

해석적 모형을 이용한 지하수 양수 및 하천수위 변화에 따른 하천수 감소 특성 분석

이정우*

한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원

Analysis of Stream Depletion due to Groundwater Pumping in Variable Stream Stages Using an Analytical Model

Jeongwoo Lee*

Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

Abstract

To prevent the drying-out of streams and to make effective use of stream water and groundwater, it is necessary to evaluate the impact of groundwater pumping on nearby streams. To this end, stream depletion due to groundwater pumping should be investigated in terms of various hydraulic characteristics of the aquifer and stream. This study used the Baalousha analytical solution, which accounts for stream-stage variation over time, to analyze stream depletion due to groundwater pumping for cases where the stream level decreases exponentially and recovers after the decrease. For conditions such as an aquifer transmissivity of $10\sim 100\text{ m}^2\text{ d}^{-1}$, storage coefficient $0.05\sim 0.3$, streambed hydraulic conductance $0.1\sim 1.0\text{ m d}^{-1}$, stream-well distance $100\sim 500\text{ m}$, and stage recession coefficient $0.1\sim 1.0\text{ d}^{-1}$, the contribution of stream water (the dimensionless ratio of stream water reduction rate to groundwater pumping rate) was analyzed in cases where stream level change was considered. Considering the effect of stream-stage recession, the contribution of stream water is greatly reduced and is less affected by the stream-depletion factor, which is a function of the stream-to-well distance and hydraulic diffusivity. However, there is no significant difference in stream depletion under constant- and variable-stage recovery after recession. These results indicate that stream level control can distribute the relative impacts on stream water and aquifer storage during groundwater pumping.

Keywords: Baalousha analytical solution, groundwater pumping, stream level variation, stream depletion

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Jeongwoo Lee
E-mail: ljw2961@kict.re.kr

Received: 17 October, 2019
Revised: 12 November, 2019
Accepted: 15 November, 2019

© 2019 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

하천 건천화 예방 및 하천수와 지하수의 효율적 연계 이용을 위해서는 지하수 이용이 하천의 수량에 미치는 영향 평가가 수반되어야 한다. 이를 위해서는 대수층과 하천의 다양한 수리특성 조건에 대해 지하수 양수에 따른 하천수량의 변화 분석이 필요하다. 본 연구에서는 하천수위 변동을 반영할 수 있고 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 산정할 수 있는 Baalousha 해석해를 이용하여 하천수위가 지수함수적으로 감소하는 경우와, 감소 후 다시 회복되는 경우에 대해 지하수 양수로 인한 하천수 감소량의 변화 특

성을 분석하였다. 대수층의 수리특성으로 투수량계수 10~100 m²/d 및 저류계수 0.05~0.3, 하천의 수리특성으로 하상수리전도성 0.01~20 m/d, 하천수위 감소상수 0.1~1.0 l/d, 그리고 하천과 관정의 이격거리 100~500 m 조건에 대해 지하수 양수량 대비 하천수 감소량인 하천수 기여도를 산정하고 그 거동 특성을 하천수위 변동 유무에 따라 종합적으로 분석, 제시하였다. 하천수위 감소 영향을 고려하였을 경우 하천수 기여도가 크게 감소하고 하천-관정 이격거리와 수리확산도의 함수인 하천고갈인자 값에 영향을 작게 받는 것으로 나타났으며, 반면에 하천수위 감소 후 회복되는 조건에서의 하천수 기여도는 하천수위 변동이 없는 경우와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 하천수위 조절을 통해 지하수 양수시 하천수 및 대수층 저류량에 미치는 상대적 영향의 통제가 가능함을 의미한다.

주요어: Baalousha 해석해, 지하수 양수, 하천수위 변동, 하천수량 감소

서론

하천과 대수층이 수리적으로 연결되어 있는 지역에서는 지하수 취수 시 대수층뿐만 아니라 하천수도 공급원이 될 수 있기 때문에 하천 주변에서 양수하는 것이 수량 측면에서 유리하다. 또한 하천수위 경계조건 영향으로 양수 시 지하수위 강하량도 줄어들고 취수 심도도 깊지 않아도 되며 하천변 여과를 통해 수질까지도 좋아지는 효과도 있다. 이와 같이 수량과 수질 측면에서 이롭기 때문에 하천 인근 지하수는 수자원 개발·이용에 있어 주요한 공급원 역할을 하고 있다. 그러나 하천 인근에서의 과도한 지하수 이용은 건천화 요인으로 작용하고 갈수 시 하천수질 저하를 유발하며 서식환경 등 수생태계에도 영향을 줄 수 있기 때문에 지하수 이용이 하천의 수량에 미치는 영향 검토가 필요하다. 또한 최근 들어 지표수와 지하수의 통합적이고 효율적인 연계관리의 중요성이 부각되고 있는데 이를 위해서는 지하수 이용과 하천수량간의 정량적인 상관관계 파악이 우선되어야 한다.

지하수 양수로 인해 하천으로의 지하수 유출량이 줄어들거나 하천에서 대수층으로의 유도 함양량(induced recharge)이 증가하여 하천의 수량이 감소하는 것을 stream depletion 또는 capture라 정의하고 있다(Bredehoeft et al., 1982). 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 현장에서 직접 측정하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 지하수유동 수치해석모형을 이용하여 양수전과 양수후의 기저유량 차이를 구해 간접적으로 하천수 감소량을 산정한다. 그러나 이러한 모델링 방법 역시 시간과 비용이 많이 소요되고 전문가 숙련도가 요구되기 때문에 보다 간편한 방법으로 하천-대수층-양수정 경계치 문제에 대한 해석해가 개발, 이용되어 왔다.

