히 회복되지 못한 것을 의미한다.

3. 개념모델

계절양수가 하천-대수층 상호작용에 미치는 영향을 알아보기 위해 Visual MODFLOW를 이용하여 국내 하천변 충적대수층을 단순화한 모델을 개발하였다. Fig. 3은 수면지역 충적층에서의 지하수 흐름계를 모의하기 위해 설정한 가상의 개념 모델이다. 모델영역은 2 km × 2 km의

정사각형 모양으로 설정하였다. 격자의 크기는 10 m × 10 m이며, 격자망은 200행, 200열, 2층으로 총 80,000개의 격자로 구성하였다. 2개의 층으로 구성된 균질, 등방성의 자유면대수층을 가정하였으며, 하천은 상부층 모델 영역의 동쪽 끝단에 위치하며 -2 m의 수위를 갖는 일정수두경계(constant head boundary)로 설정하였다. 충적대수층의 경우, 실제 국내 하천변 대수층을 고려하여 하천 부근에는 두껍게 발달하고, 하천에서 멀어질수록 선형적으로 얇아지는 것으로 가정하였다. 또한 산악지대가 많은 국내의 지형을 고려하여 하천에서 1 km 이상 떨어진 곳과 하부층은 암반층으로 설정하였다. 이때 상, 하부층의 경계면은 하천에서 산지로 가면서 0.01의 기울기를 갖도록 설정하였다. 충적층과 암반층의 수리전도도는 5, 0.5 m/day를 기본 값으로 설정하였으며, 각 층의 비산출률은 0.1과 0.01, 비저유계수는 0.0001 m⁻¹로 동일하게 설정하였다.

한편, 강수에 의한 지하수 함양률의 시간적 변화는 비포화대의 매질 특성, 지하수면의 심도, 지표면의 기복 등에 의해 다양한 양상을 보일 수 있으나, 강수량의 일정비율(10%)이 함양되는 것으로 가정하여 함양 모델을 단순화하였다(Koo and Lee, 2002). 이때 강수량의 계절적 변화를 모델에 반영하기 위하여 섬진강 일대 구례2 관측소에서 2010년에 관측된 강수량 자료를 사용하였다.

시계열 자료를 모델에 입력할 경우 지하수위 변동은 시간에 따라 주기성을 가지며, 이 경우 동적순환초기조건(dynamic cyclic initial conditions)을 이용하여 모사를 수행한다(Anderson and Woussner, 1992). 이는 모델의 초기조건이 갖는 불확실성을 줄이기 위해 모사 과정에서 주기성을 갖는 함양률의 시계열 자료를 수 년 동안 되풀이하여 지하수위 변동이 1년 주기로 동일하게 반복되도록 하는 방법이다(Koo and Lee, 2002). 본 연구에서는 10년 동안의 지하수 흐름을 모사하여 동적인 평형상태에 도달하도록 하였으며, 이때 계산된 지하수 유출량 변화와 하천수 유입량 변화를 살펴보았다.

국내 시설재배를 위한 지하수 이용은 갈수기인 11월에서 2월 사이 약 4개월 동안 집중된다. 이와 같은 지하수 이용량의 계절적 집중성이 하천건천화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 동절기 120일 동안에는 양수를 시행하였으며, 나머지 245일 동안에는 양수를 중단하였다. 양수정은 하천으로부터 200 m 떨어진 곳에 설치하였으며, 양수량은 100 m³/day로 설정하였다. 이때 양수정 스크린은 충적층에 설치하였다.

한편, 실제 시설재배지에서는 기온이 내려가는 저녁부터 새벽까지 약 12시간 동안 지하수를 양수하고 낮에는

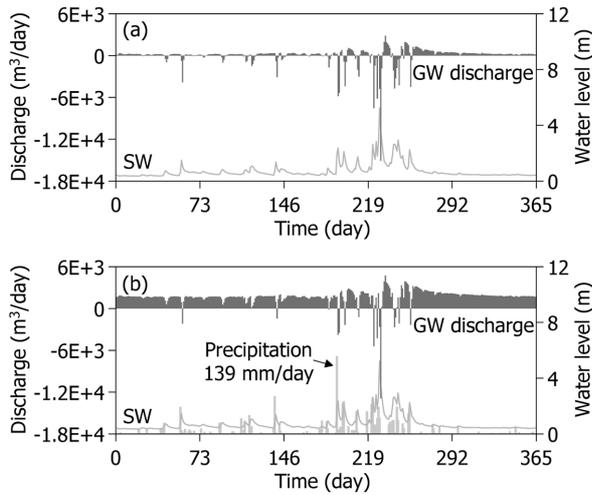


Fig. 4. Annual variation of groundwater discharge to stream caused by (a) change in stream level and (b) change in both stream level and precipitation.

