

누수대수층 지하수 양수에 따른 하천수 감소율 거동 분석

이정우* · 정일문** · 김남원***

Lee, Jeongwoo* · Chung, Il-Moon** · Kim, Nam Won***

Analysis of Stream Depletion Rate by Groundwater Abstraction in Leaky Aquifer

ABSTRACT

This study was to evaluate the stream depletion rate from groundwater pumping with varying stream-well distance, aquifer transmissivity, storage coefficient, leakage coefficient, streambed hydraulic conductance using the Zlotnik and Tartakovsky analytical solution which considers a two-layer leaky aquifer-stream-well system. For the hydraulic conditions applied in this study, the streambed hydraulic conductance and the aquitard leakage coefficient were assessed to have a dominant influence on the stream depletion rate. In order to evaluate the applicability of Zlotnik and Tartakovsky analytical solution ignoring the change in the drawdown in the lower aquifer and applying the fixed head boundary condition, the solution was compared with Hunt analytical solution derived from the more practical conditions simultaneously taking into account the drawdown changes in the upper and lower aquifers. As a result, the Zlotnik and Tartakovsky analytical solution is suitable for predicting short-term effects of less than one year in the pumping period, and when the stream depletion factor (SDF) is greater than 2,500 days, or when the product of the leakage coefficient and the stream-well distance is less than 10 cm/s.

Key words : Stream depletion rate, Groundwater pumping, Leaky aquifer, Zlotnik and Tartakovsky's analytical solution, Hunt's analytical solution

초 록

누수대수층-하천-양수정 경계치 문제에 관한 Zlotnik and Tartakovsky 해석해를 이용하여 하천-관정 이격거리, 대수층의 투수량계수 및 저류 계수, 누수층의 누수계수, 하상의 수리전도성 값의 다양한 조합에 대해 지하수 양수로 인한 하천수 감소율을 산정하고 그 변동 특성을 분석하였다. 본 연구에서 적용한 수리조건에 대해서는 하상수리전도성과 반대수층 누수계수가 하천수 감소율 크기에 지배적인 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 하부대수층의 수위변화를 무시하고 고정수두 경계조건을 부여한 Zlotnik and Tartakovsky 해석해의 적용성을 평가하기 위해서 상하부 대수층의 수위변화를 동시에 고려한 보다 실제적인 조건에 대해 유도된 Hunt 해석해와 비교하였다. 그 결과 Zlotnik and Tartakovsky 해석해는 양수기간 1년 이하의 단기간 영향을 예측하는데 적절하며, 하천고갈지수가 2,500일 보다 크거나 누수계수와 하천-관정 이격거리의 곱이 10cm/s 미만인 경우에 적용하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다.

검색어 : 하천수 감소율, 지하수 양수, 누수대수층, Zlotnik and Tartakovsky 해석해, Hunt 해석해

* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil engineering and building Technology · [ljw2961@kict.re.kr](mailto:lhw2961@kict.re.kr))

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소, 연구위원

(Korea Institute of Civil engineering and building Technology · imchung@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소, 선임연구위원 (Korea Institute of Civil engineering and building Technology · nwkim@kict.re.kr)

Received November 9, 2017/ revised November 14, 2017/ accepted November 15, 2017

1. 서론

최근 전 세계적으로 하천 주변의 지하수 이용량이 많아짐에 따라 양수에 의해 줄어드는 하천수 손실량에 대한 정확한 예측이 중요한 연구주제로 대두되고 있다. 지하수 양수에 의해 감소되는 하천수량을 예측하기 위해서는 실제 수리지질학적인 조건을 모형화하여 가용한 매개변수의 정확한 추정을 기반으로 한 수치모델링을 수행하거나 간단한 해석적 모형을 이용할 수 있다. 하천수 감소를 모의하는데 있어서 시간적, 비용적 측면에서는 후자의 방법이 효과적이다.

하천수 감소의 시간적 거동을 모의할 수 있는 고전적인 해석적 모형으로 Theis (1941), Hantush (1965), Jenkins (1968) 등을 들 수 있다. 이들 해석해는 하천과 양수정이 단일 대수층을 완전관통한 경우에 대해 유도되었는데, 이러한 조건이 실제 환경에서는 드물게 존재한다. 따라서 보다 현실적인 해석적 모형을 개발하는 연구가 진행되어 하천이 대수층을 얇게 관통한 조건에 대한 해석해 (Hunt, 1999; Zlotnik and Huang, 1999; Butler et al., 2001), 반피압 대수층(Hunt, 2003) 및 유한폭을 가진 하천과 대수층에 관한 해석해(Hunt, 2008), 유한 대수층폭에 관한 해석해(Butler et al., 2001) 등이 개발되었다.

