

## 천부와 심부지하수 양수에 따른 하천수 감소 영향의 비교분석

이정우\* · 정일문\*\*

Lee, Jeongwoo\*, Chung, Il-Moon\*\*

### Comparative Analysis of Shallow and Deep Groundwater Pumping Effects on Stream Depletion

#### ABSTRACT

In this study, Hunt's analytical solution and Ward & Lough's analytical solution for two-layered leaky aquifer system were used to estimate stream depletions due to shallow and deep groundwater pumping, and their differences were compared. Depending on the combination of the separation distance between the stream and the well, the transmissivity and the storage coefficient of the aquifer, and the leakage coefficient between the upper and lower layers, the stream depletion, which is the amount of stream water reduction compared to the amount of groundwater pumping, for each of 45,000 cases was calculated for both shallow and deep groundwater pumping, and the differences were analyzed quantitatively. When the leakage coefficient was very small, with a value of  $10^{-6}$  1/d, the difference in the average five-year stream depletion due to the pumping of shallow and deep groundwater showed a large deviation of up to 0.9 depending on the given hydraulic characteristics; this value exponentially decreased as the stream depletion factor (SDF) increased. This exponential relationship gradually weakened as the leakage coefficient increased due to interaction effects between layers, resulting in a small difference of up to 0.2 when the leakage coefficient reached  $10^{-3}$  1/d. Under the condition of greater interlayer hydraulic connectivity, there was little influence of the depth of groundwater pumping on the stream water reduction.

**Key words :** Hunt's analytical solution, Ward and Lough's analytical solution, Shallow groundwater pumping, Deep groundwater pumping, Stream depletion

#### 초 록

본 연구에서는 2층 누수대수층 시스템에 관한 Hunt 해석해와 Ward and Lough 해석해를 이용하여 천부지하수 양수 및 심부지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 산정하고 그 차이를 비교, 분석하였다. 하천과 관정간의 이격거리, 대수층의 투수량계수와 저류계수, 상부층과 하부층간의 누수계수의 조합에 따라 총 45,000가지 경우에 대해 지하수 양수량 대비 하천수 감소량인 하천수 감소비를 천부와 심부지하수 양수 각각에 대해 산정하고 그 차이를 정량적으로 분석하였다. 층간 누수계수가  $10^{-6}$  1/d로 매우 작은 경우 천부 및 심부지하수 양수로 인한 5년 평균 하천수 감소비의 차이는 수리특성조건에 따라 최대 0.9로 큰 편차를 보이고 천부대수층의 하천고갈인자(SDF)와 지수함수적 감소 관계가 지배적으로 나타났다. 이러한 하천수 감소비의 차이는 층간 누수계수가 증가함에 따라 층간 상호작용 영향으로 SDF 값과의 지수함수적 관계가 점차 둔화되고 누수계수가  $10^{-3}$  1/d이 되면 최대 0.2의 작은 차이가 발생하여 층간 수리적 연결성이 큰 조건에서는 하천수 감소에 미치는 지하수 양수 심도의 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

**검색어 :** Hunt 해석해, Ward & Lough 해석해, 천부지하수 양수, 심부지하수 양수, 하천수 감소량

\* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 연구위원

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

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 선임연구위원

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

Received April 28, 2020/ revised May 11, 2020/ accepted May 14, 2020

## 1. 서론

과도한 지하수 사용은 대수층 고갈뿐만 아니라 기저유량 감소에 따른 하천의 이수, 생태학적 기능 저하를 가져올 수 있기에 적절한 지하수 이용량 관리가 필요하다. 특히 하천 인근 지역은 하천수와 지하수의 상호 유동이 활발히 일어나는 곳으로 지하수 이용이 하천의 수량에 단기간에 영향을 미칠 수 있기에 이 지역에 대해서는 지하수 이용에 따른 하천수량 감소 평가 등 하천수와 지하수를 통합적으로 고려한 엄밀한 수자원 관리가 필요하다. 이러한 관리 차원에서 국내 지하수법 제7조의2에서는 하천 인근에서 지하수를 개발·이용할 경우 지하수 취수가 하천의 수량에 영향을 미치는 지를 사전에 검토하여 환경부장관(홍수통제소장 위임)과 허가 전에 협의하도록 명시되어 있다. 또한 하천수량에 영향을 미치는 것으로 인정되는 경우 취수량, 취수제한, 취수금지 등의 행정조치를 취할 수 있게 되어 있다.