양수를 중단한다. 4개월 동안 지속적으로 양수할 경우와 12시간 단위로 양수, 중단을 반복할 경우의 SDR을 비교한 결과, SDR의 연 변화는 동일하게 나타났다. 따라서 모델의 단순화를 위하여 중단 없이 120일 동안 지속적으로 양수하는 것으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 양수 전 하천-대수층 상호작용

수변지역 대수층은 하천과 상호 연결성을 가지므로 고수위 기간에는 하천에서 대수층으로 물이 유입되며, 하천수위가 지하수면보다 하강하면 지하수는 하천으로 유출된다(Winter, 1999). 이때 지하수 함양은 지하수 유출과 함께 대수층의 평형상태를 유지시켜주는 중요한 과정 중 하나로서, 계절양수에 의한 하천수 유량 변화를 분석할 때 둘 사이의 관계는 중요하다. 따라서 양수 전 하천-대수층 상호작용을 모사하여 강수에 의한 지하수 함양 및 하천수위 변동에 따른 지하수 유출량 및 지하수 저유량 변화를 분석하였다. 하천수위는 구례2 관측소에서 2010년에 관측된 수위 자료를 사용하였다.

Fig. 4는 하천-대수층 상호작용에 의한 지하수 유출량 변화를 보여준다. 지하수 유출량이 양(+의 값)을 보이면 대수층에서 하천으로 물이 유출되는 이득하천을 나타내며, 음(-의 값)을 보이면 하천에서 대수층으로 물이 유입되는 손실하천을 뜻한다. 하천수위 변동에 의한 지하수 함양만 고려할 경우(Fig. 4a), 하천수위 변동에 따라 유출량이 변하면서 종종 지하수 흐름 방향까지도 바뀌는 것으로 나타

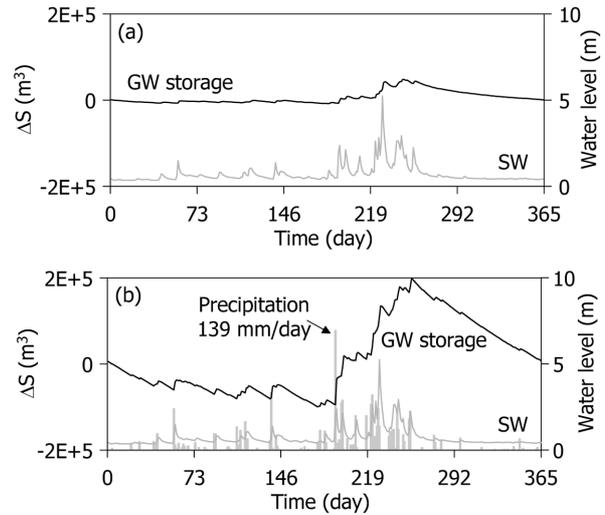


Fig. 5. Annual variation of groundwater storage (ΔS) caused by (a) change in stream level and (b) change in both stream level and precipitation.

났다. 집중강우 시 하천수위가 크게 상승하면 하천수가 대수층으로 유입되었으며, 이후 하천수위가 다시 하강하면 지하수 유출이 증가하는 양상을 보였다.

한편, 하천수위 변동과 강수에 의한 함양을 모두 고려할 경우(Fig. 4b), 집중강우에 의해 하천수위가 크게 상승한 기간을 제외하고 대부분의 기간 동안 대수층에서 하천으로 지하수가 유출되는 이득하천의 양상을 보였다. 강수에 의해 지하수 저유량이 증가하면서 하천으로의 유출량 또한 크게 증가하였으며, 이 현상과 하천수위 변동에 의한 하천수 유입의 영향이 중첩되어 나타났다. 집중강우 시에는 하천수위가 크게 상승하면서 순간적으로 수위가 역전되어 손실하천의 양상을 보였다.

Fig. 5는 하천-대수층 상호작용에 의한 지하수 저유량 변화를 보여준다. 저유량은 강수로 인한 지하수 함양에 의해 증가하거나 하천으로의 지하수 유출에 의해 감소할 수 있다. Fig. 5a는 하천수위 변동에 의한 지하수 함양만 고려할 경우 저유량 변화로서, 하천-대수층 상호작용의 결과이다. 이 경우 지하수 저유량은 연중 큰 변동 없이 일정하였으나, 하천수위가 일시적으로 크게 상승하는 풍수기에 하천수의 유입으로 인해 다소 증가하는 것으로 나타났다. 하천수위 변동과 강수 함양을 모두 고려할 경우(Fig. 5b), 갈수기 지하수 저유량은 시간에 따라 전반적으로 감소하였으나, 집중강우 이후 크게 증가되는 모습을 보였다. 지하수 저유량 변화는 하천수위 변동보다 강수 함양에 더 큰 영향을 받았지만, 하천수위 변동에 의해서도 비교적 많은 양의 물을 공급받는 것으로 분석되었다. 또

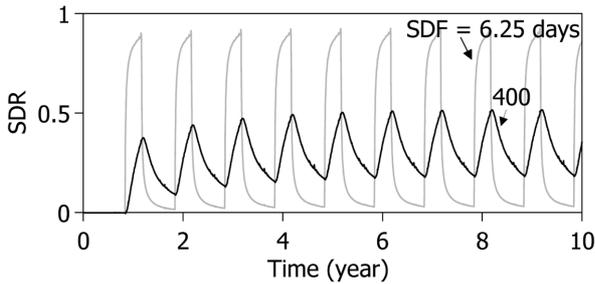


Fig. 6. Comparison of stream depletion caused by seasonal pumping of two wells with different values of SDF. A well with SDF = 6.25 days is 50 m from the stream, and a well with SDF = 400 days is 400 m from the stream.