Theis(1941)는 하천이 대수층을 저면까지 관통하고 하천과 대수층이 서로 수리적으로 완전 연결된 조건에 대해 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 산정하는 해석적 방법을 처음으로 개발하였고, 이를 Glover and Balmer(1954)가 여오차 함수(complementary error function)를 이용하여 보다 간단한 형태로 다시 나타내었다. Glover(1960)는 Glover and Balmer(1954) 해석해를 적용하여 그 결과를 차트형태로 나타내었고, Theis and Conover(1963)는 양수량 대비 하천수 감소량(depletion rate) 비율의 무차원 그래프로 도시하였으며, Jenkins(1968)은 무차원의 하천수 감소량 비율 및 감소체적(depletion volume) 비율을 하천-관정 이격거리, 투수량계수, 저류계수의 함수이고 시간의 차원을 갖는 하천고갈인자(stream depletion factor, SDF)에 시간을 곱해 무차원값에 따라 도시하였다. Hantush(1965)는 Theis(1941) 및 Glover and Balmer(1954) 해석해에 추가적으로 하상 퇴적층 수리전도도와 두께, 대수층 수리전도도의 함수로 구성된 길이 차원을 갖는 하천누수계수(stream leakance) 인자를 도입하여 하상 준투수층(semipervious layer)으로 인해 하천과 대수층이 불완전하게 연결된 경우에 대한 해석해로 확장하였다. Hunt(1999)는 대수층 두께에 비해 지하수위 강하량이 무시할 정도로 매우 작고 미소 하폭(line width) 가정 하에 대해 보다 실제적인 조건인 하천이 대수층을 일부 관통하고 하상의 준투수층 특성을 고려한 해석해를 개발하였다. 국내에서는 Kim(2010), Lee et al.(2016), Lee et al.(2019) 등이 Hunt(1999) 해석해를 하천 주변 지하수 이용 영향을 분석하는데 활용하였다. Baalousha(2012)는 양수와 하천 누수 영향을 중첩하는 방법

을 적용하여 Hunt(1999)와 동일한 형태의 해석해를 다시 유도하였고 또한 유한 하폭(finite width) 조건에 대한 해석해를 개발하였으며, 이를 이용하여 Lee et al.(2018)이 다양한 대수층 및 하천 수리조건에 대한 하폭 영향을 분석하였다.

이상 열거된 해석해는 하천수위의 시간적 변화를 무시하고 일정수위 가정 하에 유도된 것으로 홍수사상 또는 감수기 하천수위 변화에 대한 영향을 고려하고 있지 못하다. 하천수위 변동을 고려하여 지하수위 및 하천-대수층 상호유동량을 계산하는 해석해(Hall and Moench, 1972), 지하수위를 계산하는 해석해(Zlotnik and Huang, 1999)가 개발되었고, 국내에서는 Ha et al.(2008)이 Hall and Moench(1972) 해석해를 이용하여 지하수위, 하천-대수층 유동량, 저류량 등에 미치는 하천수위의 영향을 분석한 사례도 있지만, 하천수위 영향만을 고려한 것으로 하천 주변 지하수 양수의 영향을 함께 고려하지 못하고 있다. 반면에 Baalousha(2015)은 Hunt(1999) 및 Baalousha(2012)의 해석해를 근간으로 하천수위와의 회선적분(convolution integral)을 통해 지하수 양수 및 하천수위 변동을 모두 고려한 조건에 대한 해석해를 개발하였다.

본 연구에서는 지하수 양수와 하천수위 변동에 따른 하천수 감소량을 산정할 수 있는 Baalousha(2015) 해석해의 이론적 배경을 간략하게 소개하고, 이 해석해를 하천수위가 지속적으로 감소하거나 감소 후 다시 회복하는 문제에 적용하여 하천수 감소량의 대수층과 하천의 수리 특성에 따른 시간적 거동 특성을 분석, 고찰하였다.

이론 및 방법

Baalousha(2015) 해석해

Baalousha(2012)는 하천에 인접하여 균질, 등방 대수층에서 지하수 양수를 했을 경우 지하수위 저하량을 산정하기 위해 식 (1)과 같이 양수에 의한 영향식 (2)과 하천 누수에 의한 영향식 (3)의 합으로 표현된 해석해를 유도하였다.

$$s(x, y, t) = s_w(x, y, t) + s_r(x, y, t) \quad (1)$$

$$s_w(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi T} E_i\left(-\frac{S(L-x)^2 + y^2}{4Tt}\right) \quad (2)$$

$$s_r(x, y, t) = -\frac{Q\lambda}{8\pi T^2} \int_0^\infty E_i\left(-\frac{S(L+|x|+\eta)^2 + y^2}{4Tt}\right) e^{-\frac{\lambda\eta}{2T}} d\eta \quad (3)$$

여기서, s 는 임의 공간위치(x, y)에서 시간(t)에 따른 지하수위 저하량, s_w 는 Theis의 해로 알려진 지하수 양수로 인한 지하수위 저하량, s_r 은 하천에서 대수층으로 누수로 인한 변화량, Q 는 지하수 양수량, T 는 투수량계수, S 는 저류계수, E_i 는 지수형 적분함수(exponential integral), L 은 하천과 양수정간의 거리, λ 는 하폭 W 와 하상퇴적층의 수리전도도 K_s 의 곱을 하상퇴적층두께 M 으로 나눈 하상수리전도성이며, η 는 공간 적분변수이다.