따라서 이러한 제도적 장치가 실효성을 가지려면 지하수 이용에 따른 하천수량 영향 평가가 기술적으로 이뤄져야 한다. 그러나, 정량적인 영향 평가에 수반되는 비용, 시간, 기술적인 면에서 제약이 있기에 실무에서는 통상적으로 지하수 관정간의 간접 영향을 평가 하는데 활용되는 영향반경 산정 경험식을 하천수량 영향 검토에도 활용하고 있다. 영향반경 내에 하천이 포함되느냐 여부로 하천의 수량에 영향을 줄 가능성을 정성적으로 평가하고 있다. 이 외에 하천수와 지하수의 간 수질 비교, 지하수 개발 심도 등을 검토하여 지하수 영향을 평가하기도 한다. 특히 개발 심도 위주로 평가할 때 암반층과 같이 심부대수층에서 취수하는 경우 하천과 구조적으로 직접 연결되지 않았기 때문에 하천의 수량에 영향이 작을 것으로 예단하기도 한다. 이와 같이 지하수 취수에 따른 하천수에 미치는 영향 평가는 정량적이기 보다는 정성적인 방법에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 지하수 취수와 하천수량간의 정량적인 관계를 파악할 수 있는 실용적인 영향평가방법이 필요하다.

지하수 양수영향을 현지에서 장기간 직접 측정하는 것이 가장 정확하지만 비용이나 시간적 측면, 그리고 사유지 점용 등 현장 여건상 제약이 있고, 이를 대체하기 위해 하천과 지하수를 통합적으로 연계한 정밀한 수치모델링을 수행할 수 있으나, 이 또한 고난도의 전문성, 비용 등이 수반되어 현장에서 활용하기에 한계가 있다. 이의 대안으로 한강홍수통제소(HRFCO, 2018)에서는 여러 시험 유역에 대해 수많은 지하수 관정에 대해 지표수-지하수 통합모델링을 통해 지하수 이용에 따른 하천수 감소량을 모의하고 이를 통계적으로 재해석하여 하천수 감소량 산정 간편 경험공식을 개발하였다. 또한 하천-대수층-양수정 시스템을 개략화한 조건에서 유도된 Hunt(1999), Hunt(2009), Ward and Lough(2011) 등의 다양한 해석해들을 전산화(Lee et al., 2016a; Lee et al., 2016b; Lee

et al., 2016c)하고 이를 경험공식과 함께 하천수 관리시스템에 탑재하여 실무에 활용할 수 있게 하였다(Hong et al., 2019). 특히 해석해는 동적 수문조건과 수리적 비균질성을 고려하지 못하는 한계에도 불구하고 지하수 양수에 따른 하천수 감소량(streamflow depletion)을 하천-관정 이격거리, 대수층 및 하상의 수리특성인자 등 몇 가지 인자만을 이용하여 간편하게 산정할 수 있는 장점이 있어 매우 실용적이다. 해석해의 국내 적용 연구로 Kim(2010)은 Hunt(1999) 해석해를 이용하여 갑천 유역의 지하수 양수 영향을 분석하였고, Lee et al.(2016c)은 이 해석해로 하상과 대수층의 다양한 수리조건에 따른 하천수 감소량, 지하수위 저하량 등을 모의 분석하였다. Lee et al.(2016b)은 하천-천부대수층-심부대수층-천부지하수 양수 시스템에 대한 Hunt(2009) 해석해, 또한 Lee et al.(2016a)은 하천-천부대수층-심부대수층-심부지하수 양수 시스템에 대한 Ward and Lough(2011) 해석해를 이용하여 대수층의 다양한 투수성과 저류성, 하천-대수층간의 수리적 연결성, 그리고 천부와 심부대수층간의 수리적 연결성을 복합적으로 고려한 하천수 감소량의 거동 특성을 분석하였다.