양수량의 일부는 하천수의 손실량일 수 있고 나머지 부분은 더 깊은 대수층으로부터 반대수층(aquitard)을 거쳐 공급될 수 있다. 하천 인근 누수대수층으로부터 양수가 진행되는 경우 이와 같은 현상이 일어난다는 것이 규명된 바 있다(Hantush, 1964; Zlotnik, 2004, Butler et al., 2007). 특히 Zlotnik and Tartakovsky (2008)는 양수시 하부 대수층은 수두강하가 발생하지 않는다는 가정하에 2층 누수대수층(leaky two-aquifer)계에서 이와 같은 현상을 구현하는 해석해를 개발했다. 이 해석해는 하천-상부대수층의 연결성과 상부대수층-하부공급원(source bed)의 연결성에 따라 양수량 중에서 하천수 감소량에 기여하는 비율인 하천수 감소율(stream depletion rate, SDR)을 결정할 수 있다. 이와 같은 해석해는 Hunt (2003) 해석해에서 공급원의 저류계수가 무한히 큰 경우에 해당하여 양수에 따른 공급원내의 수두강하가 일어나지 않는 경우에 해당한다(Christensen et al., 2009). Hunt (2009)는 2층 누수대수층내에 위치한 하천인근의 상부대수층 양수에 의한 하천수 감소율을 결정하기 위해 상부와 하부의 지하수위 변화를 동시에 고려한 해석해를 제시한 바 있다. Ward and Lough (2011)는 Hunt (2009)와 유사한 방법으로 누수대수층-하천-양수정 시스템에 관한 해석해를 유도하여 하부대수층 양수로 인한 하천수 감소율을 산정하는 식을 제시하였다.

하천수 감소율의 추정을 위해서는 하상의 수리전도도와 대수층의 층별 투수계수와 저류계수의 정보가 필요하다. 이 중에서 하상의

수리전도도는 대수층과 하천의 연결도를 결정하는 변수로서 하천수 감소율을 산정함에 있어 중요한 영향인자이다. 또한 하천수 감소율을 결정하는데 있어서 하천과 대수층이 동일한 층적층에 존재한다는 단순한 조건이 아니라 상하부 대수층이 연결된 누수대수층의 조건을 고려하여 보다 실제적인 대수층 구조를 반영해야 한다(Zlotnik, 2004). 따라서 하천과 대수층간의 수리적 연결성과 누수대수층의 수리적 조건에 따른 하천수 감소율 거동 분석이 필요하다. 이에 Lee et al. (2016a)은 Hunt (2009)의 해석해를 이용하여 대수층 및 하상의 다양한 수리특성 조건에 따른 지하수 양수 영향을 정량적으로 분석하였고, 충주시에 위치한 임의 지하수 관정에 대해 하천수 감소량의 시간적 거동 특성을 분석한 바 있다. Lee et al. (2016b)은 Ward and Lough (2011)의 해석해를 이용하여 깊은 대수층 양수로 인한 하천수 감소 양상을 분석하였다.

본 연구에서는 상부와 하부 대수층의 수위변화를 함께 고려한 Hunt (2009)방법에 비해 보다 더 간단한 방법인 Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해를 이용하여 상부대수층과 하부의 공급원 사이에 반대수층(aquitard)이 위치하는 구조에서 양수에 따른 하천수 감소율을 산정하기 위한 수치실험을 수행하고 그 거동 특성과 적용성을 평가하였다.

2. 이론적 배경 및 분석 방법

2.1 Zlotnik and Tartakovsky 해석해

Zlotnik and Tartakovsky (2008)는 Fig. 1과 같이 하천(stream)-대수층(aquifer)-반대수층(aquitard) 시스템에 대해 하천에서 l 만큼 떨어진 거리에서 지하수 양수 Q 로 인한 지하수위 강하량과 하천수 감소량을 계산하는 해석해를 유도하였다.

해석해 유도를 위해서 수평방향(x)으로 무한한 대수층은 등방, 균질하고, 종방향(y)으로 무한한 하천의 횡단면 크기는 대수층 두께에 비해 무시할 정도로 작으며, Dupuit 근사가 유효하도록 지하수위 강하량이 대수층 두께에 비해 작다고 가정하였다. 또한 대수층은 비압축성 반대수층을 사이에 두고 수두가 H 로 일정한

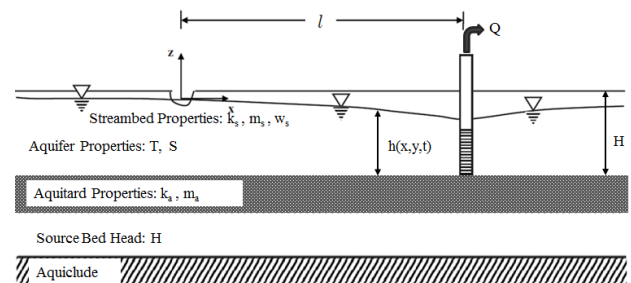


Fig. 1. Definition Sketch for Stream-Aquifer-Aquitard System (Zlotnik and Tartakovsky, 2008)

