



## Evaluation of stream depletion from groundwater pumping in shallow aquifer using the Hunt's analytical solution

Lee, Jeongwoo<sup>a\*</sup> · Chung, Il Moon<sup>a</sup> · Kim, Nam Won<sup>a</sup> · Hong, Sung Hoon<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Dept. of Hydrological Science & Engineering, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

<sup>b</sup>Han River Flood Control Office

Paper number: 16-073

Received: 23 August 2016; Revised: 22 September 2016; Accepted: 22 September 2016

### Abstract

This study was to evaluate the stream depletion from groundwater pumping in shallow aquifer using the Hunt's analytical solution (2009) which considers a two-layer leaky aquifer-stream system. From the total 2,187 cases of simulations with combinations of various aquifer and stream properties, the streamflow depletion rates divided by the groundwater pumping rate showed the low values when the stream depletion factor (SDF) is higher than 1,000-10,000, and was more sensitive to the aquitard hydraulic conductivity than the streambed hydraulic conductivity. The comparison of the Hunt's solution (2009) with the Hunt's solution (1999) of a single layer aquifer indicated that the maximum difference between the dimensionless stream depletions calculated by using both solutions is above 0.3, and the stream depletion is significantly affected by the hydraulic properties of the 2<sup>nd</sup> layer as the SDF of the first layer increases. The Hunt's solution (2009) was applied to the real shallow groundwater well that is located in Chunju-Si, and the results revealed that the groundwater pumping has significant effects on streamflow in a short period of time, showing that the dimensionless stream depletion exceeds 0.8 within a few days. It was also found that the shallow groundwater pumping effects on stream depletion are highly dependent on the stream-well distance for the locations with high hydraulic diffusivity of 1<sup>st</sup> layer and low vertical leakage between 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> layers.

**Keywords:** Stream depletion, Groundwater pumping, Hunt's analytical solution, Two-layer leaky aquifer

## Hunt 해석해를 이용한 천부대수층 지하수 양수로 인한 하천수 감소 영향 분석

이정우<sup>a\*</sup> · 정일문<sup>a</sup> · 김남원<sup>a</sup> · 홍성훈<sup>b</sup>

<sup>a</sup>한국건설기술연구원 수자원-하천연구소, <sup>b</sup>한강홍수통제소 수자원정보센터

### 요 지

본 연구에서는 2층 누수대수층-하천 시스템에 관한 Hunt (2009)의 해석해를 이용하여 천부대수층 지하수 양수가 하천수량에 미치는 영향을 분석하였다. 대수층 및 하상의 수리특성 조건에 따라 총 2,187 가지 경우의 수에 대해서 양수량 대비 하천수 감소량을 산정한 결과 하천고갈인자가 1,000-10,000 보다 큰 경우에 비교적 작은 값을 나타내었으며, 하천바닥층 수리전도도보다는 1, 2층간 반대수층의 수리전도도 크기에 상대적으로 민감한 반응을 보였다. 또한, Hunt (1999)의 해석해로 산정한 하천수 감소비에 비해 최대 0.3을 넘는 차이가 발생하는 등 1층의 하천고갈인자가 큰 경우에는 2층의 수리특성치에 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 실제로 충주시에 위치한 임의의 천부지하수 관정에 적용하여 양수 경과시간에 따른 하천수 감소비를 산정한 결과 수일 내로 0.8을 초과하여 하천수에 미치는 영향이 단기간에 크게 발생하였으며, 또한 누수계수가 작고 천부대수층의 수리확산계수가 큰 지역에서는 하천-관정 이격거리가 하천수 감소량 크기를 결정하는데 지배적인 인자인 것으로 분석되었다.

**핵심용어:** 하천수 감소량, 지하수 양수, Hunt 해석해, 2층 누수대수층

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0529  
E-mail: ljw2961@kict.re.kr (J. Lee)

### 1. 서론

지하수 양수로 인해 하천으로의 지하수 유출량이 줄어들거나 하천수가 역으로 지하수계로 유입되면 하천유량의 감소를 초래하게 되는데, 이러한 현상을 ‘streamflow depletion’, 또는 ‘stream depletion’ 이라 하고 있으며 국내에서는 하천유량 또는 하천수 감소, 고갈로 명명되고 있다. 이러한 하천수 감소 정도를 정량적으로 예측, 평가하기 위해서는 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 실제 현장에서 직접 계측하거나 (Hunt et al., 2001; Kim et al., 2012a), 지하수 유동해석 모델링 (Sophocleous, 1995; Nyholm et al., 2003; Zume and Tarhule, 2008) 또는 지표수-지하수 통합모델링(Kim et al., 2012b, c; Lee et al., 2013)을 통해 간접적으로 산정해야 하며, 대수층-하천-양수정 시스템을 단순화한 조건에서 유도된 해석해 (Theis, 1941; Glover and Balmer, 1954; Hantush, 1965; Hunt, 1999; Butler et al., 2001)를 활용할 수도 있다.