상기 식은 하천의 수위가 일정(constant)하다는 가정하에 유도된 것으로 Baalousha(2015)는 이를 확장하여 하천수위가 시간적으로 변하는 조건에 대한 지하수위 저하량을 산정하는 해석해를 개발하였다. 회선적분(convolution integral)을 이용하여 식 (4)와 같이 하천 누수에 의한 지하수위 변화량 s_r 의 시간에 대한 편미분과 하천수위의 시간적 변화량 $\phi(t)$ 와 곱을 시간적으로 적분한 형태로 나타내고, 여기에 식 (3)을 대입하면 식 (5)가 되고 이를 η 에 대해 적분하면 식 (6)과 같이 하천수위 변화를 고려한 하천 누수에 따른 지하수위 변화량(s_r) 산정식을 유도할 수 있다.

$$s_v(x, y, t) = \int_0^t \phi(\tau) \frac{\partial}{\partial t} s_r(x, y, t - \tau) d\tau \quad (4)$$

$$s_v(x, y, t) = \frac{Q\lambda}{8\pi T^2} \int_0^t \frac{\phi(\tau)}{(t-\tau)} \int_0^\infty e^{\frac{\lambda\eta}{2T}} e^{\left(-\frac{S(L+|x|+\eta)^2+y^2}{4T(t-\tau)}\right)} d\eta d\tau \quad (5)$$

$$s_v(x, y, t) = \frac{Q\lambda}{8\pi^{1/2} T^{3/2} S^{1/2}} \int_0^t \frac{\phi(\tau)}{(t-\tau)^{1/2}} e^{\left(-\frac{\lambda^2(t-\tau)+2\lambda S(L+|x|)-S^2y^2/(t-\tau)}{4ST}\right)} \operatorname{erfc}\left(\frac{S(L+|x|)+\lambda(t-\tau)}{\sqrt{4ST(t-\tau)}}\right) d\tau \quad (6)$$

여기서, erfc 는 여오차함수(complementary error function), η 와 τ 는 각각 시간과 공간 적분변수이다.

하천수 감소량 Δq 는 Darcy 법칙을 적용하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta q = -2T \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial s_v}{\partial x}\right)_{x=0} dy = -4T \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial s_v}{\partial x}\right)_{x=0} dy \quad (7)$$

식(6)을 하천 횡단방향 x 에 대해 미분한 것에 $x=0$ 을 대입하고, 다시 이를 하천 흐름방향 y 에 대해 적분하면 최종적으로 식(8)과 같이 하천수위 변화를 고려한 지하수 양수에 따른 하천수 감소량 산정식을 유도할 수 있다.

$$\Delta q = \frac{Q\lambda}{2\pi^{1/2} T^{1/2} S^{1/2}} \int_0^t \frac{\phi(\tau)}{(t-\tau)^{1/2}} e^{-\frac{S^2L^2}{4ST(t-\tau)}} d\tau - \frac{Q\lambda^2}{4TS} \int_0^t \phi(\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{SL+\lambda(t-\tau)}{\sqrt{4ST(t-\tau)}}\right) e^{\frac{\lambda^2(t-\tau)+2\lambda LS}{4ST}} d\tau \quad (8)$$

만일, 식(8)에서 $\phi(t) = 1$ 이라면 식(9)와 같이 하천수위 변화가 없는 조건에 대한 Hunt(1999)의 하천수 감소량 산정식과 동일하게 된다.

$$\Delta q = Q \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{SL^2}{4Tt}}\right) - Q \exp\left(\frac{\lambda^2 t}{4ST} + \frac{\lambda L}{2T}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\lambda^2 t}{4ST}} + \sqrt{\frac{SL^2}{4Tt}}\right) \quad (9)$$

분석 절차

본 연구에서는 지하수 양수 및 하천수위 변화 영향을 산정할 수 있는 Baalousha(2015)의 해석해인 식(8)을 전산 프로그램화하였으며, 이를 이용하여 보수문개폐처럼 하천수위 저하 및 회복에 따른 하천수 감소량 특성을 분석하였다. 먼저 임의 특정한 대수층 및 하천 조건, 그리고 하천수위 변화 유무에 따른 하천수 감소량의 시간적 거동 특성을 분석하였다. 이어서 대수층의 투수성 및 저류성, 양수정의 하천으로부터 떨어진 거리, 하천과 대수층의 수리적 연결성 척도인 하상수리전

도성 등에 따라 지하수 양수로 인한 하천의 수량에 미치는 영향 정도가 다르게 나타나기 때문에 다양한 대수층 및 하천의 수리조건에 따른 지하수 양수량 대비 하천수 감소량을 산정하고 그 결과를 종합적으로 분석, 고찰하였다.

결과 및 고찰

지하수 양수 및 하천수위 변화에 따른 하천수 감소 거동 특성 분석

Baalousha(2015)는 하천수위 함수를 식 (10)과 같은 지수형 감수곡선 형태로 나타내고, 특정 대수층 조건에 대해 하천수 감소량의 시간적 변화량을 식 (8)을 이용하여 산정하였다.

$$\phi(t) = s_0 e^{-\alpha t} \quad (10)$$

여기서, s_0 는 초기 하천수위, α 는 감수상수이다.