한 대수층은 주로 풍수기 때 하천수위 변동과 강수 함양을 통해 많은 양의 물을 공급받는 것으로 나타났다.

4.2. 계절양수가 하천건천화에 미치는 영향

4.2.1. SDF가 SDR 및 지하수 저유량에 미치는 영향

Miller et al.(2007)는 하천과 우물사이의 거리를 a , 모델의 너비를 W 로 설정하여 a/W 의 비율에 따른 SDR의 시간적 변화를 보고한 바 있다. 하지만 국토의 대부분이 산악지대인 국내의 경우, 대수층의 규모가 제한적이며 충적층과 암반층으로 구성된 이중구조로 되어있어 보고된 SDR 변화를 적용하기에 어려움이 있다. 따라서 실제 국내 하천변 대수층을 고려하여 개발한 위의 개념모델에서 하천과 우물사이 거리에 따른 SDR 변화를 살펴보았다. 충적층의 비산출률과 수리전도도는 각각 0.1과 5 m/day로 설정하였다. 강수에 의한 지하수 함양은 SDR의 연 변화에 크게 영향을 주지 않아 모델의 단순화를 위해 설정하지 않았다. 하천수위 변동에 의한 하천-대수층 상호작용을 살펴보기 위하여 구례2 관측소에서 2010년에 관측된 하천수위 자료를 모델에서 사용하였다. 우물은 하천으로부터 각각 50, 400 m 지점에 설치하였으며, 이때 계산된 SDF는 6.25, 400 days이다.

Fig. 6은 계절양수 시 SDF가 SDR에 미치는 영향을 보여주는 그림이다. 10년 동안의 지하수 흐름 모의 결과로부터 계산된 지하수 유출량 감소분과 하천수 유입량 증가분을 이용하여 SDR을 계산하였다. 양수기간 내 SDR 변화를 살펴보면, SDF가 작은 경우에 계절양수의 영향이 하천에 빠르게 반영되었으며, 이때 최댓값은 약 0.9로 비교적 높은 값을 보여 지하수 유출량 변화가 큰 것으로 분석되었다. 한편, SDF가 크면 양수의 영향이 하천까지 도달하는데 오랜 시간이 걸리기 때문에 SDR의 최댓값은 약 0.5로 비교적 낮은 값을 보였다. 일반적으로 SDF가

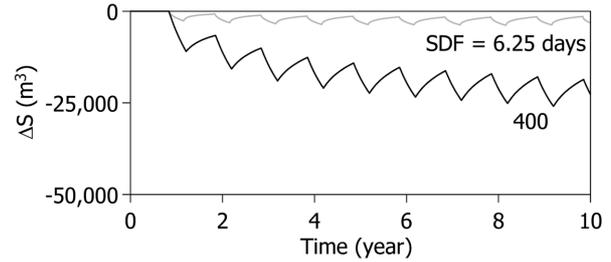


Fig. 7. Comparison of the storage change (ΔS) caused by seasonal pumping of two wells with different values of SDF. A well with SDF = 6.25 days is 50 m from the stream, and a well with SDF = 400 days is 400 m from the stream.

큰 곳에서 4개월 양수할 경우, 비교적 연중 일정한 SDR을 보여 계절양수 동안 지하수 유출량은 총 양수량의 1/3(4개월/12개월) 만큼 감소한다(Bredheoef, 2011). 양수가 중단된 후 SDR 변화를 살펴보면, SDF가 작은 경우에 지하수 유출량이 양수 전으로 빠르게 회복되어 낮은 SDR을 보였다. SDF가 크면 계절양수의 잔류영향으로 지하수 유출이 서서히 감소하여 SDF가 작은 경우에 비해 비교적 높은 SDR을 보였다. 또한 SDF가 크면 시간지연이 발생하여 양수 중단 후에도 일정 기간 SDR이 상승하였다.

Fig. 7은 SDF가 지하수 저유량 변화에 미치는 영향을 보여주는 결과이다. 지하수 저유량은 양수하는 동안 감소하고 양수가 중단된 후 다시 증가하였으며, 저유량이 완전히 회복되기 전에 이듬해 다시 양수가 시작되어 모의 기간 내내 음의 값을 보였다. Fig. 6에서 확인한 바와 같이 SDF가 클수록 동적 평형상태에 늦게 도달하였으며, Fig. 7과 같이 지하수 저유량은 지속적으로 감소하였다. 이는 우물이 하천에서 멀어지면 양수 시 지하수 유출량 감소 및 하천수 유입에 의한 물의 공급이 느려져서 우물 주변의 지하수를 주로 사용하기 때문에 발생한 결과이다. 따라서 SDF가 큰 곳, 즉 하천으로부터 이격거리가 큰 지역에서의 우물 양수는 대수층의 지하수 저유량을 크게 감소시키며, 결과적으로 지하수 고갈을 초래할 가능성이 높다.