시간적, 비용적으로 장점이 있는 해석해는 Theis (1941)가 하천이 균질의 대수층을 완전 관통한 조건에 대해 양수량 대비 하천수 감소량 계산식을 최초로 개발한 이래로 저투수성의 하천바닥층 수리특성 고려(Hantush, 1965; Hunt, 1999), 하폭 또는 대수층 폭 고려(Butler et al., 2001; Hunt, 2008), 반피압 대수층(semi-confined aquifer) 조건(Hunt, 2003), 2층 누수 대수층(leaky aquifer) 조건(Buttler et al., 2007; Zlotnik and Tartakovsky, 2008; Hunt, 2009; Ward and Lough, 2011), 3층 누수대수층(Ward and Falle, 2013) 조건 등 점차 실제 조건에 가깝고 복잡한 형태로 개발되어 오고 있다.

해석해를 이용하여 하천수에 미치는 지하수 양수 영향을 분석한 국내 연구로는 Kim (2010)이 균질의 무한대수층에 관한 Hunt (1999)의 해석해를 갑천유역에 적용하여 하천수 감소율의 시간적 변화를 분석하였고, Lee et al. (2016b)이 역시 Hunt (1999) 해석해를 실제로 하천 인근에 위치한 지하수 관정에 적용하여 양수로 인한 지하수위 강하 및 하천수 감소량을 산정하고 대수층의 수리상수, 하천과 관정간의 이격거리, 하천바닥층의 하상수리전도도 등의 크기에 따른 그 변동 특성을 고찰하였다. 또한 Lee et al. (2016a)는 누수대수층-하천-양수정 시스템 및 심부대수층 양수 조건에 대해 유도된 Ward and Lough (2011)의 해석해를 Lee et al. (2016b)의 분석 대상과 동일한 관정에 적용하여 하천수에 미치는 암반층 지하수 양수의 영향을 분석하였다. 이처럼 국내에서는 해석해를 이용하여 지하수 양수 영향을 분석한 연구가 드물게 수행되었으며, 해석해 적용의 간편함과 용이함에도 불구하고 국내에서는 잘 알려져 있지 않은 관계로 실무에 널리 활용되고 있지 못

하고 있는 실정이다. 특히 대용량 집중정이 하천 주변 층적층에서 주로 개발되고 있는 점을 고려할 때 2층 누수대수층-하천 시스템에 대해 천부대수층 양수 영향을 정량적으로 산정할 수 있는 Hunt (2009)의 해석해는 지하수 양수로 인한 하천수 감소 정도를 예측할 때 저비용의 분석 도구로 유용하게 활용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 천부대수층 지하수 양수량 대비 하천수 감소량을 산정할 수 있는 Hunt (2009)의 해석해를 소개하고, 이 해석해를 이용하여 대수층 및 하상의 다양한 수리특성 조건에 따른 지하수 양수 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 또한 실제로 충주시에 위치한 임의 지하수 관정에 대해 하천수 감소량의 시간적 거동 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

### 2. 이론적 배경 및 분석 방법

#### 2.1 Hunt (2009) 해석해

Hunt (2009)는 Fig. 1과 같이 상, 하부 두 개의 대수층 사이에 반대수층(aquitard)이 있는 누수대수층-하천-양수정 시스템에 대해 상부 1층 양수로 인한 지하수위 강하량과 하천수 감소량을 계산하는 해석해를 유도하였다.

지배방정식은 Eqs. (1), (2)와 같이 1, 2층의 지하수위 강하량을 미지수로 하고, 지하수 양수의 소멸항, 하천수 유입의 생성항, 그리고 층간 상호작용항을 가진 수평 2차원 연립 편미분 방정식이고, 경계 및 초기조건은 Eqs. (3), (4)와 같다.

$$T_1 \left( \frac{\partial^2 s_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s_1}{\partial y^2} \right) = S_1 \frac{\partial s_1}{\partial t} + \frac{K_v}{B} (s_1 - s_2) - Q \delta(x - L) \delta(y) + \lambda \delta(x - L) \tag{1}$$

$$T_2 \left( \frac{\partial^2 s_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s_2}{\partial y^2} \right) = S_2 \frac{\partial s_2}{\partial t} + \frac{K_v}{B} (s_2 - s_1) \tag{2}$$

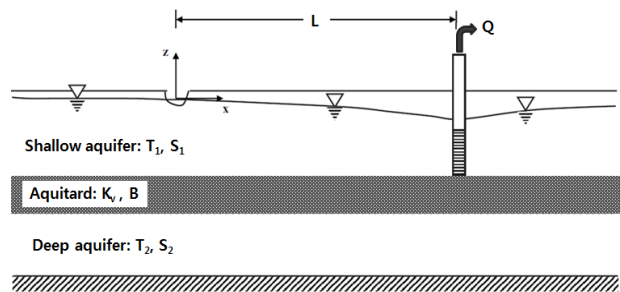


Fig. 1. Definition sketch for stream - 2 layer leaky system (Hunt, 2009)

여기서,  $T$ 는 투수량계수 [ $L^2T^{-1}$ ],  $S$ 는 저류계수,  $s$ 는 수위강하량 [ $L$ ], 아래첨자 1, 2는 각각 천부와 심부대수층을 나타내며,  $K_v$ 는 반대수층의 수리전도도 [ $LT^{-1}$ ],  $B$ 는 반대수층 두께 [ $L$ ],  $Q$ 는 양수량 [ $L^3T^{-1}$ ],  $\delta$ 는 Dirac delta 함수,  $L$ 은 하천과 양수정간 거리 [ $L$ ], 그리고,  $\lambda$ 는 하상수리전도성(streambed hydraulic conductance)으로 하상수리전도도(streambed hydraulic conductivity)  $K_s$ 와 하폭  $W$ 의 곱을 하천바닥층 두께  $M$ 으로 나눈 값 [ $LT^{-1}$ ]이다.