하부 공급원(source bed)과 수리적으로 연결되었으며, 대수층과 공급층간의 교환량은 두 층의 수두차이에 비례한다. 하상퇴적층(streambed)을 통과하는 하천과 대수층간의 침윤흐름(seepage flow) 역시 수두차이에 비례하며, 이 때 하천수위는 일정하다고 가정하였다. 이와 같은 가정하에 지하수 흐름은 Eq. (1)과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$T\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) = S\frac{\partial h}{\partial t} + Q\delta(x-l)\delta(y) - \lambda(H-h)\delta(x) - \frac{k_a}{m_a}(H-h) \quad (1)$$

여기서, T 는 투수량계수, S 는 저류계수, h 는 지하수두, Q 는 양수량, δ 는 Dirac delta 함수, l 은 하천과 양수정간 거리, λ 는 하상수리전도성(streambed hydraulic conductance)으로 하상수리전도도(streambed hydraulic conductivity) k_s 와 하폭 w 의 곱을 하천바닥층 두께 m_s 으로 나눈 값이며, k_a 는 반대수층의 수리전도도, m_a 는 반대수층 두께이다. 초기 및 경계조건은 Eqs. (2) and (3)과 같다.

$$h(x, y, 0) = H \quad (2)$$

$$\lim_{\sqrt{(x^2+y^2)} \rightarrow \infty} h(x, y, t) = H \quad (3)$$

양수로 인한 하천수 감소량 q 는 하천이 위치한 $x=0$ 에서의 지하수위 강하량을 하천길이 y 방향으로 적분하고 여기에 하상수리전도성 λ 를 곱해 Eq. (4)와 같다.

$$q = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} [H-h(0, y, t)] dy = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} [\phi(0, y, t)] dy \quad (4)$$

여기서, $\phi(x, y, t)$ 는 수위강하량이다.

Zlotnik and Tartakovsky (2008)는 Eq. (5)와 같은 무차원 변수를 사용하여 지배방정식 Eq. (1)을 무차원화하고, 이를 Laplace-Fourier 변환을 통해 상미분 방정식 형태로 나타내어 해를 구하였다. 그리고 다시 Laplace-Fourier 역변환 과정을 통해 Eq. (6)과 같이 수위강하량 $\phi(x, y, t)$ 에 대한 해를 유도하였다.

$$(\phi_d, x_d, y_d, t_d, B_d^2, \lambda_d) = \left(\frac{\phi T}{Q}, \frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{Tt}{Sl^2}, \frac{m_a T}{k_a l^2}, \frac{\lambda l}{T} \right) \quad (5)$$

$$\phi(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r_d}{B_d}\right) - \frac{Q}{4\pi T} \int_0^\infty e^{-\theta} W\left(u_\lambda, \frac{r_\lambda}{B_d}\right) d\theta \quad (6)$$

여기서, W 는 우물함수(well function), $u = r_d^2/(4t_d)$, $u_\lambda = r_\lambda^2/(4t_d)$, $r_\lambda = \sqrt{(1+|x_d|+2\theta/r_d)^2 + y_d^2}$ 이다.

하천수 감소량에 관한 해석해를 유도하기 위해서 먼저 Eq. (5)를 이용하여 Eq. (4)를 무차원화하고 이를 Laplace 변환시키고, 여기에 무차원 수위강하량 ϕ_d 의 Laplace-Fourier 변환치를 대입하여 하천수 감소량의 Laplace image를 얻는다. 다시 Laplace 역변환 과정을 통해 최종적으로 Eq. (7)과 같은 양수량 대비 하천수 감소량(이하 하천수 감소율)에 관한 해석해를 유도하였다.

$$\begin{aligned} \frac{q}{Q} &= \frac{a_1}{2} e^{-1/B_d} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{t_d}} - \frac{\sqrt{t_d}}{B_d}\right) \\ &- \frac{a_2}{2} e^{-1/B_d} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{t_d}} + \frac{\sqrt{t_d}}{B_d}\right) \\ &+ a_1 a_2 e^{\lambda_d/2 + \lambda_d^2 t_d/4 - t_d/B_d^2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{t_d}} + \frac{\lambda_d \sqrt{t_d}}{2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, a_1 과 a_2 는 Eq. (8)과 같다.

$$a_1 = \frac{B_d}{2/\lambda_d + B_d}, \quad a_2 = \frac{B_d}{2/\lambda_d - B_d} \quad (8)$$

2.2 분석 방법

대수층 및 하상의 수리특성치 등 입력 변수의 다양한 조합에 따라 Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해로 하천수 감소율을 계산하고 그 특성을 분석하였다. 투수량계수 T 는 1, 10, 100m²/d, 저류계수 S 는 0.1, 0.2, 0.3, 하상수리전도성 λ 는 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-5} m/s, 1층과 2층 사이의 누수계수 $k_v = k_a/m_a$ 는 1.0×10^{-10} , 1.0×10^{-9} , 1.0×10^{-8} 1/s, 그리고 하천과 관정간의 이격거리 l 은 100, 300, 500m로 하여 총 3⁵=243가지 경우에 대해 모의를 수행하였다.

Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해는 누수층 하부의 지하수두가 변하지 않는 고정수두 경계조건에 대해 유도된 것으로 2층 하부 대수층의 지하수두 변화를 함께 고려하여 유도한 Hunt (2009) 해석해에 비해 단순화된 조건에 대해 유도된 것이다. 따라서 본 연구에서는 두 해석해의 적용 결과를 상대 비교하여 Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해의 적용성을 검토하였다. Hunt (2009) 해석해 적용을 위해서 앞선 입력 변수 조건에 2층 투수량계수 $T_2 = 1, 10, 100$ m²/d, 2층 저류계수 $S_2=0.01, 0.001, 0.0001$ 의

조건을 추가하여 총 $3^7=2,187$ 가지 경우에 대한 하천수 감소율을 모의하였다. Hunt (2009) 해석해의 특징은 Lee et al. (2016)의 논문을 참조할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대수층과 하천 수리특성에 따른 하천수 감소율 산정

Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해를 이용하여 대수층의 투수량계수, 저류계수, 누수계수, 하천의 하상수리전도성, 하천-관정 이격거리 등 2.2절에서 제시한 대수층 및 하상의 수리특성치 조합에 따른 하천수 감소율을 산정하였다. 각 조건별로 양수 5년 경과 후 하천수 감소율을 산정하고, 그 결과를 하천고갈인자 SDF (Stream Depletion Factor, $S l^2 / T$), 하상수리전도성(λ), 누수계수(k_a/m_a) 등에 따라 Fig. 2에 나타내었다. SDF가 증가함에 따라

하천수 감소율이 줄어드는 양상을 보이고 있다. SDF가 크다는 것은 투수량계수를 저류계수로 나눈 수리확산계수가 작거나 하천과 관정간의 이격거리가 긴 것을 의미하는 것으로 이로 인해 양수 영향이 하천에 도달하는 시간적 지체가 커서 하천수 감소율이 작게 발생한다. Fig. 2(a)에서 Fig. 2(c)에서 보이는 바와 같이 하천과 대수층간의 연결통로인 하천바닥층의 수리전도성의 크기에 따라 하천수 감소율의 변화가 큰 것을 알 수 있다. Fig. 2(a)에서와 같이 하상수리전도성이 큰 경우($\lambda = 1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$) 최대와 최소치의 변동폭이 80%으로 매우 컸으나, Figs. 2(b) and (c)로 하상수리전도성이 $\lambda = 1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $\lambda = 1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 로 줄어들어 따라 변동폭이 각각 52%와 15%로 크게 감소하였다. 누수계수 k_a/m_a 가 증가함에 따라 하천수 감소율이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 이는 하부 대수층 공급원으로부터 상부대수층으로의 지하수 유입량 증가에 따른 것이다. 누수계수가 10배씩 작아짐에