Fig. 8은 SDR의 두 성분인 지하수 유출량 감소분과 하천수 유입량 증가분으로 각각 구분하여 나타낸 그림이다. SDR은 양수로 인해 발생하는 하천수량의 감소를 수치적으로 나타내지만, 하나의 값으로 제시되기 때문에 계절양수가 하천-대수층 상호작용에 미치는 영향을 각 요소별로 설명하기에는 미흡하다. 따라서 SDR을 두 성분으로 구분하여 분석하였다. Fig. 8a, b는 SDF가 작은 곳에서 계절양수를 할 경우 지하수 유출량 감소분과 하천수 유입량 증가분을 나타낸 그림이다. 양수 시 지하수 유출량은 즉각적으로 감소하였으며(Fig. 8a), 양수에 의해서 많은 양

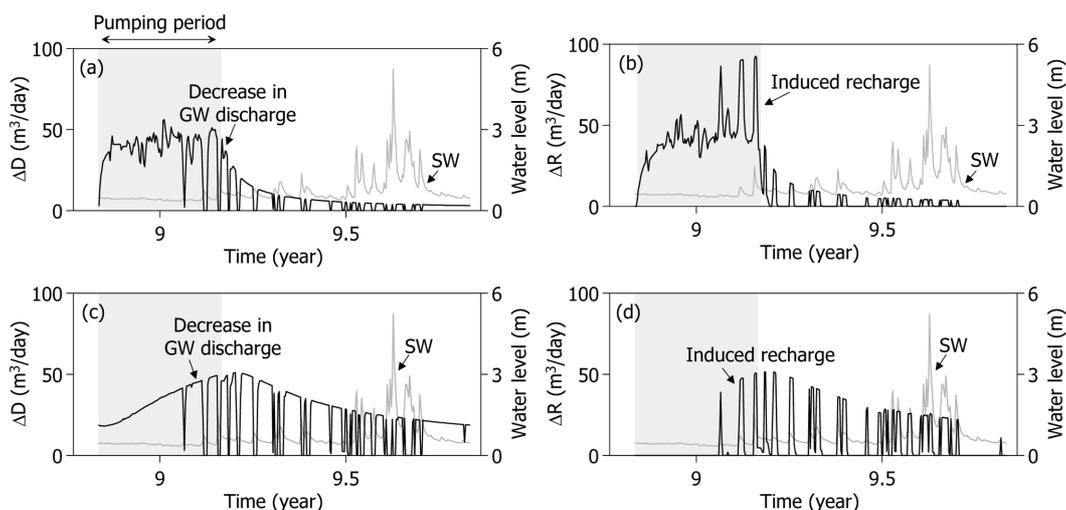


Fig. 8. Decrease in groundwater discharge (ΔS) and induced recharge (ΔR) during and after seasonal pumping: (a) and (b) SDF = 6.25 days and (c) and (d) SDF = 400 days.

의 하천수가 대수층으로 유입되었다(Fig. 8b). 또한 지하수 유출량 감소분과 하천수 유입량 증가분이 불규칙한 변동을 보였는데, 이는 양수의 영향과 하천수위 변동에 의한 영향이 중첩되면서 하천수위의 작은 변화에도 하천-대수층 상호작용이 민감하게 반응하여 나타난 결과로 판단된다. 계절양수가 중단된 후에는 지하수 유출량이 비교적 빠르게 초기 값으로 회복되었지만 양수의 영향이 조금 남은 상태로 평형을 이루었다. 양수 기간에 관계없이 하천수위가 상승하면 하천수가 유입되면서 지하수 유출이 차단되었으며, 이로 인해 하천수 유입의 급격한 증가와 함께 지하수 유출량 감소분은 급격히 감소하여 0에 가까운 값을 보였다.

Fig. 8c, d는 SDF가 큰 곳에서 계절양수를 할 경우 지하수 유출량 감소분과 하천수 유입량 증가분을 나타낸 그림이다. 하천과 우물 사이의 거리가 멀어 양수 시 지하수 유출량은 비교적 서서히 감소하였다. 양수의 영향이 하천까지 미치지 않아 하천수는 유입되지 않았으며, 이로 인해 SDF가 작을 경우와 다르게 지하수 유출량과 하천수 유입량 변화는 불규칙한 변동을 보이지 않았다. 양수가 중단된 이후 지하수 유출량이 점차 회복되었지만, 다음 양수를 시작하기 전까지도 양수의 잔류영향이 남아 Fig. 8a처럼 빠른 회복을 보이지 않았다. 또한 양수에 의해 유도된 하천수 유입은 없었지만, 하천수위가 크게 상승하면 하천수가 유입되면서 지하수 유출이 차단되었다. 이때 양수로 인해 지하수위가 크게 하강하여 SDF가 작은 경우보다 수두구배가 더 커지기 때문에 하천수위 변동에 의해 더 많은 양의 하천수가 유입되었다.

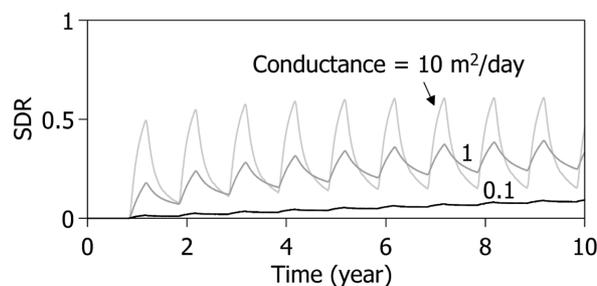


Fig. 9. Comparison of stream depletion caused by different values of riverbed conductance.