일반적으로 지하수 개발 심도가 깊을수록 심부대수층(deep aquifer) 양수가 천부대수층(shallow aquifer) 양수에 비해 하천의 수량에 미치는 영향이 적은 것으로 인식되고 있다. 이는 하천 바닥 층적층과 같이 천부대수층을 일부 관통한 경우가 대부분이고 암반층까지 깊게 내려간 경우가 흔치 않으며, 암반층 상부가 투수성이 낮은 협재층으로 피압되어 층적층과 수리적으로 단절되었다고 가정하는 경우가 많기 때문이다. 또한 층적층과 암반층이 수리적으로 연결되었다 하더라도 층간 누수정도(leakance)나 각 층의 수리특성의 차이로 암반층 양수 영향이 시간적으로 지체되어 하천에 도달한다고 보기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 직관적 판단이 타당한지를 평가하기 위해서 천부 및 심부지하수 양수에 따른 하천수량 감소에 미치는 영향의 상대적 차이를 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 위해서 Hunt(2009) 해석해와 Ward and Lough(2011) 해석해를 각각 이용하여 천부 및 심부지하수 양수 영향을 모의하고 서로간의 차이를 분석하였다. 또한 하천과 관정간의 이격거리, 투수량계수와 저류계수의 대수층의 수리조건, 특히 상부층과 하부층간의 누수성에 따른 하천수 감소의 거동 특성을 고찰하였다.

## 2. 해석에 및 분석 방법

Hunt(2009)는 위, 아래 두 개의 대수층 사이에 반대수층(aquitard)이 있는 누수대수층-하천-양수정 시스템에 대해 상부층 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 계산하는 해석해를 Eq. (1)과 같이 개발하였다.

$$\Delta Q/Q = \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{\lambda^* \exp(-\sqrt{\gamma_1}) \sqrt{\gamma_2}/l_1^2 + \exp(-\sqrt{\gamma_2}) \sqrt{\gamma_1}/l_2^2}{p (\sqrt{\gamma_2 + \lambda^*/l_2^2}) \sqrt{\gamma_1} + (\sqrt{\gamma_1 + \lambda^*/l_1^2}) \sqrt{\gamma_2}} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\Delta Q$ 는 하천수 감소량,  $Q$ 는 양수량,  $\mathcal{L}^{-1}$ 는 라플라스 역변환, 그리고 기타 변수들은 Eqs. (2)~(5)와 같다.

$$\Delta = 2(\sqrt{\gamma_2 + \lambda^*/l_2^2}) \sqrt{\gamma_1} + 2(\sqrt{\gamma_1 + \lambda^*/l_1^2}) \sqrt{\gamma_2} \quad (2)$$

$$l_1^2 = 1 + T^* \left( \frac{b_{11} - \gamma_1}{b_{12}} \right)^2, \quad l_2^2 = 1 + T^* \left( \frac{b_{11} - \gamma_2}{b_{12}} \right)^2 \quad (3)$$

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

$$(T^*, S^*, K^*, \lambda^*) = \left( \frac{T_2}{T_1}, \frac{S_2}{S_1}, \frac{(K_v/B)L^2}{T_1}, \frac{\lambda L}{T_1} \right) \quad (5)$$

여기서,  $T_1$ 은 1층 투수량계수,  $T_2$ 는 2층 투수량계수,  $S_1$ 는 1층 저류계수,  $S_2$ 는 2층 저류계수,  $K_v$ 는 반대수층의 수리전도도,  $B$ 는 반대수층 두께,  $L$ 은 하천과 양수정간 거리, 그리고,  $\lambda$ 는 하상수리 전도성으로 하상수리전도도  $K_s$ 와 하폭  $W$ 의 곱을 하천바닥층 두께  $M$ 으로 나눈 값이다.

Ward and Lough(2011)는 위, 아래 두 개의 대수층 사이에 반대수층이 있는 누수대수층-하천-양수정 시스템에 대해 아래 2층 양수로 인한 하천수 감소량을 계산하는 해석해를 Eq. (6)과 같이 개발하였다.

$$\Delta Q/Q = \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{2\pi\lambda^* \left[ \left( \frac{\lambda^*}{l_2^2} + 2\sqrt{\gamma_2} \right) \beta_1 \exp(-\sqrt{\gamma_1}) - \frac{\lambda^* \beta_2}{l_2^2} \exp(-\sqrt{\gamma_2}) \right] + \frac{2\pi\lambda^*}{l_2^2 \Delta} \left[ \left( \frac{\lambda^*}{l_1^2} + 2\sqrt{\gamma_1} \right) \beta_2 \exp(-\sqrt{\gamma_2}) - \frac{\lambda^* \beta_1}{l_1^2} \exp(-\sqrt{\gamma_1}) \right]}{p} \right) \quad (6)$$

Eq. (6)에 사용된 변수들은 Eqs. (7)~(11)과 같다.