본 연구에서는 하천수위 변동 조건으로 식 (10)을 적용한 경우(recession)와, 하천수위가 식 (10)에 따라 t_c 까지 $0.99s_0$ 만큼 강하하고, 식 (11)과 같이 t_c 이후 다시 원래대로 회복되는 경우(recession + recovery)에 대해 하천수 감소량의 거동 특성을 분석하였다.

$$\phi(t) = s_0 (1 - e^{-\alpha(t-t_c)}) \text{ for } t > t_c \quad (11)$$

Fig. 1은 하천-관정 이격거리 $L = 100$ m, 대수층의 투수량계수 $T = 100 \text{ m}^2/\text{d}$, 저류계수 $S = 0.05$, 하상수리전도성 $\lambda = 10 \text{ m/d}$ 인 조건(Case 1), $s_0 = 1$ 에 대해 식 (8)로 하천수 감소량을 산정하고 이를 지하수 양수량으로 나누어 무차원(이하 하천수 기여도)으로 도시한 것이다. 하천수위 변화 영향을 평가하기 위해서 식 (9)로 산정한 하천수위 변화가 없을 때의 결과도 함께 나타내었다.

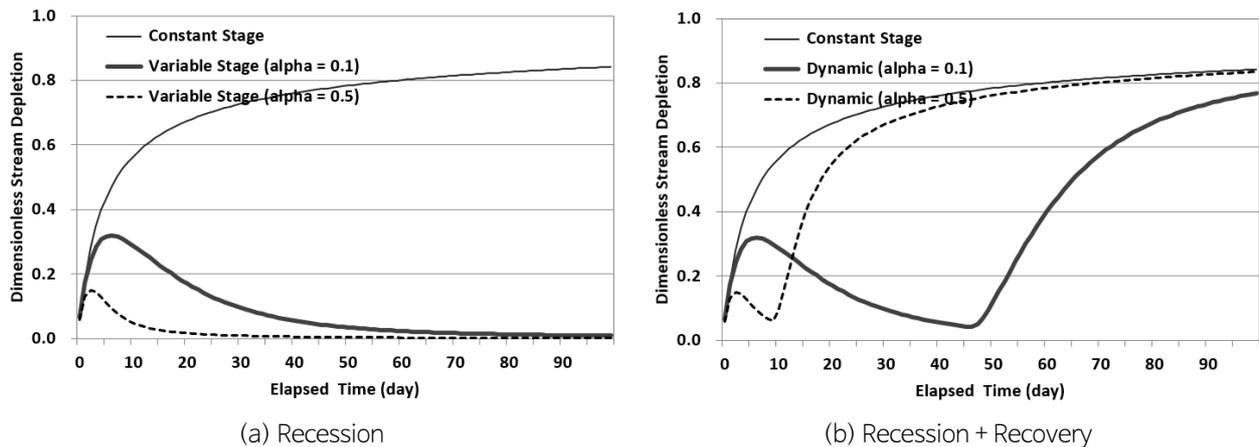


Fig. 1. Dimensionless stream depletion over time for constant and variable stages (Case 1).

Fig. 1a는 하천수위가 지수함수적으로 감소하는 경우 양수기간에 따른 하천수 기여도를 나타낸 것으로 하천수위가 일정한 경우에는 하천수 감소량이 급격히 증가하다가 점차 증가속도가 완만해지는 양상을 보이고 있으나, 하천수위가 감소하는 경우에는 양수초기에만 증가하다가 침투치를 기록한 후 다시 감소하는 양상을 보이고 있다. 이는 하천수위가 점차 감소함에 따라 지하수와 하천수간의 수두차이가 감소한데서 기인한 것이며, 감수상수 α 가 0.1 d^{-1} (이하 0.1)일 때보다 0.5 d^{-1} (이하 0.5)로 상대적으로 클 경우 하천수위의 급격한 저하로 하천수 기여도가 더 크게 감소하고 있다. 90일 동안 하천수 감소 총량은 감수상수가 0.1 인 경우 하천수위가 일정한 경우 대비 12.8% 이고, 감수상수가 0.5 인 경우에는 2.6% 로 크게 줄어들었다.

Fig. 1b는 하천수위가 t_c 까지는 식(10)에 따라 감소하고, t_c 이후에는 식(11)에 따라 다시 상승하는 경우에 대한 하천수 기여도를 도시한 것이다. 하천수위 감소가 종료되는 시각 t_c 는 $\phi(t)$ 가 하천수위 강하가 $0.99s_0$ 보다 크게 발생하기 시작하였을 때로 설정하였다. $\alpha = 0.5$ 일 때는 t_c 가 약 10일, $\alpha = 0.1$ 일 때는 t_c 가 약 47일이다. 하천수위가 감소하는 감수부 기간에는 앞선 Fig. 1a와 같이 반응하다가 하천수위 상승이 시작되면서 하천수 기여도가 다시 증가하는 양상을 보이고 있다. 감수상수 α 가 0.5 일 때 하천수위 감소 중단 및 회복이 빨라 하천수 기여도가 더 빠른 상승곡선을 나타내고 있다. 3개월 동안 하천수 감소 총량은 하천수위 변화 영향으로 $\alpha = 0.1$ 일 때는 하천수위가 일정한 경우 감소 총량의 43.9% 이었으며, 반면에 $\alpha = 0.5$ 일 때와 같이 하천수위 회복이 빠르게 일어날 경우에는 88.2% 에 해당되어 하천수위 변화가 없는 경우와 큰 차이를 보이지 않고 있다.