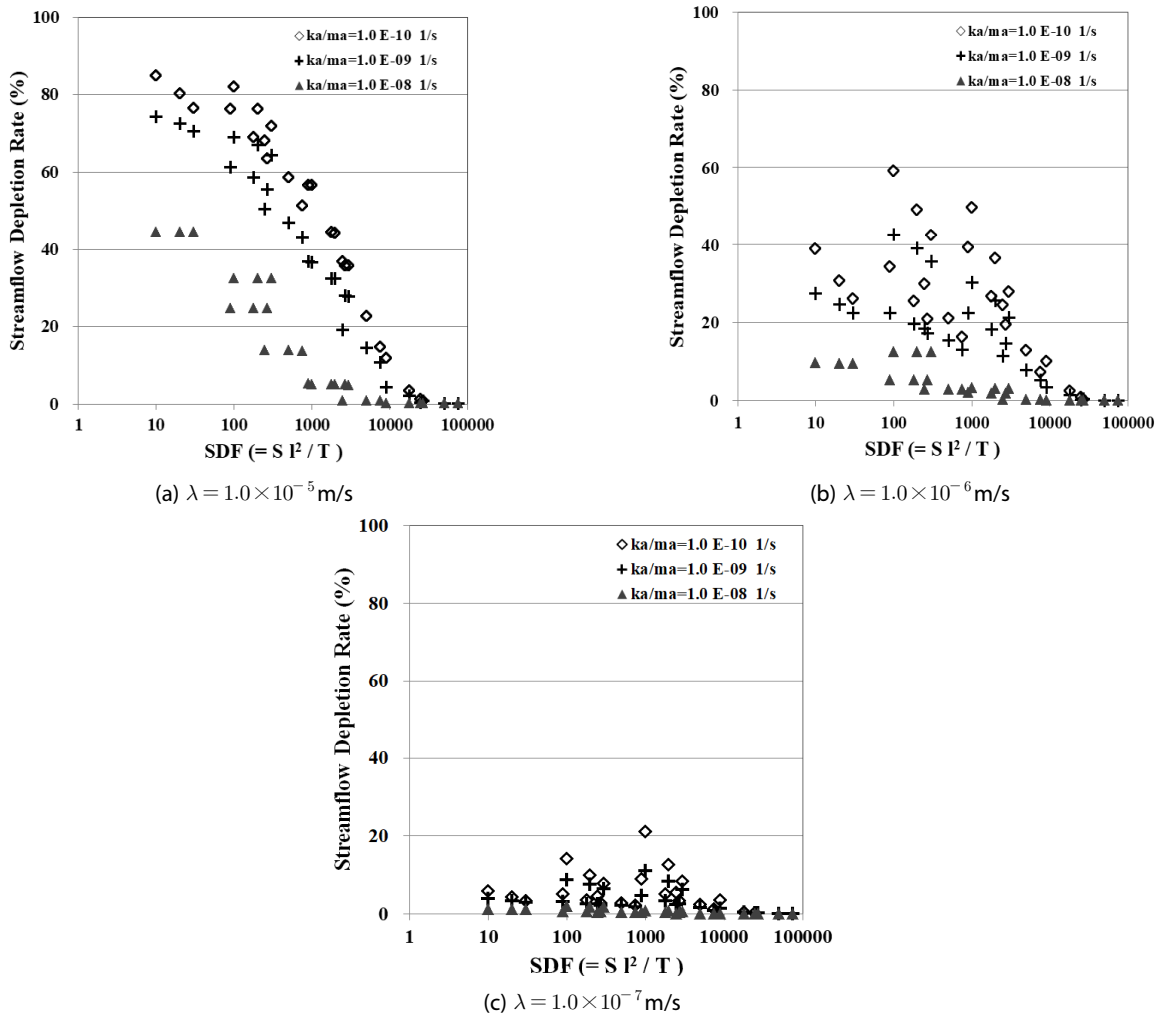


Fig. 2. Streamflow Depletion Rates According to Stream Depletion Factor (SDF), Streambed Hydraulic Conductance (λ), and Leakance (k_a/m_a) After 5-Year Pumping

따라 하천수 감소율이 증가하고 있으나 그 증가분은 누수계수에 선형적이지 않고 점차 둔화되어 증가하고 있다. Figs. 2(b) and (c)의 경우에는 누수계수값이 작을수록 하상수리전도성이 큰 Fig. 2(a)에 비해 하천수 감소율이 보다 산포되어 나타나고 있다. 이는 하상수리전도성과 누수계수가 작은 경우 다른 인자들이 영향을 크게 미쳐 하천수 감소율의 변동폭이 증가한 것을 의미한다. 또한 누수계수가 $k_a/m_a = 1.0 \times 10^{-8} \text{ l/s}$ 인 경우 동일한 하천수 감소율 값에 대해 3개의 SDF 값이 존재하는 것처럼 나타났는데 이는 반대수층의 누수계수가 큰 경우 SDF 값 보다는 다른 영향인자가 하천수 감소율에 지배적인 영향을 미치는 것으로 보인다.

3.2 Zlotnik and Tartavsky (2008) 해석해와 Hunt 해석해 (2009) 적용 결과의 비교

2.2절에 제시한 대수층 및 하천 조건에 대해 하부 경계조건으로 초기수두값으로 고정수두값을 부여한 Zlotnik and Tartakovsky

(2008) 해석해(이하 Z-T 해석해)와 상하부 대수층의 수위를 연립하여 동시에 계산하는 Hunt (2009) 해석해(이하 H 해석해)의 적용 결과를 비교하였다. Fig. 3은 Z-T 해석해와 H 해석해로 산정한 양수 1년 및 5년 후의 하천수 감소율을 1:1로 도시한 것으로 Z-T 해석해가 상대적으로 과소 산정된 경우가 많은 것을 알 수 있다. 이는 하부 대수층의 경계조건을 고정값으로 가정하나 변동값으로 고려하느냐의 차이에서 기인한 것으로 Z-T 해석해가 하부 공급원으로부터의 지하수 유입으로 인해 하천수 감소량이 항상 줄어들게 모의된 반면에 H 해석해는 상하부 대수층 및 누수층의 조건에 따라 상부에서 하부로 또는 하부에서 상부로의 지하수 유동을 모의하기에 하부 대수층이 항상 공급원이 되는 것은 아니기 때문이며, 공급원이 된 경우라 할지라도 하부대수층의 수위저하량이 함께 고려되기 때문에 누수층을 통과하는 유동량에도 Z-T 해석해 적용 결과와 차이가 발생한다. 즉, 저류계수가 큰 경우와 같이 하부 대수층의 수위 변화를 무시할 수 있는 경우에는 두 해석해가 유사한 결과를 도출하기에 상대적으로 간단한 Z-T 해석해를 이용할 수 있지만, 하부 대수층의 수위변화가 큰 경우에는 Z-T 해석해 보다는 H 해석해를 이용해야 한다. 양수 5년 후에 대한 결과인 Fig. 3(b)이 양수 1년 후에 대한 결과인 Fig. 3(a)보다 더 큰 차이를 보이고 있어 양수 기간이 길어질수록 두 해석해간의 편차가 증가함을 알 수 있다. 양수 1년 후의 경우 H 해석해가 Z-T 해석해에 비해 평균값이 약 2% 크게 산정되었고, 양수 5년 후에는 약 7% 만큼 크게 산정되었으며, 최대 편차가 60%를 넘는 경우도 발생하였다.