4.2.2. 하상퇴적물의 전도계수가 SDR에 미치는 영향

하천과 대수층 사이 물 흐름은 하상에 쌓인 퇴적물의 전도계수에 따라 달라진다. 즉, 하상퇴적물은 하천과 대수층의 수리적 연결성에 영향을 주며, 이에 따라 양수 시 하천건천화 정도가 달라진다. 따라서 양수 시 하상퇴적물이 하천건천화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 하상퇴적물의 전도계수에 따른 SDR을 비교하였다. 이를 위해 하천은 하천경계조건으로 설정하고 구례지역의 시계열 자료를 입력하였으며, 하상퇴적물의 전도계수는 0.1, 1, 10 m^2/day 로 바꾸어 각각의 경우를 모의하였다.

Fig. 9는 하상퇴적물의 전도계수에 따른 SDR 변화를 보여준다. 전도계수가 10 m^2/day 로 큰 경우, 양수의 영향이 즉각적으로 반영되어 지하수 유출량이 변하면서 시간에 따른 SDR 변화도 비교적 크게 나타났다. 하지만 전도계수가 작아지면 시간에 따른 SDR 변화는 작아졌다. 특히, 전도계수가 0.1 m^2/day 인 경우 계절양수의 영향이 미미해져서 SDR의 변화폭은 매우 작아졌으며, 서서히 증가

하면서 새로운 동적평형상태에 도달하기까지 오랜 시간이 걸렸다. 전도계수가 작아도 양수 이후 시간지연 현상은 나타나지 않았다.

국내에서는 2010년부터 2012년 사이에 4대강 살리기 사업의 일환으로 4대강에 보를 건설하고 하상을 준설하였다. 보 건설로 인해 하천수위뿐만 아니라 인근 지하수위도 상승하여 수변지역에서는 비교적 많은 양의 수자원이 확보되었다(Lee et al., 2015). 하지만 하상퇴적물 분석을 수행한 결과 보 상류에서 점토 함량이 높게 관측되었으며, 이는 보 건설이 퇴적물의 흐름을 방해하여 보 상류에 퇴적현상이 발생한 것으로 분석되었다(Kang et al., 2012). 이러한 퇴적현상으로 인해 하상퇴적물의 전도계수가 작아지면 하천과 대수층 사이의 수리적 연결성이 저하되므로 지하수 양수로 인해 발생할 수 있는 하천수의 유입이 억제될 것이라는 측면에서 하천건천화를 방지하는데 도움이 될 수는 있다. 하지만 이와 동시에 대수층에서 하천으로의 지하수 자연 유출 또한 영향을 받게 된다. 일반적으로 이득하천의 양상을 보이는 국내 하천의 경우 이처럼 투수성이 낮은 세립질토양이 계속 퇴적되어 하천과 대수층 사이의 수리적 연결성이 저하되면 지하수 유출량은 점차 감소할 것으로 예상된다. 그러므로 보 건설 이후 퇴적학적 변화가 예상되는 보 상류지역을 중심으로 지속적인 하상 퇴적물 모니터링이 필요하다.

4.2.3. 양수정 스크린 심도가 SDR에 미치는 영향

최근 수변지역 지하수 이용량의 증가로 인해 지하수 고갈문제가 빈번히 발생하고 있으며, 부족한 지하수를 충족시키기 위해 지하수 개발심도는 암반층까지 깊어지고 있는 추세이다(Korea Water Resources Corporation, 2011). 이에 따라 암반층에서의 지하수 양수가 하천건천화에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하지만 아직 미흡한 상황이다. 따라서 양수정 스크린이 암반층에 설치된 경우 암반층의 수리전도도에 따른 SDR을 비교하였다. 또한 암반층과 충적층 사이의 연결성이 SDR에 미치는 영향도 평가하였다.

Fig. 10은 암반층의 수리전도도(K_b) 및 수직방향 수리전도도(K_v)에 따른 SDR 변화를 보여주는 그림이다. 암반층에서 양수할 경우 SDR 변화를 살펴본 결과, SDR은 암반층의 수리전도도에 영향을 거의 받지 않았으며, 충적층에서 양수할 때보다 시간지연도 조금 발생하였다(Fig. 10a). 이는 하천이 주로 투수성이 높은 충적층과 연결되어 상호작용하기 때문에 발생한 결과로써, 투수성이 높은 층의 수리상수가 SDR에 크게 영향을 미치는 것으로 나타