Fig. 2는 하천-관정 이격거리 $L = 200 \text{ m}$, 대수층의 투수량계수 $T = 50 \text{ m}^2/\text{d}$, 저류계수 $S = 0.2$, 하상수리전도성 $\lambda = 5 \text{ m/d}$ 인 조건(Case 2)로 Fig. 1에 비해 관정 이격거리가 길고 수리확산계수가 작으며 하상수리전도성도 작아 하천과 대수층간의 외부스트레스에 대한 반응이 상대적으로 느린 조건에 대한 하천수 기여도 산정 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 하천수 감소 양상이 느린 반응을 보이고 있으며 Fig. 1에서와 마찬가지로 하천수위 감소로 인해 하천수 기여도가 줄어들고 있다. 특히 Fig. 2a의 $\alpha = 0.5$ 일 때 하천수 기여도가 거의 제로로서 하천수 감소는 거의 일어나지 않고 있는데 이는 지하수 양수량의 공급원 역할을 대수층이 대부분 전담하고 있음을 의미한다. 하천수위가 $\alpha = 0.1$ 과 $\alpha = 0.5$ 로 지속적으로 감소하는 조건에서의 하천수 기여도는 하천수위 변화가 없을 때의 각각 21.3% 및 4.6% 인 것으로 분석되었다. Fig. 1b에서도 확인되었듯이 Fig. 2b에서도 하천수위 회복 후 하천수 기여도가 다시 증가하고 있으며, 특히 하천수위의 감소 및 회복이 빠른 조건인 $\alpha = 0.5$ 일 때의 하천수 기여도는 하천수위 변화가 없는 경우와 큰 차이를 보이고 있지 않다. $\alpha = 0.1$ 과 $\alpha = 0.5$ 일 때 3개월 동안 하천수 감소 총량은 각각 하천수위 변화가 없을 때의 31.0% , 79.6% 만큼 차지하였다.

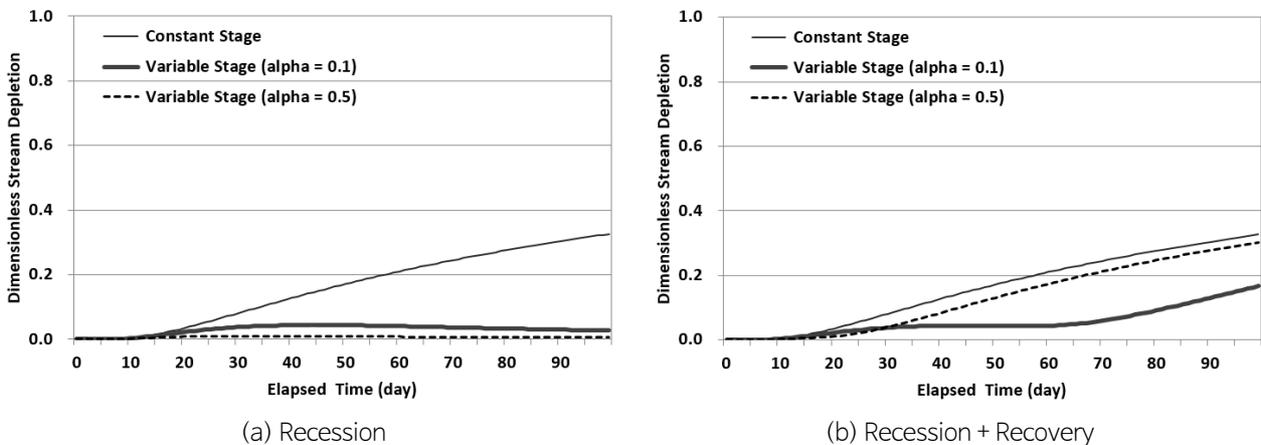


Fig. 2. Dimensionless stream depletion over time for constant and variable stages (Case 2).

대수층 및 하천의 수리특성조건에 따른 하천수 기여도 분석

대수층의 투수량계수 10, 20, 30, 50, 100 m²/d의 5가지, 저류계수 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3의 6가지, 하천과 관정간 이격거리 100, 200, 300, 400, 500 m의 5가지, 하상수리전도성 0.01, 0.1, 1, 5, 10, 20의 6가지, 하천수위 감수상수를 0.1~1.0 d⁻¹까지 0.1 간격으로 10가지로 총 9,900가지 조합에 대해 양수 기간 100일 동안 양수량 대비 하천수 감소량(하천수 기여도)을 산정하고 그 특성을 정량적으로 분석하였다.

Figs. 3~6은 식 (8)로 양수기간 90일 평균 하천수 기여도를 산정하고 저류계수와 하천-관정 이격거리의 제곱의 곱을 투수량계수로 나눈 값인 하천고갈인자(stream depletion factor, SDF)에 따라 나타낸 것이다. 하천수위 변화로 인한 영향을 분석하기 위해서 식 (9)로 하천수위가 일정할 때의 하천수 기여도를 산정하여 함께 도시하였다. 하천수위 변화가 없을 때의 결과는 마름모로 하천수위 변화가 있을 때의 결과는 플러스로 표식하였으며, 하상수리전도성 λ 값이 5 이상으로 하천과 대수층간의 수리적 연결성이 상대적으로 큰 조건인 경우를 부각시키기 위해서 표식을 진하게 나타내었다.