$$\Delta = 4\sqrt{\gamma_1 \gamma_2} + 2\lambda^* \left( \frac{\sqrt{\gamma_1}}{l_2^2} + \frac{\sqrt{\gamma_2}}{l_1^2} \right) \quad (7)$$

$$\beta_i = \frac{1}{2\pi p} \left( \frac{\gamma_i T^* - b_{11}}{b_{12}} \right), \quad l_i^2 = T^* + \left( \frac{\gamma_i T^* - b_{11}}{b_{12}} \right)^2 \quad (8)$$

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

$$b_{11} = T^* \alpha^2 + S^* p + K^*, \quad b_{12} = b_{21} = -K^*, \quad b_{22} = \alpha^2 + p + K^* \quad (10)$$

$$(T^*, S^*, K^*, \lambda^*) = \left( \frac{T_1}{T_2}, \frac{S_1}{S_2}, \frac{(K_v/B)L^2}{T_2}, \frac{\lambda L}{T_2} \right) \quad (11)$$

Eq. (11)에서 사용된  $T_1, T_2, S_1, S_2, K_v, B, L$  그리고,  $\lambda$ 는 Eq. (6)과 동일하다. Hunt(2009) 해석해 및 Ward and Lough(2011) 해석해에 관한 보다 자세한 사항은 각각 Lee et al.(2016b)와 Lee et al.(2016a)를 참조할 수 있다.

본 연구에서는 천부지하수 양수 모의실험은 Hunt(2009) 해석해를, 심부지하수 양수 모의실험은 Ward and Lough (2011) 해석해를 적용하여 다양한 수리조건에 대한 지하수 양수량 대비 하천수 감소량(하천수 감소비)( $\Delta Q/Q$ )을 산정하였다. 지하수 양수 모의조건으로  $T_1$ 과  $T_2$ 는  $10 \text{ m}^2/\text{d}$  간격으로  $10 \sim 100 \text{ m}^2/\text{d}$  각각 10가지,  $S_1$ 은 0.05 간격으로 0.05 ~ 0.3 까지 6가지,  $S_2$ 는 0.01, 0.001, 0.0001로 3가지, 1, 2층간 누수계수( $K_v/B$ )는  $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ 1/d}$  까지 10배 간격으로 5가지,  $\lambda$ 는  $10 \text{ m/d}$ ,  $L$ 은  $100 \text{ m}$  간격으로  $100 \sim 500 \text{ m}$ 의 5가지 경우를 조합하여 총 45,000 가지 조건에 대해 두 해석해로 하천수 감소비를 각각 산정하였다. 천부 및 심부 지하수 양수 영향은 일단위로 5년 간 모의하였고, 양수기간 1년 및 5년 동안의 평균적인 거동, 즉, 1년동안 일단위 하천수 감소비 및 5년 동안 일단위 하천수 감소비를 평균하였다. 천부와 심부지하수 양수에 따른 하천수 감소 정도를 비교하였으며, 특히 천부와 심부대수층간 수리적 연결성 척도인 누수계수 크기에 따른 변화 양상을 중심으로 고찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Figs. 1-5는 45,000가지 수리조건에 대하여 천부지하수와 심부 지하수를 각각 양수했을 때 하천수 감소비를 계산하고 그 결과를 종합하여 1:1로 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 1은 상부층과 하부층 간의 누수계수가  $K_v/B = 10^{-6} \text{ 1/d}$  일 때 양수기간 1년(Fig. 1(a)) 및 양수기간 5년(Fig. 1(b)) 평균 하천수 감소비를 산정한 결과로서 양수 1년 동안 천부지하수 양수의 경우에는 수리조건에 따라 하천수 감소비의 변동이 크지만 심부지하수 양수의 경우 모두 0.2 미만의 값을 보여 하천의 수량에 미치는 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 양수 5년인 경우 천부 및 심부 지하수 양수로 인한 하천수 감소비는 양수 1년에 비해 약 2배 증가하였으며, 누수계수가 매우 작기 때문에 여전히 심부지하수 양수의 영향이 천부지하수를 거쳐 하천에 도달하는 영향은 작다. 주어진 전체 수리조건에 대한 결과의 평균값은 그림에서 회색 원으로 표시한 바와 같이 양수기간 1년 동안 천부지하수 양수시 0.36, 심부지하수 양수시 0.02, 양수기간 5년 동안 천부지하수 0.61, 심부지하수