$$\lim_{\sqrt{(x^2+y^2)} \rightarrow \infty} s_1(x,y,t) = \lim_{\sqrt{(x^2+y^2)} \rightarrow \infty} s_2(x,y,t) = 0 \quad (3)$$

$$s_1(x,y,0) = s_2(x,y,0) = 0 \quad (4)$$

양수로 인한 하천수 감소량  $\Delta Q$ 는 하천이 위치한  $x=0$ 에서의 1층 지하수위 강하량을 하천길이  $y$  방향으로 적분하고 여기에 하상수리전도성  $\lambda$ 를 곱해 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta Q(t) = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} s_1(0, y, t) dy \quad (5)$$

Hunt (2009)는 지배방정식 Eqs. (1)과 (2)를 Eq. (6)으로 표현된 무차원 변수를 사용하여 무차원 편미분 방정식으로 나타내고, 다시 Laplace-Fourier 변환을 통해 연립 상미분 방정식으로 변형한 후 해석해를 유도하였다.

$$(s_1^*, s_2^*, x^*, y^*, t^*, T^*, S^*, K^*, \lambda^*, Q^*) = \left( \frac{s_1 T_1}{Q}, \frac{s_2 T_1}{Q}, \frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{t T_1}{S_1 L^2}, \frac{T_2}{T_1}, \frac{S_2}{S_1}, \frac{(K_v/B)L^2}{T_1}, \frac{\lambda L}{T_1}, \frac{\Delta Q}{Q} \right) \quad (6)$$

Eq. (7)은 이러한 과정을 통해 유도된 무차원 하천수 감소량  $\Delta Q^*$ 의 Laplace 변환치를 나타낸 것이며, 이의 Laplace 역변환 과정을 통해 무차원 하천수 감소량  $\Delta Q^*$ , 즉 양수량( $Q$ ) 대비 하천수 감소량( $\Delta Q$ )를 산정할 수 있다.

$$\Delta \bar{Q}^*(p) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\lambda^* \exp(-\sqrt{\gamma_1}) \sqrt{\gamma_2}/l_1^2 + \exp(-\sqrt{\gamma_2}) \sqrt{\gamma_1}/l_2^2}{p (\sqrt{\gamma_2 + \lambda^*/l_2^2}) \sqrt{\gamma_1} + (\sqrt{\gamma_1 + \lambda^*/l_1^2}) \sqrt{\gamma_2}} \quad (7)$$

여기서,  $p$ 와  $\alpha$ 는 각각 Laplace 및 Fourier 변수이고,  $l_i$  및  $\gamma_i$  ( $i=1,2$ )는 Eq. (8)에서 Eq. (10)과 같다.

$$l_1^2 = 1 + T^* \left( \frac{b_{11} - \gamma_1}{b_{12}} \right)^2, l_2^2 = 1 + T^* \left( \frac{b_{11} - \gamma_2}{b_{12}} \right)^2 \quad (8)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{2} \left( b_{11} + \frac{b_{22}}{T^*} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( b_{11} + \frac{b_{22}}{T^*} \right)^2 + \frac{(b_{12}^2 - b_{11}b_{22})}{T^*}} \quad (9)$$

$$b_{11} = \alpha^2 + p + K^* \quad (10a)$$

$$b_{22} = T^* \alpha^2 + S^* p + K^* \quad (10b)$$

$$b_{12} = b_{21} = K^* \quad (10c)$$

이상과 같이 Hunt (2009)의 해석해 Eq. (7)을 이용하여 하천수 감소량을 산정하기 위해서는 1, 2층의 투수량계수 및 저류계수, 층간 반대수층의 수리전도도 및 두께, 하천바닥층의 수리전도도 및 두께 등의 수리상수값이 필요하며, 수치적인 Laplace 역변환 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 Eq. (8)을 계산하기 위한 일련의 과정을 전산프로그램화하였다.

### 2.2 분석 방법

대수층 및 하상의 수리특성치에 따른 하천수 감소 특성을 고찰하기 위해서 1층 투수량계수는 1, 10, 100 m<sup>2</sup>/d, 1층 저류계수는 0.01, 0.1, 0.2, 2층 투수량계수는 1, 10, 100 m<sup>2</sup>/d, 2층 저류계수는 0.01, 0.001, 0.0001, 하상수리전도도는 1.0×10<sup>-7</sup>, 1.0×10<sup>-5</sup>, 1.0×10<sup>-3</sup> m/s, 하폭 100 m, 하천바닥층 두께 1 m, 1, 2층 사이의 반대수층 연직수리전도는 1.0×10<sup>-9</sup>, 1.0×10<sup>-7</sup>, 1.0×10<sup>-5</sup> cm/s, 반대수층 두께 1 m, 하천과 관정간의 이격거리는 100, 300, 500 m의 총 3<sup>7</sup>=2,187 가지 경우의 수에 대해서 Hunt (2009)의 해석해로 양수량 대비 하천수 감소량(이하 하천수 감소비)을 산정하였다.