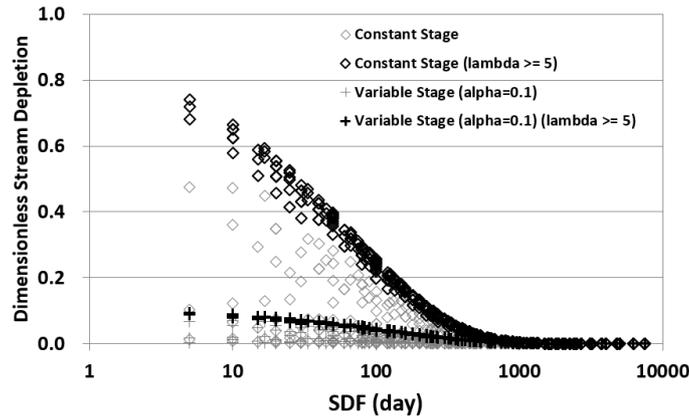


Fig. 3. Dimensionless stream depletion based on the SDF for constant and recessing stages ($\alpha = 0.1$).

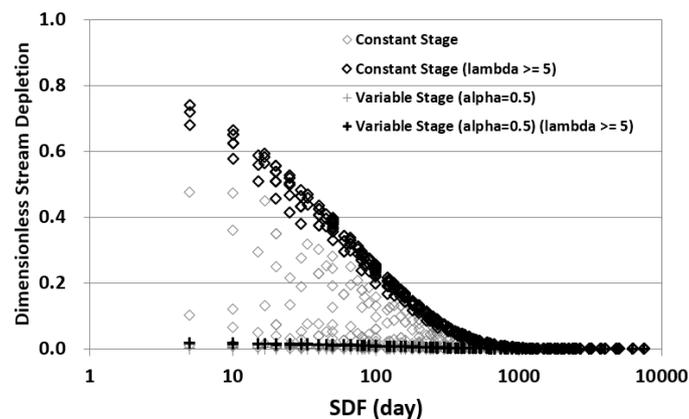


Fig. 4. Dimensionless stream depletion based on the SDF for constant and recessing stages ($\alpha = 0.5$).

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 하천수위 감수상수가 0.1 및 0.5일 때의 90일 평균 하천수 기여도를 SDF에 따라 나타낸 것으로 하천수위 감소를 고려한 경우 하천수 기여도가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 하천수위 변화가 없는 경우 SDF가 커짐에 따라 즉, 수리확산도가 작거나 하천-관정 이격거리가 커짐에 따라 하천수 기여도가 점차 감

소하는 양상이 분명하게 나타나고 있으나, 하천수위가 지수함수적으로 감소하는 경우에는 그 양상이 둔화되고 있으며, 특히 Fig. 4에서와 같이 감수상수가 0.5로 상대적으로 큰 경우에는 SDF 값에 상관없이 하천수 기여도가 매우 작다. 하천수위 감소의 영향으로 하천에서 대수층으로의 유동, 즉, 지하수 충전 효과가 크게 감소하며, 따라서 지하수 양수량의 대부분은 대수층으로 공급되어 지하수위 강하가 더 크게 발생하게 됨을 의미한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 하천수위가 일정기간까지는 강하하고 그 이후 다시 상승하는 경우에 대해 산정한 90일 평균 하천수 기여도를 SDF에 따라 나타낸 것으로 앞선 하천수위가 지속적으로 감소하는 경우인 Fig. 3과 Fig. 4에 비해 SDF값 크기에 영향을 더 받고 하천수위 변화가 없는 경우와의 차이도 줄어드는 것을 알 수 있다. 감수상수가 0.1일 때인 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 SDF가 약 200보다 작은 경우 하천수 기여도는 하천수위 변화가 없을 때의 거의 절반 정도로 나타났으며, Fig. 6과 같이 감수상수가 0.5로 더 큰 경우에는 하천수위 변화가 없을 때와 10% 미만의 차이를 보이고 있다.

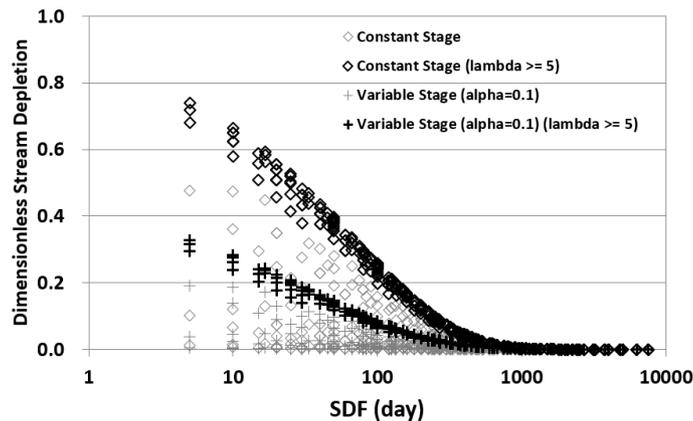


Fig. 5. Dimensionless stream depletion based on the SDF for constant and recessing/recovering stages ($\alpha = 0.1$).

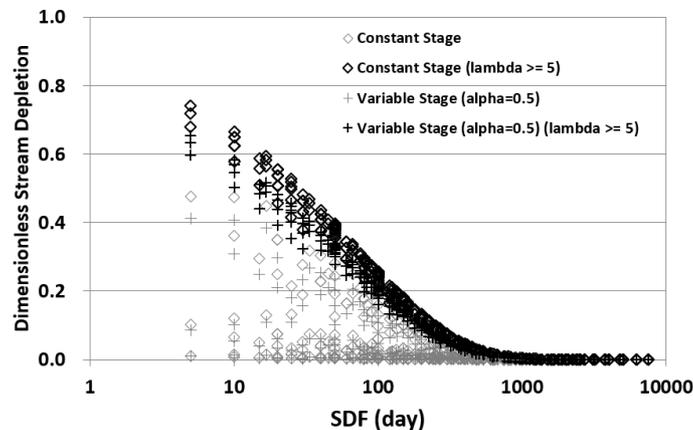


Fig. 6. Dimensionless stream depletion based on the SDF for constant and recessing/recovering stages ($\alpha = 0.5$).