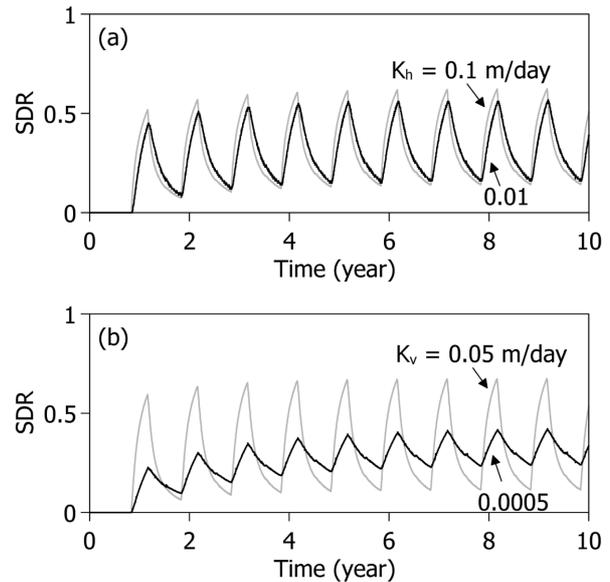


Fig. 10. Comparison of stream depletion caused by different values of (a) hydraulic conductivity of bedrock (K_b) and (b) vertical conductivity (K_v).

났다. 따라서 투수성이 상대적으로 낮은 층에서 양수할 경우, 그 층의 수리전도도가 SDR 변화에 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 분석되었다. 한편, 암반층과 충적층 사이의 연결성이 SDR에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 수직방향의 수리전도도를 0.0005, 0.05 m/day로 설정하여 SDR을 비교하였다(Fig. 10b). 그 결과, 수직방향의 수리전도도에 따라 SDR 변화폭이 크게 달라지는 것으로 나타났다. 암반층과 충적층 사이의 연결성이 낮을 경우, 하천과 암반층 사이의 물 교환이 원활하지 못하여 SDR이 민감하게 반응하지 않았으며, 시간지연도 발생하지 않았다. 또한 수직방향의 수리전도도가 작을수록 동적 평형 상태에 천천히 도달하는 것으로 나타났다. 결론적으로 암반층에서 양수를 하더라도 암반층의 수리전도도보다는 충적층의 SDF와 암반층과 충적층 사이의 연결성이 중요한 것으로 판단된다.

4.2.4. 관개회귀수량이 SDR에 미치는 영향

국내 시설재배지에서는 보통 양수량의 50% 이상이 소모되지 않고 하천으로 유출되는 관개회귀수량(irrigation return flow)인 것으로 확인된 바 있다(Kim et al., 2010; Song et al., 2015). 따라서 관개회귀수량이 SDR에 미치는 영향을 분석하였다. 우물을 하천으로부터 200, 800 m 떨어진 곳에 각각 설치하였으며, 이를 통해 계산된 SDF는 각각 100, 1600 days이다. 관개회귀수량은 양수 동안

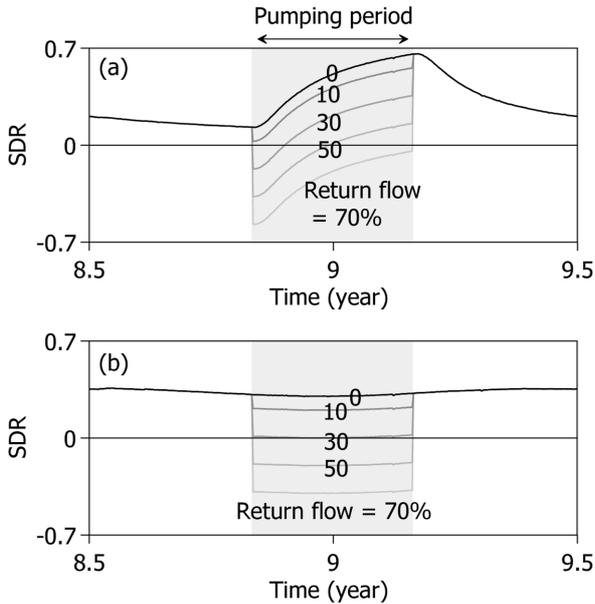


Fig. 11. Comparison of stream depletion caused by different rates of irrigation return flow: (a) a well located 200 m from the stream (SDF = 100 days) and (b) a well located 800 m from the stream (SDF = 1,600 days).

만 적용하였으며, 관개회귀율은 0, 10, 30, 50, 70%로 변화시켰다.

Fig. 11은 관개회귀율에 따른 SDR 변화를 보여준다. 이때 SDR이 음의 값을 보이면 하천유량이 증가하는 것을 나타낸다. 관개회귀율이 커질수록 양수 동안 SDR은 감소하며, 양수가 중단된 후 SDR은 관개회귀수량을 적용하기 전과 같은 값을 보인다. 관개회귀율이 50%일 때를 살펴보면 SDF가 작을 경우(Fig. 11a), 양수 기간 동안 SDR 변화가 커서 양수 초반에는 오히려 하천유량이 증가하였지만, 점차 양수의 영향이 커지면서 하천유량이 감소하는 것으로 나타났다. 한편, SDF가 클 경우(Fig. 11b), 양수기간에 관계없이 연중 유사한 SDR을 보여 50% 이상의 관개회귀율을 적용하면 양수 기간 동안 오히려 하천유량이 증가하고, 양수가 중단된 후 하천유량이 감소하는 것으로 나타났다.