각각의 경우에 대해 양수기간 5년동안의 평균적인 하천수 감소비를 계산하고, 하천고갈인자 SDF (Stream Depletion Factor,  $S L^2 / T$ ), 하상 수리전도도, 층간 반대수층 수리전도도 등에 따른 변화 특성을 분석하였다. 여기서 SDF는 저류계수  $S$ 와 하천-관정 이격거리의 제곱  $L^2$ 를 곱한 값을 투수량계수  $T$ 로 나눈 것으로, Environment Canterbury (2000)에서는 이 값이 100보다 작은 경우에는 지하수 양수가 하천수량 감소에 미치는 영향이 크다고 평가하고 있다. 즉, 이 값이 작으면 이격 거리가 짧거나 수리확산도가 큰 것으로 양수에 대한 반응이 빠르게 발생하여 그 영향이 단기간에 하천에 도달하게 된다.

2층 구조에 대한 Hunt (2009) 해석해 적용 결과 분석 뿐만 아니라 단일 대수층 구조에 대한 Hunt (1999) 해석해도 함께 적용하여 상대 비교를 수행하였다. 또한 충주시에 실제로 위치한 임의 지하수 관정에 대해 Hunt (2009) 해석해를 적용하여 천부대수층 지하수 양수가 하천수량에 미치는 영향을 정량적으로 검토하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대수층 및 하천 수리특성에 따른 양수량 대비 하천수 감소량 산정

천부대수층(1층)과 심부대수층(2층)의 투수량계수 및 저류계수, 단위깊이당 하상수리전도도, 단위깊이당 반투수층 연직수리전도도 등 2.2절에서 제시한 하천변 및 하상의 수리특성치 조합에 따른 하천수 감소비를 Hunt (2009)의 해석해

로 산정하였다. 각 조건별로 양수기간 5년 동안 계산된 하천수 감소비를 평균하여 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2는 하천고갈인자 SDF 및 1층과 2층 사이 반대수층의 연직수리전도도  $K_v$ 에 따른 하천수 감소비를 도시한 것으로 SDF가 커질수록 즉, 수리확산계수가 작거나 하천-관정거리가 클수록 하천수 감소비가 줄어드는 양상을 보이고 있다. Fig. 2(a)와 같이  $K_v$ 가  $10^{-9}$ 와  $10^{-7}$  cm/s로 작을 때에는 하천수 감소비가 평균적으로 각각 0.49, 0.47로 산정되어 하천수 감소비간의 차이가 매우 작게 산정되었으며, SDF가 약 1,000을 넘어서면서부터는 하천수 감소비가 0.5 미만으로 양수영향이 하천수에 작게 미치고 있다. 반면에 Fig. 2(b)에와 같이  $K_v$ 가  $10^{-5}$  cm/s로 연직수리전도도가 큰 경우에는 1, 2층간 수리적 상호작용 영향으로  $K_v$ 가  $10^{-9}$  cm/s 일 때의 결과와 큰 차이를 나타내고 있다. 2층으로부터 1층으로의 지하수 공급이 우세한 지역은 Fig. 2(a)에 비해서 하천수 감소비가 작아지고, 후술하는 Fig. 5(b)와 같이 2층 수위저하의 영향으로 1층 수위

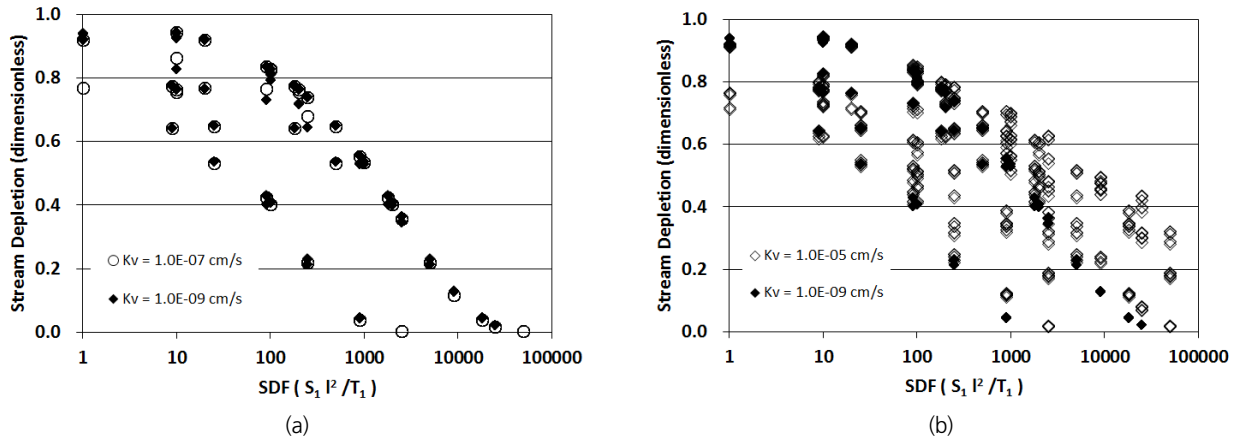


Fig. 2. Dimensionless stream depletion for 5-year pumping according to stream depletion factor and vertical hydraulic conductivity of aquitard