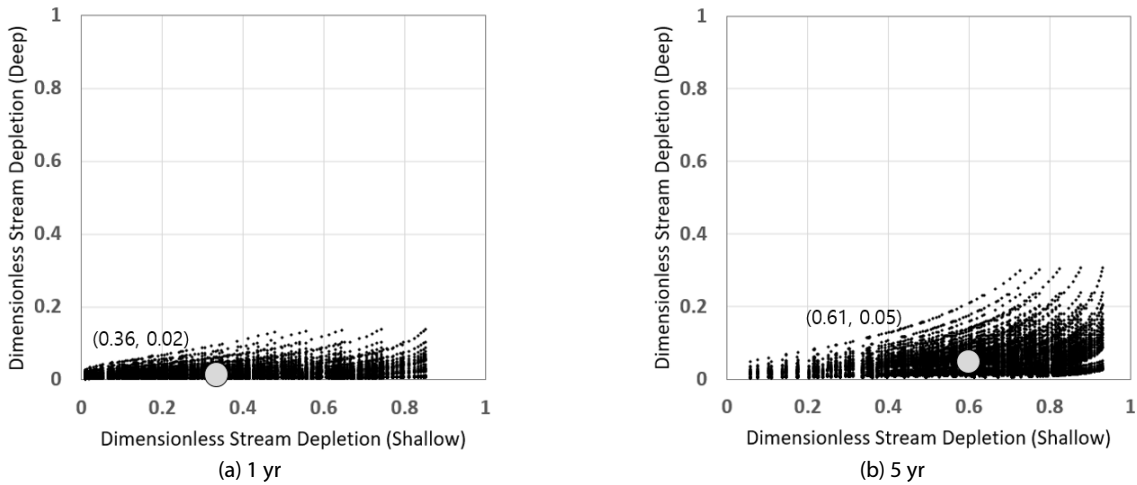


Fig. 1. Comparison of Dimensionless Streamflow Depletions between Shallow and Deep Groundwater Pumping ( $K_v/B = 10^{-6} 1/d$ )

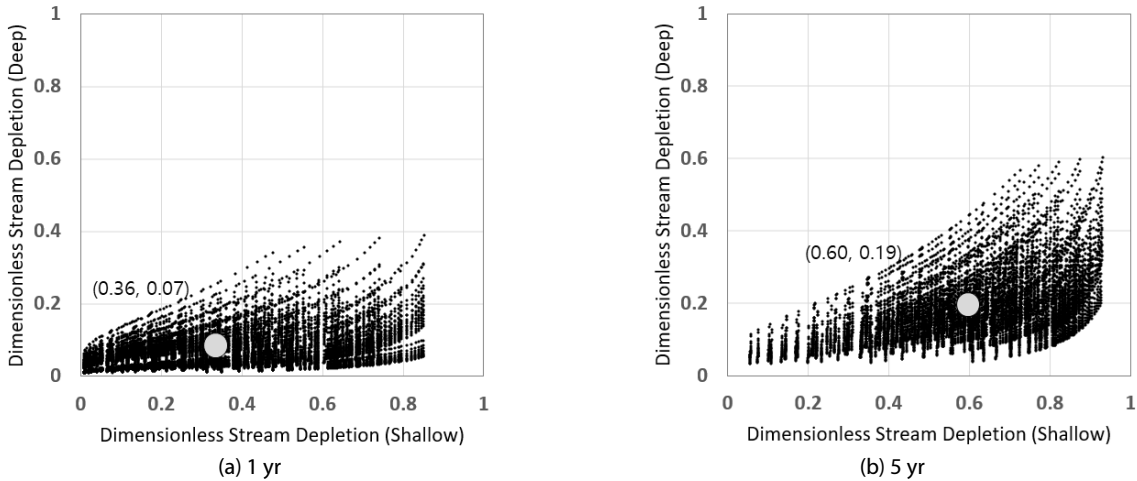


Fig. 2. Comparison of Dimensionless Streamflow Depletions between Shallow and Deep Groundwater Pumping ( $K_v/B = 10^{-5} 1/d$ )

0.05의 양수량 대비 하천수 감소량이 발생하는 분석되었다.