Fig. 4는 Table 1에 나타낸 대수층과 하천 조건 2가지의 경우에 대해 두 해석해로 산정한 하천수 감소율을 비교한 예시이다. Fig. 4(a)와 같이 Case 1 조건에서는 Z-T 해석해 적용 결과는 양수 4년 경과 후에는 거의 정상상태에 도달하고 있으나, H 해석해 적용 결과는 하천수 감소율이 시간에 따라 지속적으로 증가하고 있다. 양수기간이 증가함에 따라 두 해석해 결과의 차이가 증가하고 있어 이와 같은 조건에서는 하부 대수층의 수위저하 영향을 무시할 수 없음을 보여주고 있다. 반면에 Fig. 4(b)와 같이 Case 2의 경우에는 하부 대수층의 저류계수가 커서 하부 대수층의 수위저하량이 작기 때문에 두 해석해간의 차이가 작게 나타났다.

H 해석해는 하부대수층의 수위변화도 함께 고려하기 때문에 보다 실제적인 방법이고 정확한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, Laplace 역변환이나 수치적분 과정을 거쳐야 하기 때문에 계산 과정이 복잡하고, 해석해 적용을 위해 하부 대수층의 투수량계수와 저류계수 등 추가적인 입력자료가 필요하다. 반면에 Z-T 해석해는 이와 같은 과정이 필요 없고 상대적으로 입력자료도 간단하기 때문에 사용하기에 편리하지만 Fig. 3과 Fig. 4에서와 같이 대수층 및 하천의 조건에 따라 하부 대수층의 수위 변화 영향을 무시할

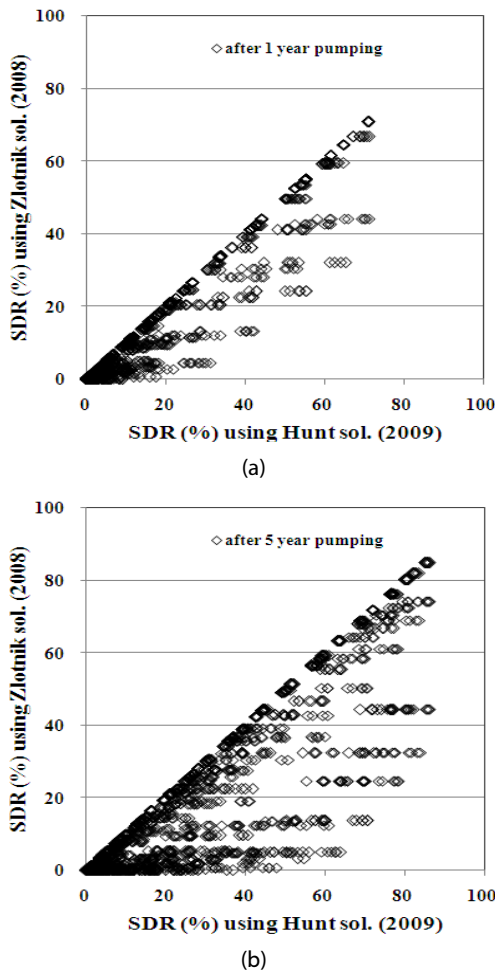
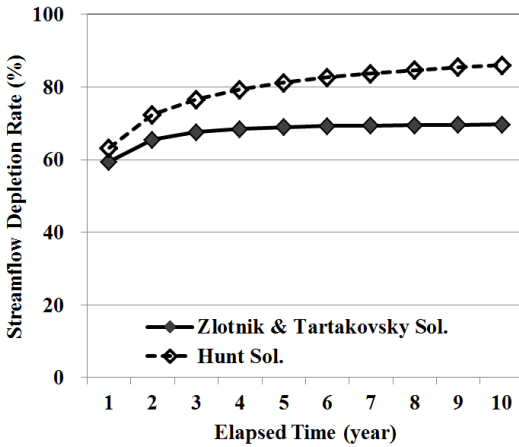
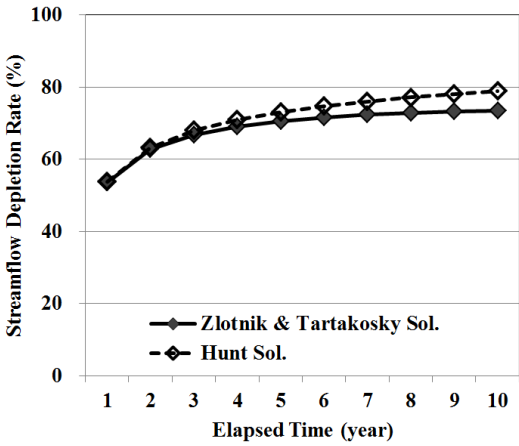


Fig. 3. Comparison of Streamflow Depletion Rates Calculated using Zlotnik and Tartakovsky (2008) and Hunt (2009) Solutions after 1-year (a) and 5-year (b) Groundwater Pumping