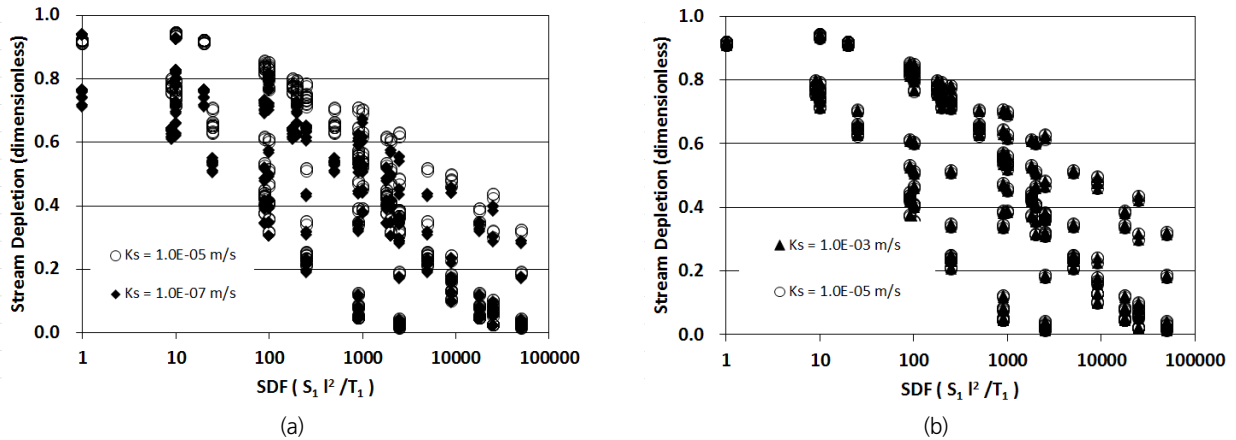


Fig. 3. Dimensionless stream depletion for 5-year pumping according to stream depletion factor and streambed hydraulic conductivity

저하의 공간적인 범위가 넓어진 경우에는 하천수 감소비가 오히려 증가하는 등 1, 2층의 수리적 조건에 따라 작거나 크게 산정되었으며, 평균적으로 하천수 감소비가  $K_v = 10^{-9}$  cm/s 일 때 0.49에서  $K_v = 10^{-5}$  cm/s 일 때 0.56로 약 15% 증가하였다. 전반적으로 SDF가 큰 범위에서 하천수 감소비가 증가한 양상을 보이고 있으며, SDF가 약 10,000 보다 큰 경우 하천수 감소비가 0.5 보다 작아 양수 영향이 작게 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 하천고갈인자 및 하천바닥층 연직수리전도도  $K_v$ 에 따른 하천수 감소비를 도시한 것이다. Fig. 3(a)와 같이 하천바닥층 연직수리전도도가  $10^{-7}$  및  $10^{-5}$  m/s일 때 하천수 감소비의 평균은 각각 0.47, 0.52로 계산되어 수리전도도가 100배 커짐에 따라 약 5% 증가하여 작은 차이를 나타내었다. 또한 Fig. 3(b)와 같이 하천바닥층 연직수리전도도가  $10^{-5}$  및  $10^{-3}$  m/s일 때의 결과에는 서로 거의 차이를 보이고 있지 않다. 따라서 하상수리전도도가 커짐에 따라 하천수 감소비는 증가하지만  $K_v = 10^{-5}$  m/s ( $\lambda = 10^{-3}$  m/s) 이상에서는 증가 정도가 거의 유사함을 알 수 있다. 즉, 하상수리전도성이 커질수록 하천수 감소량이 커지는 양상을 보이지만 어느 한계 이상에서는 그 증가 정도가 둔화됨을 의미한다.

### 3.2 복수 및 단일 대수층 조건에 대한 해석해 적용 결과 비교

Hunt (1999)는 균질의 단일 대수층에 대해 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 산정할 수 있는 해석해를 개발하였다 (Hunt, 1999; Lee et al., 2016b). 본 연구에서는 천부대수층 저면을 불투수층으로 간주하고 Hunt (1999) 해석해를 적용하여 하천수 감소량을 산정한 후, 3.1 절의 Hunt (2009) 해석해

적용 결과와 비교, 분석을 수행하였다. Fig. 4는 각각의 조건에 대해 Hunt (2009) 및 Hunt (1999)의 해석해로 산정한 5년 평균 하천수 감소비를 일대일로 도시한 것이다. 하천수 감소비가 0.4 보다 작은 범위에서는 Hunt (2009) 해석해 적용 결과가 Hunt (1999) 해석해에 비해 대부분 크게 산정되었으며, 전반적으로 하천수 감소비가 커짐에 따라 두 해석해 적용 결과의 차이가 줄어드는 양상을 보이고 있다.