Fig 2는 누수계수가  $K_v/B = 10^{-5} 1/d$  일 때의 결과로서 역시 천부지하수 양수로 인한 하천수 감소비는 수리조건에 따라 큰 차이를 나타내지만 심부지하수 양수의 경우는 상대적으로 그 차이가 작은 것을 확인할 수 있다. 대부분의 경우 천부지하수 양수 영향이 심부지하수 양수에 비해 크지만 하천수 감소비가 0.2 미만의 경우 일부 조건에서 오히려 심부지하수 양수 영향이 더 크게 나타나는 경우도 일부 보이고 있다. 이는 심부지하수의 수리확산계수가 천부지하수에 비해 많이 커서 양수에 대한 반응이 시간적으로 빠르게 공간적으로 넓게 반응한데서 기인한다. 양수기간이 1년에서 5년으로 증가함에 따라 전체 수리조건에 대해 평균적으로 천부지하수 양수는 0.36에서 0.60의 하천수 감소비, 심부지하수 양수는 0.07에서 0.19로 증가하였다.

Fig 3은  $K_v/B = 10^{-4} 1/d$  일 때의 하천수 감소비 산정 결과로서 다양한 수리조건에 대한 하천수 감소비의 평균치가 양수기간 1년의 경우 천부지하수는 0.36, 심부지하수는 0.22, 양수기간 5년의 경우 천부지하수는 0.59, 심부지하수는 0.41의 값을 나타내었다. 앞선 누수계수 조건에 비해 천부지하수와 심부지하수 양수간의 차이가 상당 부분 줄어들었으며, 특히 1:1 점이 45도 선에 가깝게 분포하는 경우도 많아 누수계수가 비교적 큰 대수층에서는 지하수 양수 심도에 따른 하천수량 감소 영향의 차이가 줄어든 것을 확인할 수 있다. Figs. 1 and 2에 비해 누수계수가 100배, 10배 증가하였음에도 불구하고 천부지하수 양수로 인한 하천수 감소비의 평균, 최소, 최대치의 변화는 거의 없으며, 반면 심부지하수 양수의 경우는 평균치의 변화가 2 ~ 10배 만큼 증가하였다. 따라서 천부대수층에서 지하수를 양수할 경우에는 하천수 감소가 누수계수 크기에

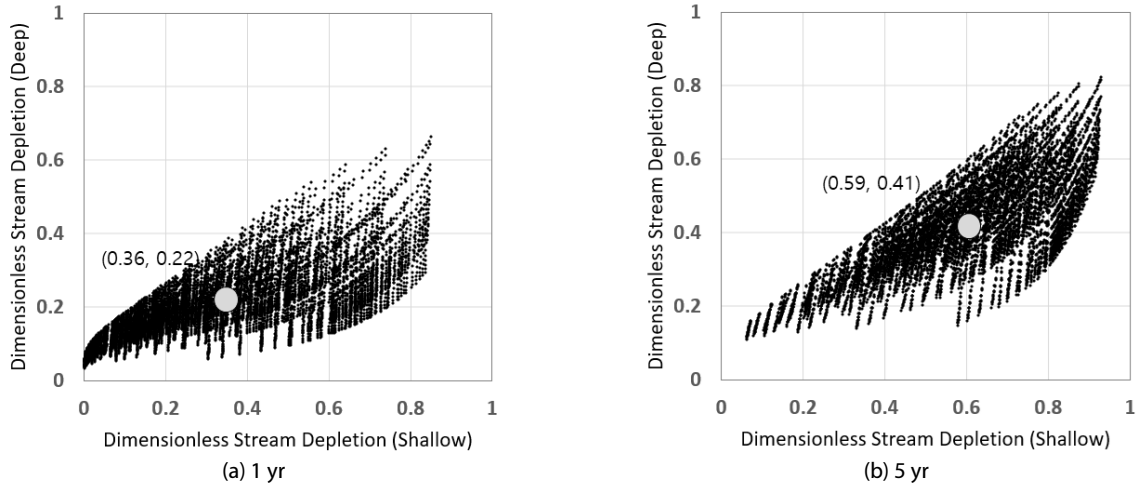


Fig. 3. Comparison of Dimensionless Streamflow Depletions between Shallow and Deep Groundwater Pumping ( $K_v/B = 10^{-4} 1/d$ )