(a) Case 1



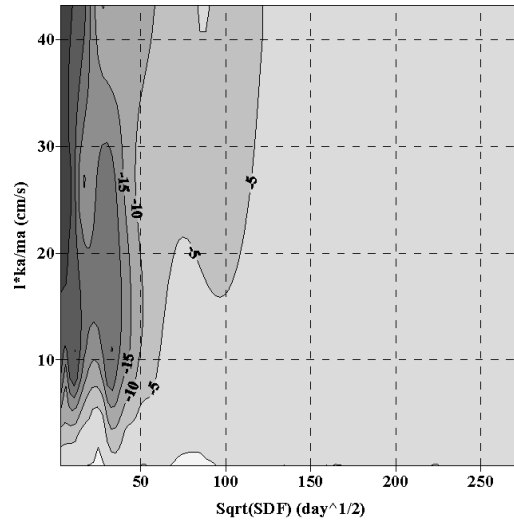
(b) Case 2

Fig. 4. Comparison of Streamflow Depletion Rates Calculated using Zlotnik and Tartakovsky (2008) and Hunt (2009) Solutions for Example Two Conditions

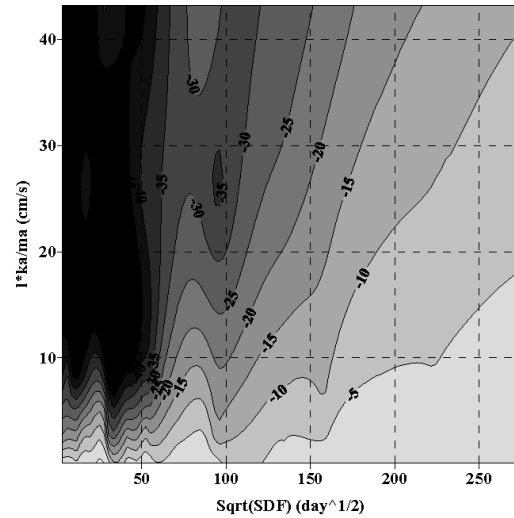
Table 1. Hydraulic Properties for Example Cases

Cases	l (m)	T_1 (m ² /d)	S_1 (m ² /d)	λ (m/s)	k_a/m_a (1/s)	T_2 (m ² /d)	S_2 (m ² /d)
1	100	10	0.1	10^{-5}	10^{-9}	10	0.001
2	100	100	0.3	10^{-5}	10^{-9}	100	0.1

수 없는 경우가 존재하기 때문에 H 해석해에 준하는 정확성을 담보하기 위해서는 제한적인 조건에서 사용되어야 한다. Fig. 5는 Z-T 해석해로 산정한 양수 1년 및 5년 후 하천수 감소율에서 H 해석해로 산정한 결과를 감한 값을 누수계수와 하천관정 이격거리를 곱한 값과 하천고갈인자의 제곱근에 따라 도시한 것이다. H 해석해 적용 결과를 참값으로 간주하면, Z-T 해석해는 Fig. 5(a)와 같이 양수 1년 후의 경우 $\sqrt{(SDF)}$ 가 50일 보다 크면 즉, SDF 가 2,500일 보다 크면 오차를 10% 이내로 줄일 수 있고



(a) 1 Year



(b) 5 Year

Fig. 5. Differences of Streamflow Depletion Rates between Zlotnik and Tartakovsky (2008) and Hunt (2009) Solutions after 1-year (a) and 5-year (b) Groundwater Pumping