Hunt (2009) 해석해로 산정한 하천수 감소비가 Hunt (1999) 해석해 적용 결과에 비해 크게 산정되는 경우가 많은데, 이의 원인을 파악하기 위해서 투수량계수  $T_1 = 10.0$  m<sup>2</sup>/d,  $T_2 = 10.0$  m<sup>2</sup>/d, 저류계수  $S_1 = 0.1$ ,  $S_2 = 0.01$ , 하천과 관정간 이격거리  $L = 300$  m, 하상수리전도성  $\lambda = 86.4$  m/d, 층간 누수계수  $K_v/B = 8.64 \times 10^{-3}$  1/d인 조건에 대해 두 해석해로 지하수위 강하량을 계산하고, Fig. 5(a), (b)와 같이 양수 1년 경과 후 지하수위 강하량의 공간분포도를 작성하였다. Fig. 5(a)는 Hunt (1999)의 해석해 적용 결과로서 관정 중심에서 지하수위가 최대 2.97 m 강하하였고, 영향반경은 600 m를 넘어서까지 미치는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 Hunt (2009)의 해석해로 산정한 1층의 지하수위 강하량 분포로서 관정 중심에서 수위강하량이 최대 1.78 m 발생하는 등 관정 주변에서는 2층에서 1층으로의 연직상향 지하수 유동으로 인해 수위저하가 Hunt (1999)의 해석해 적용 결과인 Fig. 5(a)에 비해 작게 발생하였다. 반면에 관정에서 멀어질수록 1층에서 2층으로의 연직하향의 흐름이 우세하여 양수 영향반경은 Hunt (2009) 해석해 적용 결과가 더 길게 나타났다. 특히 하천이 위치한  $x = 0$ 에서의 수위강하량이 Fig. 5(a)의 경우에 비해 크고 또한 하천길이 방향으로의 수위저하가 일어나는 종방향 영향 범위가 더 증가한 것을 알 수 있다. 즉, 양수의 영향을 받는 하천구간이 길어지고 그 수위강하량도 커져서 하천수 감소량이 크게 산정되었다 할 수 있다.

Fig. 6은 양수기간 5년 평균 하천수 감소비의 상대적 차이를 나타낸 것으로 Hunt (2009) 해석해에서 Hunt (1999) 해석해를 감한 값을 1층과 2층의 수리적 조건에 따라 도시한 것이다. Fig. 6(a)와 같이 층간 연직수리전도도가  $K_v = 1.0 \times 10^{-7}$  cm/s로 작은 경우에는 하천수 감소비의 차이가 0.05 미만으로 작으나,  $K_v = 1.0 \times 10^{-5}$  cm/s와 같이 층간 연결성이 비교적 큰 경우에는 1층의 하천고갈인자  $SDF_1$ 가 커지고 2층의 수리확산계수  $D_2 = T_2/S_2$ 가 커질수록 차이가 크게 발생하고 있다. 특히  $SDF_1 > 10^4$ ,  $D_2 > 10^5$ 인 경우 최대 0.3을 넘는 차이가 발생하는 등 Hunt (2009) 해석해 적용 결과가 더 크게 산정됨을 알 수 있다. 이와 같이 천부대수층 양수로 인한 하천수 감소량은 천부 및 심부대수층간의 수리적 상호관계에 따라 다양하

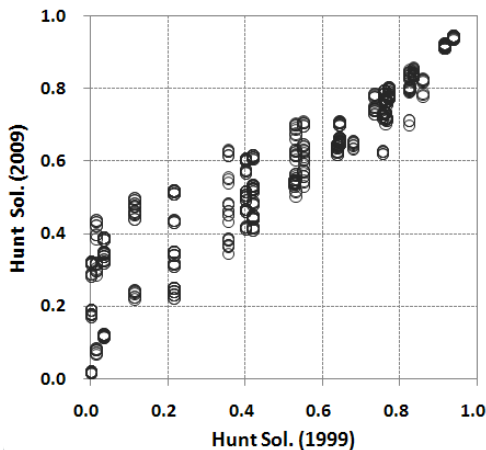


Fig. 4. comparison of dimensionless stream depletions for 5-year pumping estimated by Hunt(2009) and Hunt(1999) solutions