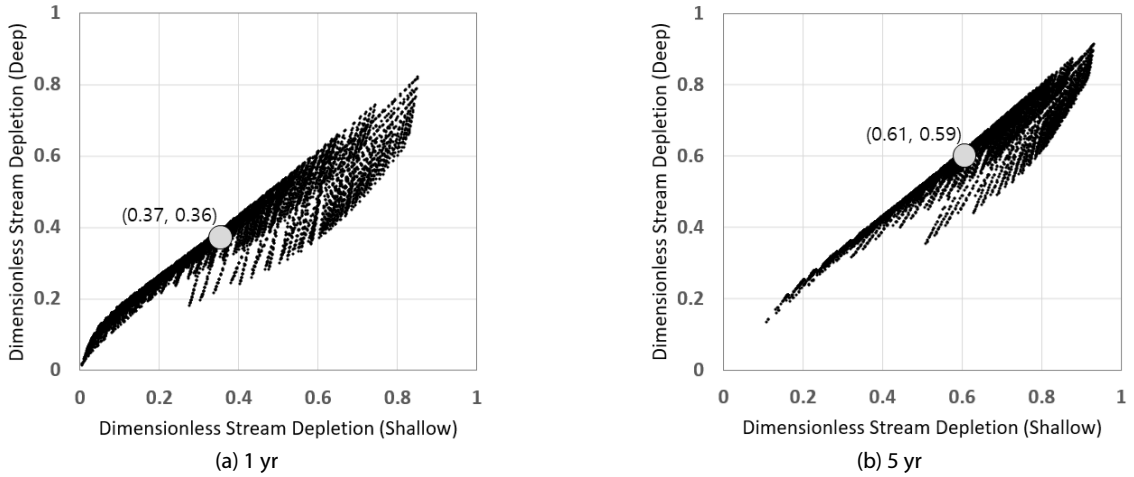


Fig. 4. Comparison of Dimensionless Streamflow Depletions between Shallow and Deep Groundwater Pumping ( $K_v/B = 10^{-3} 1/d$ )

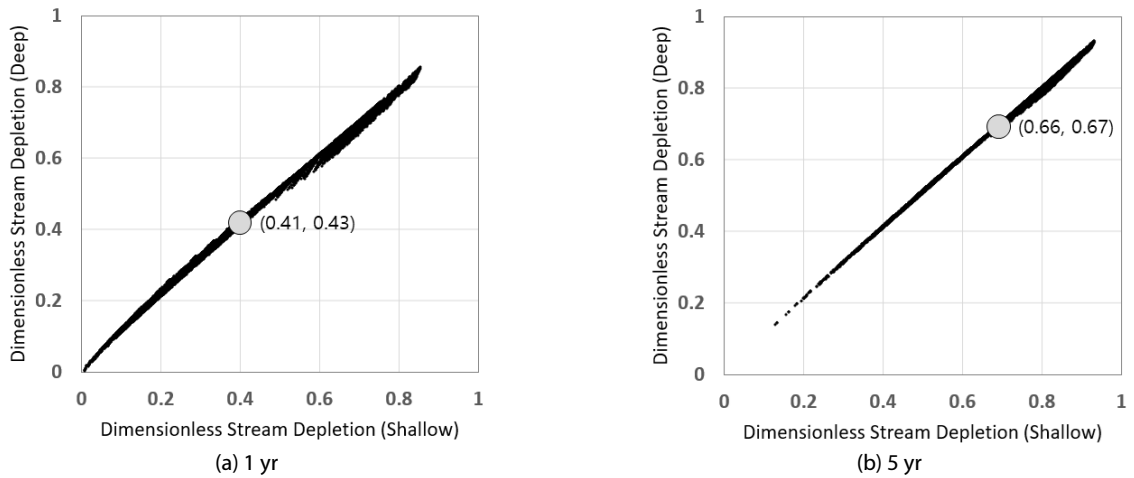


Fig. 5. Comparison of Dimensionless Streamflow Depletions between Shallow and Deep Groundwater Pumping ( $K_v/B = 10^{-2} 1/d$ )