앞선 9,900개 조건 중에서 하천고갈인자 SDF값이 100d 이하이고 하상수리전도성 λ 가 5 m/d 이상으로 하천과 대수층 간의 수리적 연결성이 큰 조건에 대한 하천수 기여도 산정 결과를 발췌하고 이를 하천수위 변화가 없을 때 결과에서 감한 후 그 평균값을 양수 기간에 따라 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7a는 하천수위 감소만 있는 경우에 대한 결과로서 양수기간이

점차 증가함에 따라 하천수 감소비의 차이가 커지고 있으며, 감수상수가 $\alpha = 0.3$ 이상에서는 시간적 변화 양상이 매우 유사하게 나타나고 있다. $\alpha \geq 0.5$ 일 때 하천수위 감소로 인해 양수 기간 30일 평균 하천수 감소비가 약 0.18, 양수 기간 60일 동안 0.30, 양수 기간 90일 동안 0.38만큼 줄어들었으며, 이에 따라 하천수가 대수층으로 유입되는 유도 함양(induced recharge) 즉, 대수층 충전 효과가 점차 줄어들고 있다. Fig. 7b는 하천수위 감소 및 회복에 대한 결과로서 양수 기간이 증가하면서 하천수 감소비 차이가 커지다가 하천수위 회복 영향으로 다시 차이가 점차 줄어들고 있다. 감수상수가 $\alpha = 0.1$ 으로 약 47일 후 하천수위가 회복되는 조건에서는 최대 0.25만큼 하천수 감소비가 더 줄어들었고, $\alpha = 0.3$ 으로 약 16일 후 하천수위가 다시 상승하는 조건에서는 양수 기간 70일 이후에, 그리고 약 10일 후 수위 회복이 시작되는 $\alpha = 0.5$ 나 약 6일 후 수위 회복이 시작되는 $\alpha = 0.9$ 의 경우는 양수 모의 전기간 동안 하천수 감소비의 차이가 0.1보다 작은 것으로 분석되었다. 따라서 대략 $\alpha = 0.5$ 보다 큰 조건으로 하천수위 조절이 가능하다면, 지하수 저류량에 미치는 하천수위 저하로 인한 추가적인 영향을 최소화할 수 있다.

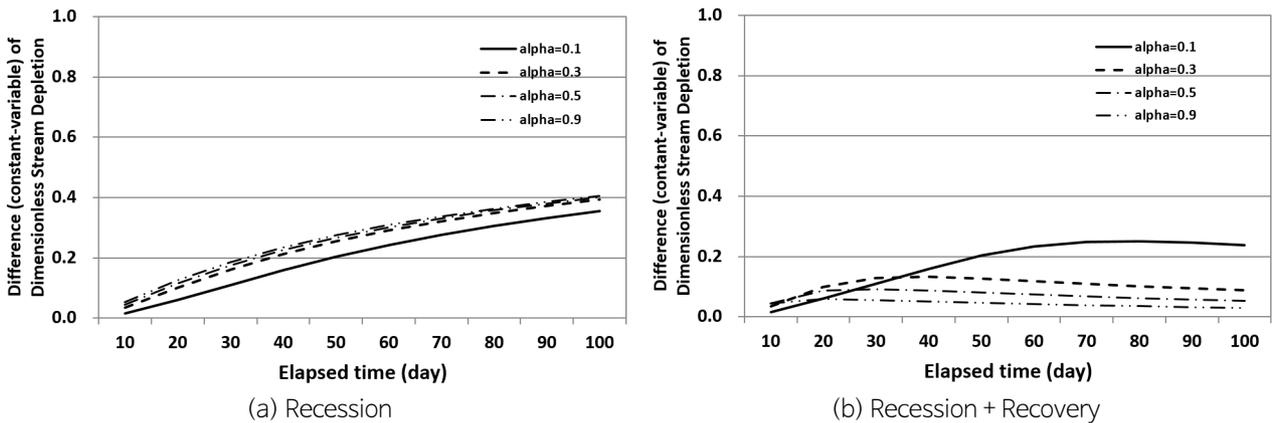


Fig. 7. Difference of dimensionless stream depletion between constant and variable stages.

결론

본 연구에서는 지하수 양수와 하천수위 변동에 따른 하천수 감소량을 산정할 수 있는 Baalousha(2015) 해석해를 이용하여 하천수위가 지수함수적으로 감소하는 경우와 일정 기간까지 감소 후 다시 원래 수위로 회복하는 경우 지하수 양수에 따른 하천수 감소량의 시간적 변화를 분석하였다. 대수층 및 하상의 수리특성 조건으로 투수량계수 $10 \sim 100 \text{ m}^2/\text{d}$, 저류계수 $0.05 \sim 0.3$, 하천-관정 이격거리 $100 \sim 500 \text{ m}$, 하상수리전도성 $0.01 \sim 20 \text{ m/d}$, 하천수위 감수상수 $0.1 \sim 1.0 \text{ d}^{-1}$ 범위에 대해 양수량 대비 하천수 감소량을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 하천-관정 이격거리의 제곱을 수리확산도로 나눈 하천고갈인자(SDF)에 따라 양수 90일 평균 하천수 감소량을 도출한 결과 하천수위가 감소 영향으로 하천수위 변동을 고려하지 않은 경우에 비해 하천수 기여도가 대폭 감소하여 지하수 양수량의 대부분이 대수층에서 공급되는 것으로 나타났다. 하천수위 변동이 없는 경우에는 SDF에 따른 하천수 감소량이 양수정 위치와 대수층의 수리상수 값에 민감하게 반응하지만 하천수위가 감소하는 경우에는 SDF 크기의 영향을 적게 받으며 특히 감수상수가 커짐에 따라 SDF값 영향이 더욱 줄어들는 것으로 분석되었다.
- (2) 하천수위가 일정기간까지는 강하하고 그 이후 다시 상승하는 경우에 대해 양수 90일 평균 하천수 감소량을 산정한 결과 하천수위 강하만 있는 경우에 비해 SDF값의 영향을 더 받으며 하천수위 변화가 없는 경우와도 차이가 크게