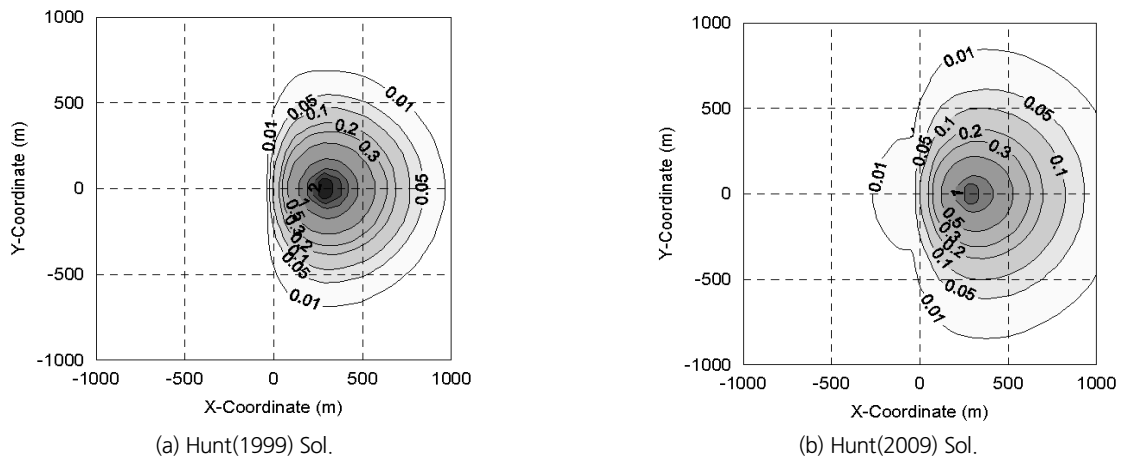


Fig. 5. Distribution of groundwater drawdown after 1-year pumping

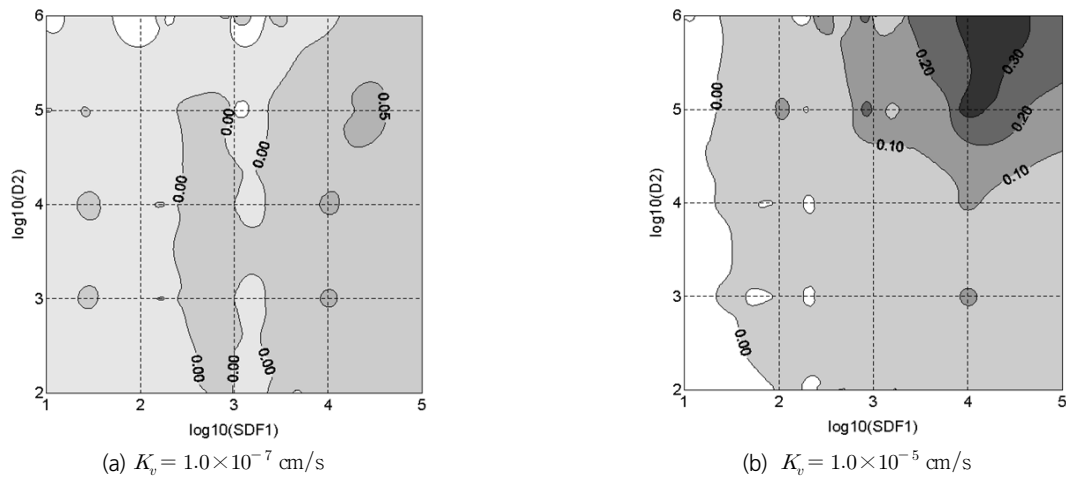


Fig. 6. Differences of dimensionless stream depletion for 5-year pumping between Hunt (2009) and Hunt(1999) solutions

게 나타나기 때문에 양수 영향을 정밀하게 예측, 평가하기 위해서는 총적층에 국한하던 기존의 대수성 시험을 심부대수층인 암반층까지 확대할 필요가 있다.

**3.3 Hunt (2009) 해석해의 실제 관정 적용**

본 연구에서 전산화한 Hunt (2009)의 해석해를 충주시 A 지역에 위치한 B관정에 적용하여 양수에 따른 하천수 감소 양상을 분석하였다. B관정은 농업용수 공급을 위해서 착정된 것으로 굴착심도 8 m, 굴착지름 300 mm, 취수계획량은 100 m<sup>3</sup>/d 이며, 관정에서 약 35 m 거리에 하천이 위치해 있다. 해석해 적용을 위해 필요한 천부대수층(총적층)과 심부대수층(암반층)의 수리전도도, 투수량계수, 저류계수 등은 Table 1과 같이 분석 대상 관정의 해당 지하수영향조사서에서 발췌하였다.

하상수리전도성 λ 값을 입력하기 위해서 하폭 W은 지도

Table 1. Hydraulic properties for study well

Layer	K (m/d)	T (m <sup>2</sup> /d)	S (m <sup>2</sup> /d)
1	1.458	9.8	0.00153
2	0.012	1.1	0.00155

상에서 도측하여 15 m를 사용하였고, 미측정 값인 단위깊이 당 하상수리전도도  $K_s/M$ 는 Lee et al. (2015)를 참고하여  $1.0 \times 10^{-5}$  1/s로 가정하였다. 관정 주상도에 따르면 총적층과 암반층 사이에 반대수층(aquitard)의 존재여부가 명확하지 않아 본 연구에서는 Eq. (11)과 같이 McDonald (1988)가 제시한 1층과 2층이 연결된 조건에 대한 누수계수 근사화 방법을 적용하여  $K_v/B$  을 산정하였다(Lee et al., 2016a).

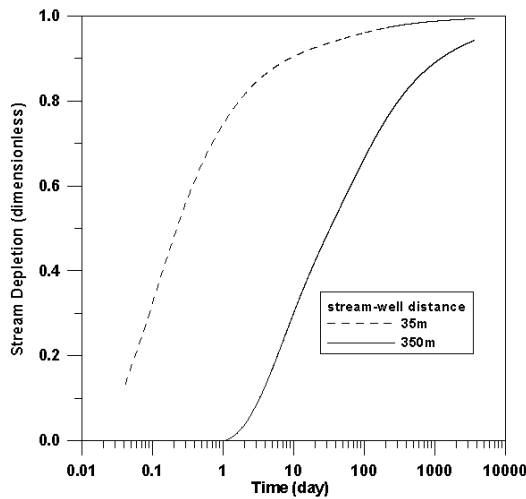


Fig. 7. Dimensionless stream depletions according to stream-well distances

$$K_v/B = 1/\left(\frac{B_1/2}{K_{v1}} + \frac{B_2/2}{K_{v2}}\right) \cong 1/\left(\frac{B_2/2}{K_{v2}}\right) \text{ for } K_{v1} \gg K_{v2} \quad (11)$$

여기서,  $B_1$  과  $B_2$  는 각각 1층과 2층의 대수층 두께이고,  $K_{v1}$  과  $K_{v2}$  는 각각 1층과 2층의 연직방향 수리전도도이며 본 연구에서는 이 값은 수평방향 수리전도도의 1/10로 가정하여 사용하였다.