lk_a/m_a 가 10cm/s 미만이면 SDF 가 매우 작더라도 Hunt (2009) 해석해와의 차이를 줄일 수 있다. Fig. 5(b)는 양수 5년 후 오차를 나타낸 것으로 우하단 영역과 같이 $\sqrt{(SDF)}$ 가 크고 lk_a/m_a 가 작아짐에 따라 오차가 줄어들고 있으나, 오차가 큰 범위가 지배적으로 차지하고 있어 장기간 양수 영향을 분석하는데에는 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 Z-T 해석해를 사용할 때에는 Fig. 5와 같이 하천고갈인자와 누수계수값의 적정 범위를 고려해야 하며, 급속적 1년 이하의 단기간 양수영향 예측만에 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 누수대수층-하천-양수정 경계치 문제에 관한 Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해를 이용하여 하천-관정 이격거리, 대수층의 투수량계수 및 저류계수, 누수층의 누수계수, 하상의 수리전도성 등을 변화시켜가면서 양수로 인한 하천수 감소율을 산정하고 그 거동 특성을 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 하상수리전도성이 $\lambda = 1.0 \times 10^{-5}$ m/s인 경우에 하천수 감소율의 변화폭이 80%으로 매우 크게 나타났고, 이 값이 $\lambda = 1.0 \times 10^{-6}$ m/s, $\lambda = 1.0 \times 10^{-7}$ m/s로 줄어들어 따라 변동폭이 각각 52%와 15%로 크게 감소하여 Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해에서는 하상수리전도성이 하천수 감소율을 산정하는데 있어서 지배적인 인자로 작용하였다.
- (2) 반대수층의 누수계수가 커짐에 따라 하부 대수층 공급원으로부터 상부대수층으로의 지하수 유입량 증가하여 하천수 감소율이 줄어드는 양상이 명확하게 나타나는 등 누수계수 역시 하천수 감소율에 미치는 영향이 큰 것으로 평가되었으며, 누수계수 변화에 따른 하천수 감소율의 변화는 선형성이 크지 않은 것으로 분석되었다.
- (3) 하부 대수층의 수위변화를 고려하지 않은 Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해와 상하부 대수층의 수위변화를 함께 고려한 Hunt (2009) 해석해를 주어진 조건에 각각 적용하여 비교한 결과 전자가 양수 1년 후에는 평균적으로 약 2%, 5년 후에는 약 7% 만큼 작게 산정되었고 양수 기간이 길어짐에 따라 두 해석해간의 편차가 증가하여 최대 60%를 넘는 차이를 나타내는 경우도 발생하였다.
- (4) Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해로 산정한 하천수 감소율이 보다 실제적인 조건에 대한 해석해인 Hunt (2009) 해석해에 준하는 정확성을 담보하기 위한 입력 조건의 적정 범위를 제시하였다. 본 연구에서 적용한 조건에 대해서 전자가 양수 1년 후에는 하천고갈인자가 2,500일보다 크거나 누수계수와 하천-관정 이격거리를 곱한 값이 10cm/s 미만인 조건이 적절한 범위인 것으로 분석되었다.
- (5) Zlotnik and Tartakovsky (2008) 해석해는 복잡한 수치적분과 수치변환과정을 거치지 않고 하부 대수층 수리특성인자 값을 필요로 하지 않기에 지하수 양수로 인한 하천수 감소율을 예측하는데 간편하고 유용한 방법이다. 하지만, 하부 대수층의 수위변화를 고려하지 않기 때문에 수위변화가 큰 지역이나 장기간 양수 영향 분석에는 한계가 있으며 1년 이하의 단기간 영향 분석에 활용하는 것이 바람직하다.

감사의글

본 연구는 국토교통부 한강홍수통제소 “하천수 영향을 고려한 하천변 지하수 관리방안 연구” 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Butler Jr., J. J., Zhan, X. and Zlotnik, V. A. (2007). “Pumping-induced drawdown and stream depletion in a leaky aquifer system.” *Ground Water*, Vol. 45, No. 2, pp. 178-186.
- Butler Jr., J. J., 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.
- Christensen, S., Zlotnik, V.A., Tartakovsky, D.M. (2009). “Optimal design of pumping tests in leaky aquifers for stream depletion analysis.” *Journal of Hydrology*, Vol. 375, No. 3, pp. 554-565.
- Hantush, M. S. (1964). *Hydraulics of wells*. In: Chow, V. (Ed.), *Advances in Hydroscience*, Vol. 1. Academic Press, New York, pp. 281-432.
- Hantush, M. S. (1965). “Wells near streams with semipervious 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, No. 1, pp. 98-102.
- Hunt, B. (2003). “Unsteady stream depletion when pumping from semiconfined aquifer.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 13-19.
- Hunt, B. (2008). “Stream depletion for streams and aquifers with finite widths.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 80-89.
- Hunt, B. (2009). “Stream depletion in a two-layer leaky aquifer system.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 895-903.
- Jenkins, C. T. (1968). “Techniques for computing rate and volume of stream depletion by wells.” *Ground Water*, Vol. 6, No. 2, pp. 37-46.
- Lee, J., Chung, I. M., Kim, N. W. and Hong, S. H. (2016a). “Evaluation of stream depletion from groundwater pumping in shallow aquifer using the hunt’s analytical solution.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 49, No. 11, pp. 923-930 (in Korean).
- Lee, J., Chung, I. M. and Kim, N. W. (2016b). “Evaluation of stream depletion from groundwater pumping in deep aquifer using an analytical model.” *Journal of the Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 36, No. 5B, pp. 769-777 (in Korean).
- Theis, C. V. (1941). “The effect of a well on the flow of a nearby stream.” *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 22, No. 3, pp. 734-738.
- Ward, N. D. and Lough, H. (2011). “Stream depletion from pumping a semiconfined aquifer in a two-layer leaky aquifer system.”

Journal of Hydrological Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 955-959.
Zlotnik, V. A. (2004). "A concept of maximum stream depletion rate for leaky aquifers in alluvial valleys." *Water Resources Research*, Vol. 40, W06507. doi:10.1029/2003WR002932.
Zlotnik, V. A. and Huang, H. (1999). "Effect of shallow penetration and streambed sediments on aquifer response to stream stage

fluctuations (analytical model)." *Ground Water*, Vol. 37, No. 4, pp. 599-605.
Zlotnik, V. A. and Tartakovsky, D. M. (2008). "Stream depletion by groundwater pumping in leaky aquifers." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 43-50.