줄어는 것으로 분석되었다. SDF가 200보다 작고 감수상수가 0.1인 경우 하천수 기여도는 하천수위 변화가 없을 때의 약 50%, 감수상수가 0.5인 경우는 약 90% 만큼 발생하여 감수상수가 증가함에 따라 하천수위 변화의 영향이 줄어드는 것으로 분석되었다.

- (3) 하천고갈인자가 $SDF \leq 100$ 일, 하상수리전도성이 $\lambda \geq 5 \text{ m/d}$ 으로 하천과 대수층간의 수리적 연결성이 큰 조건에 대해 하천수 기여도를 산정한 결과 하천수위가 감수상수 $\alpha \geq 0.5$ 로 하강하는 경우 하천수위 변화가 없을 때에 비해 양수기간 1~3개월 동안 평균적으로 약 0.18~0.38만큼 줄어드는 것으로 분석되었다. 반면에 하천수위가 감소 후 다시 회복하는 경우에는 0.1 미만으로 매우 작은 차이를 보였으며, 이는 하천수위 회복을 통해 지하수 양수 시 대수층 저류량에 미치는 영향을 최소화할 수 있음을 의미한다.

결론적으로 대수층과 하천의 수리특성을 고려한 지하수 양수 모의 결과로부터 하천수위 조절을 통해 지하수 양수 시 하천수 및 대수층 저류량에 미치는 상대적 영향을 통제할 수 있음을 알 수 있다. 하천수와 연계한 하천 인근 지하수의 효율적 이용, 관리를 위해서는 지하수 개발·이용 위치별로 하천수 기여도 평가가 수반되어야 할 것이다.

사사

본 연구는 환경부 한강홍수통제소의 ‘하천 인근 지하수 영향평가기술 시범적용 및 개선 연구’ 과제의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Baalousha, H.M., 2012, Drawdown and stream depletion induced by a nearby pumping well, *Journal of Hydrology*, 466-467(1), 47-59.
- Baalousha, H.M., 2015, Aquifer drawdown and variable-stage stream depletion induced by a nearby pumping well, *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*, 6(4), 1-6.
- Bredehoeft, J.D., Papadopulus, S.S., Cooper Jr., H.H., 1982, *Groundwater: The water-budget myth*, Scientific Basis of Water-Resource Management, National Research Academy Press, 51-57.
- Glover, R.E., 1960, Groundwater surface water relationship, Paper Presented at Groundwater Section of Western Resources Conference, Colorado State University, Boulder, Colo.
- Glover, R.E., Balmer, G.G., 1954, River depletion from pumping a well near a river, *American Geophysical Union Transactions*, 35(3), 468-470.
- Ha, K., Koh, D.-C., Yum, B.-W., Lee, K.-K., 2008, Estimation of river stage effect on groundwater level, discharge, and bank storage and its field application, *Geosciences Journal*, 12(2), 191-204.
- Hall, F.R., Moench, A.F., 1972, Application of the convolution equation to stream-aquifer relationships, *Water Resources Research*, 8(2), 487-493.
- Hantush, M.S., 1965, Wells near streams with semipervious beds, *Journal of Geophysical Research*, 70(12), 2829-2838.
- Hunt, B., 1999, Unsteady stream depletion from ground water pumping, *Ground Water*, 37(1), 98-102.
- Jenkins, C.T., 1968, Computation of rate and volume of stream depletion by wells, *Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*, Book 4, Chapter D1.
- Kim, G.B., 2010, Application of analytical solution for stream depletion due to groundwater pumping in Gapcheon watershed, South Korea, *Hydrological Processes*, 24(24), 3535-3546.

- Lee, J., Chung, I.-M., Kim, N.W., 2019, Evaluation of long-term stream depletion due to cyclic groundwater pumping using analytical model, *Journal of Korea Water Resources Association*, 52(7), 483-492 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Chung, I.M., Kim, N.W., Lee, M.H., 2016, Evaluation of effects of groundwater pumping near stream using analytical model, *Journal of the Korea Society of Civil Engineering*, 36(4B), 617-625 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Kim, N.W., Chung, I.-M., Hong, S.H., 2018, Evaluation of stream depletion due to nearby groundwater pumping using Baalousha analytical solution, *Journal of Korea Water Resources Association*, 51(2), 99-107 (in Korean with English abstract).
- Theis, C.V., 1941, The effect of a well on the flow of a nearby stream, *Transactions of the American Geophysical Union*, 22(3), 734-738.
- Theis, C.V., Conover, C.S., 1963, Chart for determination of the percentage of pumped water being diverted from a stream or drain, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1545-C, C106-C109.
- Zlotnik, V.A., Huang, H., 1999, Effect of shallow penetration and streambed sediments on aquifer response to stream stage fluctuations (analytical model), *Ground Water*, 37(4), 599-605.