Fig. 7은 지하수 양수량 대비 하천수 감소량인 하천수 감소비의 시간적 변화를 계산하여 나타낸 것으로 하천-관정 이격거리의 영향을 중점적으로 검토하기 이격거리를 10배 증가시킨 결과도 함께 도시하였다. 그림에서 점선과 실선은 각각 하천-관정 이격거리 35 m와 350 m일 때의 하천수 감소비로서 이격거리가 증가함에 따라 하천수 감소량의 증가 양상이 지연되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 이격거리가 35 m일 때에는 수 일내로 하천수 감소비가 0.8을 초과하여 하천수량에 미치는 지하수 양수의 영향이 단기간에 크게 발생하였으나, 이격거리가 350 m로 상대적으로 긴 경우에는 양수 초기에는 하천수에 미치는 영향이 작다가 양수 후 300일이 넘어서야 하천수 감소비가 0.8에 도달하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 분석 대상 관정과 같이 층간 누수계수가 작고 수리확산계수가 큰 천부대수층에서 양수를 할 경우에는 인근 하천에 미치는 영향이 크게 발생하며, 이러한 영향을 제어할 수 있는 지배적인 인자는 하천-관정 이격거리라 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 2층 누수대수층-하천 경계치 문제에 대한 Hunt (2009)의 해석해를 이용하여 대수층 및 하상의 수리특성 조건에 따른 천부 지하수 양수로 인한 하천수량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 하천-관정 이격거리, 1, 2층의 투수량계수 및 저류계수, 층간 반투수층 수리전도도, 하상수리전도도 등의 수리특성치를 조합한 총 2,187 가지 경우의 수에 대해서 양수량 대비 하천수 감소량을 산정한 결과 하천고갈인자가 1,000~10,000 보다 큰 경우에는 하천수량에 미치는 양수 영향이 비교적 작은 것으로 분석되었다. 또한 반대수층 연직수리전도도가  $10^{-5}$  cm/s일 때 하천수 감소비는  $10^{-9}$  cm/s일 때에 비해 평균적으로 0.49에서 0.56로 약 15% 증가하였으며, 1층의 하천고갈인자(SDF)가 커질수록 반대수층의 연직수리전도도의 영향을 크게 받는 것으로 분석되었다.
- 2) 하상수리전도도가 커짐에 따라 하천수 감소비는 다소 증가하는 양상을 보이지만, 그 값이  $10^{-5}$  m/s (하상수리전도성  $\lambda=10^{-3}$  1/s) 이상에서는 하천수 감소의 증가 정도가 둔화되는 양상을 보였다.
- 3) 층간 반대수층의 연직수리전도도가  $10^{-7}$  cm/s 이하인 경우에는 Hunt (2009)의 해석해로 산정한 하천수 감소비와 균질의 단일층에 대한 Hunt (1999)의 해석해 적용 결과의 차이가 0.05 미만으로 미미하였으나, 반대수층의 연직수리전도도가  $10^{-5}$  cm/s로 층간 연결성이 양호한 경우에는 1층의 하천고갈인자( $SDF_1$ )가  $10^4$  d 보다 크고 2층의 수리확산계수( $T_2/S_2$ )가  $10^5$  m<sup>2</sup>/d 보다 큰 경우 하천수 감소비가 최대 0.3의 차이가 발생하는 등 1층의 하천고갈인자가 커짐에 따라 2층의 수리특성에 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.
- 4) 충주시에 위치한 임의 지하수 관정에 대해서 Hunt (2009) 해석해로 천부대수층 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 산정한 결과 수일 내로 양수량 대비 하천수 감소율이 80%를 초과하여 하천에 미치는 영향이 단기간에 크게 발생하였다. 또한 하천-관정 이격거리에 따른 하천수 감소량의 시간적 변화가 매우 민감한 것으로 나타나 이격거리가 분석대상 관정과 같이 1층의 수리확산계수가 크고 누수계수가 작은 지역에서는 하천수에 미치는 영향을 제어할 수 있는 주요 인자임을 알 수 있었다.

## 감사의 글

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.
- Environment Canterbury (2000). *Guidelines for the assessment of groundwater abstraction effects on stream flow*.
- 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.
- Kim, G. B. (2010). “Application of analytical solution for stream depletion due to groundwater pumping in Gapcheon watershed, South Korea.” *Hydrological Processes*, Vol. 24, pp. 3535-3546.
- 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., Chung, I. M., and Kim, C. H. (2012a). “Change of groundwater-streamflow interaction according to groundwater abstraction in a green house land.” Vol. 45, No. 10, pp. 1051-1067.
- 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.
- Lee, J., Chun, S. G., Yi, M. J., Kim, N. W., Chung, I. M., and Lee, M. H. (2015). “Measurements of streambed hydraulic conductivity using drive-point piezometers and seepage meters in the upper reaches of anseong stream.” *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, No. 3, pp. 1-8.
- Lee, J., Chung, I.-M., and Kim, N. W. (2016a). “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.
- Lee, J., Chung, I. M., Kim, N. W., and Lee, M. H. (2016b). “Evaluation of effects of groundwater pumping near stream using analytical model.” *Journal of the Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 36, No. 4B, pp. 617-625.
- 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.
- 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., 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.
- 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.
- 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 Falle, S. (2013). “Simulation of a multilayer leaky aquifer with stream depletion.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 619-629.
- 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., and Tartakovsky, M. (2008). “Stream depletion by groundwater pumping in leaky aquifers.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 43-50.
- 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.