5. 토의 및 결론

국내에서 발생하는 하천건천화는 주로 지하수의 무분별한 사용으로 발생하고 있으며, 특히 건기인 겨울철에 지하수 이용량이 집중되어 있어 겨울철 하천으로의 지하수 유출량은 부족한 실정이다. 지속적인 수자원확보를 위해 하천-대수층 상호작용에 대한 연구가 활발히 수행되고 있

지만, 지하수 사용이 하천건천화에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 지하수 모델링 기법을 이용하여 계절양수가 하천-대수층 상호작용에 미치는 영향을 분석하였으며, 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 하천수위 변동 및 강수량의 계절 집중성에 의하여 지하수 유출량과 저유량의 변동성이 크게 나타나 국내 수변지역 대수층은 하천과 끊임없이 상호작용하는 것으로 확인되었다. 주로 여름철 하천수위 변동과 강수에 의해 많은 양의 지하수가 함양되었으며, 풍수기를 제외한 대부분의 기간 동안 이득하천의 양상을 보였다. 강수에 의한 지하수 함양을 고려하지 않을 경우, 지하수 저유량은 연중 내내 일정한 값을 보였다. 하지만 지하수와 하천의 수위차가 크지 않아 하천수위 변동에 따라 유출량이 변하면서 지하수 흐름 방향이 변하는 것으로 나타났다.

2) 계절양수를 반영한 지하수 흐름 모델의 모의 결과는 SDF 및 하상퇴적물의 전도계수에 따라 SDR과 지하수 저유량의 변화양상이 크게 달라질 수 있음을 보여주었다. 또한 층적 및 암반층과 같이 다층의 대수층 구조를 갖는 경우, 양수정의 스크린 위치에 관계없이 투수성이 높은 층의 SDF와 층 사이의 연결성이 SDR에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 층적층의 SDF가 클수록, 하상퇴적물의 전도계수 및 층 사이 연결성이 낮을수록 양수 동안 비교적 낮은 SDR을 보였다. 하지만 양수 중단 후에도 지하수 유출량이 감소하여 높은 SDR을 보였으며, 평형상태에 늦게 도달하여 더 오랜 기간 하천유량을 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 수변지역에서 계절양수 시 양수의 영향을 최소화시키기 위해서는 대수층의 수리상수, 하천-대수층 연결성 및 우물 위치 등에 대한 종합적인 분석이 요구된다. 또한 우물이 하천에서 멀어질수록 양수에 의해 지하수 저유량은 크게 감소하지만, 하천유량에 미치는 영향은 분산되어 1년 내내 유사한 SDR을 보인다. 따라서 수변지역 지하수 개발 시 하천 및 대수층에 미치는 영향을 모두 고려한 취수정 관리대책이 필요하다.

3) 양수정과 동일한 SDF를 갖는 곳에서 인공 함양할 경우, 양수를 할 경우와 동일한 SDR 및 지하수 저유량 변화를 보일 것으로 예상된다. 지하수 주입 시 SDF가 클수록 평형상태에 도달하는데 오랜 시간이 걸리지만, 주입된 물이 바로 하천으로 유출되지 않아서 지하수 저유량은 보다 많이 증가할 것이다. 적극적인 지하수 자원 확보 방법 중 하나인 인공함양은 일부 시설재배 밀집지역에서 계절 양수로 인해 발생하고 있는 지하수 고갈 문제를 해결할 수 있는 기법으로, 이를 적용하기 위해서는 주입 위치

및 시기에 대한 평가가 선행되어야한다. 따라서 양수정 뿐만 아니라 인공 함양을 위한 주입정 설치 시에도 SDF를 고려한다면 인공함양의 효율성을 높일 수 있을 것이다. 또한 양수 및 주입이 SDR에 미치는 영향을 모두 고려하였을 경우, 인공함양의 효율을 극대화시키는 우물의 위치 및 시기에 대한 평가가 필요하다.

4) 국내 시설재배지에서 양수량의 50% 이상이 하천으로 되돌아가는 것을 고려하면 계절양수는 오히려 건기에 하천유량을 증가시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 하지만 SDF가 작으면 SDR의 변화가 커서 양수 초기에 일시적으로 하천유량이 증가하고, 시간이 경과하면서 점차 하천유량이 감소하는 것으로 나타났다. 실제로 동절기 시설재배지 인근 하천에서는 관개회귀수량에 의해 하천유량의 일주기 변화가 관측되며, 일부 지역에서는 하천유량이 동절기에 오히려 증가하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 수변지역에서 계절양수에 의해 발생하는 하천-대수층 상호작용과 유역 내 수자원 전체에 대한 통합 물수지 분석을 위해서는 지하수 뿐만 아니라 관개회귀수량과 하천의 유출량 변화에 대한 정밀 모니터링이 필요하다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, San Diego, CA, 381 p.
- Bredehoeft, J. and Kendy, E., 2008, Strategies for offsetting seasonal impacts of pumping on a nearby stream, *Ground Water*, **46**(1), 23-29.
- Bredehoeft, J., 2011, Hydrologic trade-offs in conjunctive use management, *Ground Water*, **49**(4), 468-475.
- Jenkins, C.T., 1968a, Computation of Rate and Volume of Stream Depletion by Wells, Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, chapter D1, U.S. Government Printing Office, Washington, 17 p.
- Jenkins, C.T., 1968b, Techniques for computing rate and volume of stream depletion by wells, *Ground Water*, **6**(2), 37-46.
- Jun, S., Park, J., and Park, C., 2012, Application of technique for evaluating streamflow depletion in the urbanized small and medium watershed: Gyeongancheon, Wangsukcheon, *KRCCEM*, **8**(6), 67-81.
- Jung, K., Cho, H., Kim, J., and Shim, M., 2003, Analysis of drying streams characteristics using a GIS, *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **36**(6), 1083-1095.
- Kang, M., Choi, I., Park, J., and Choi, J., 2012, Investigation of the effect of weirs construction in the Han River on the characteristics of sediments, *J. KSEE*, **34**(9), 597-603.
- Kim, G., Son, Y., Lee, S., Jeong, A., Cha, E., and Ko, M., 2012a, Understanding of surface water-groundwater connectivity in an alluvial plain using statistical methods, *J. Eng. Geol.*, **22**(2), 207-221.
- Kim, J., Kim, M., Chung, I., Kim, N., and Jeong, G., 2009, An analysis of groundwater level fluctuation caused by construction of groundwater dam, *J. Eng. Geol.*, **19**(2), 227-233.
- Kim, N., Lee, J., Chung, I., and Kim, C., 2012b, Change of groundwater-streamflow interaction according to groundwater abstraction in a green house land, *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **45**(10), 1051-1067.
- Kim, N., Lee, J., Chung, I., and Sung, G., 2012c, Analysis of effects of groundwater abstraction on streamflow for Sinduncheon watershed, *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **45**(12), 1259-1273.
- Kim, T., Kim, Y., Ha, G., Kim, K., Koh, D., Yang, I., and Hong, S., 2004, Study on the induced interaction between groundwater and surface water due to the tunnel construction, *J. Eng. Geol.*, **14**(1), 81-91.
- Kim, T., Lee, H., and Moon, J., 2010, Estimation of return flow rate of irrigation water in Daepyeong pumping district, *J. Kor. Soc. Agricultural Eng.*, **52**(1), 41-49.
- Koo, M. and Lee, D., 2002, A numerical analysis of the water level fluctuation method for quantifying groundwater recharge, *J. Geol. Soc. Kor.*, **38**(3), 407-420.
- Koo, M., Kim, T., Kim, S., Chung, S., Kang, I., Lee, C., and Kim, Y., 2013, Estimating groundwater recharge using the water-table fluctuation method: effect of stream-aquifer interactions, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(5), 65-76.
- Korea Water Resources Corporation, 2007, Basic Plan for Groundwater Management, Daejeon, 149 p.
- Korea Water Resources Corporation, 2009, Evaluation and Improvement of the Stream Depletion, Daejeon.
- Korea Water Resources Corporation, 2011, Groundwater Annual Report, Daejeon.
- Lee, D., Park, J., Park, C., Yang, J., Nam, D., Kim, D., Jeong, G., Choi, Y., and Boo, S., 2004, Application of the artificial recharge to reduce the ground-water drawdown of the riverbank

- filtration, *J. Eng. Geol.*, **14**(4), 391-400.
- Lee, E., 2004, Ground water sustainability and ground water-surface water interaction, *J. Geol. Soc. Kor.*, **40**(3), 361-368.
- Lee, H., Koo, M., and Kim, Y., 2014, Determining optimal locations of an artificial recharge well using an optimization-coupled groundwater flow model, *J. Soil Groundw. Environ.*, **19**(3), 66-81.
- Lee, H., Koo, M., Kim, K., and Kim, Y., 2015, Spatio-temporal variations in stream-aquifer interactions following construction of weirs in Korea, *Ground Water*, doi: 10.1111/gwat.12373.
- Lee, J., Kim, D., Masahiro, I., and Han, M., 2010, A case study on stream maintenance and security for prevention of urban stream depletion, *GRI Review*, **12**(10), 179-194.
- Lee, J., Kim, N., and Chung, I., 2013, Assessment of stream-flow depletion due to groundwater pumping from a well, *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **46**(11), 1079-1088.
- Lee, Y. and Kim, S., 2013, Temporal and spatial analysis of hydrology and water quality in small rural streams for stream depletion investigation, *J. Kor. Soc. Agricultural Eng.*, **55**(6), 177-186.
- Miller, C.D., Durnford, D., Halstead, M.R., Altenhofen, J., and Flory, V., 2007, Stream depletion in alluvial valleys using the SDF semianalytical model, *Ground Water*, **45**(4), 506-514.
- Ministry of Science and Technology, 2003, Technology of Sustainable Surfacewater Development.
- Rural Development Administration, 2007, Techniques for Water Curtain System in Plastic Greenhouse, 88 p.
- Song, J., Song, I., Kim, J., and Kang, M., 2015, Characteristics of irrigation return flow in a reservoir irrigated district, *J. Kor. Soc. Agricultural Eng.*, **57**(1), 69-78.
- Sophocleous, M., 2002, Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeol. J.*, **10**(1), 52-67.
- Winter, T.C., 1999, Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems, *Hydrogeol. J.*, **7**, 28-45.