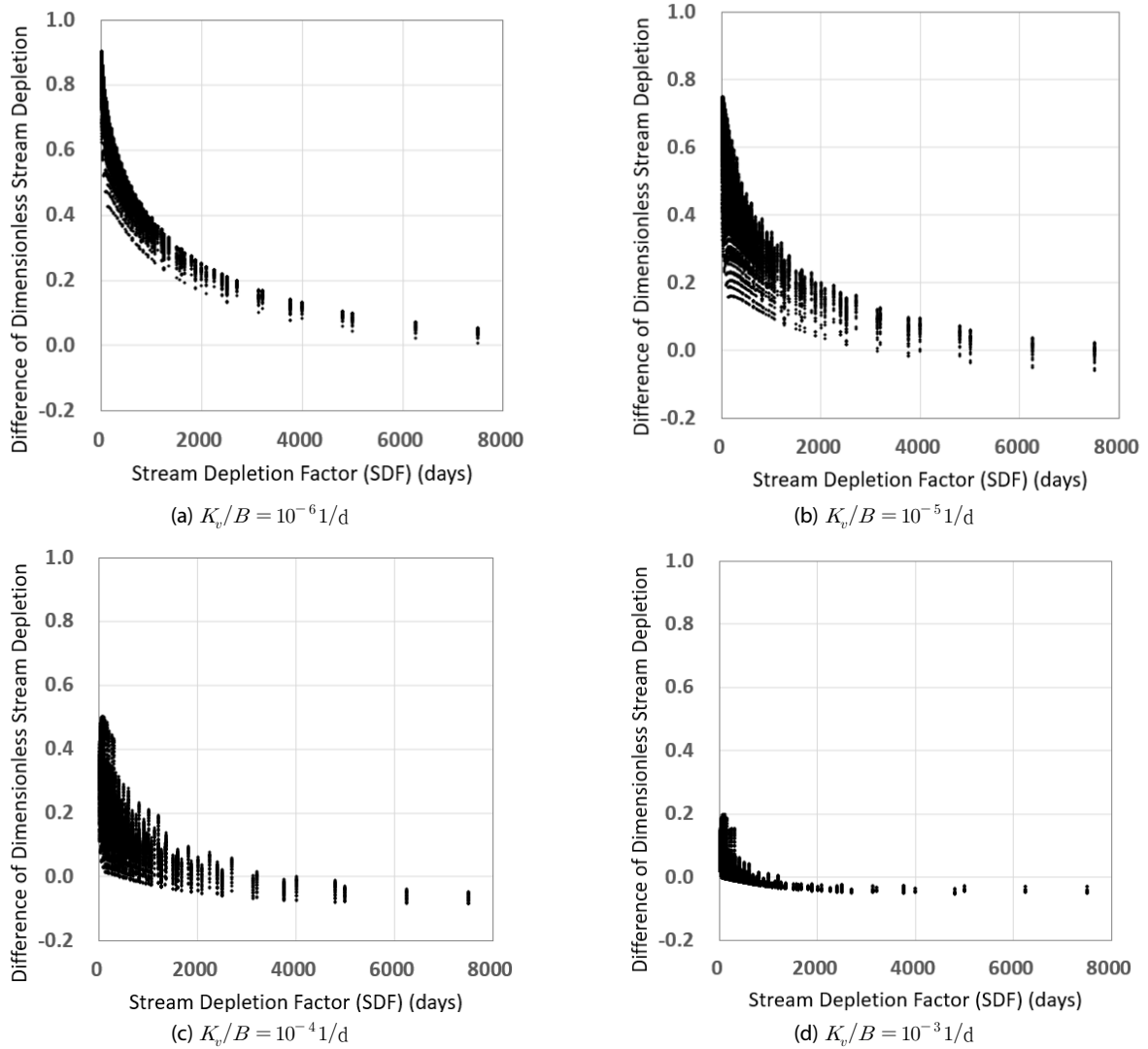


Fig. 6. Differences of Dimensionless Stream Depletions according to SDF Values

둔감하고 심부대수층의 수리특성 영향을 적게 받으나, 심부대수층 양수인 경우에는 누수계수값에 민감하게 반응하여 결국 심부와 천부대수층의 수리특성이 복합적으로 작용하여 하천수량에 미치는 영향의 큰 차이를 나타낼 수 있음을 의미한다.

Figs. 4 and 5는 각각  $K_v/B = 10^{-3} 1/d$ ,  $K_v/B = 10^{-2} 1/d$  일 때의 하천수 감소비 산정 결과로서 천부지하수 양수와 심부지하수 양수간의 차이가 전자의 경우 최대 0.2, 후자의 경우는 거의 차이가 없다. 따라서 상하부 층간의 수리적 연결성이 큰 경우에는 지하수 개발 심도를 깊게 하더라도 하천의 수량 측면에서는 유리하지 않음을 알 수 있다.  $K_v/B = 10^{-3} 1/d$  일 때 평균적인 하천수 감소비는 양수기간 1년 동안 천부지하수 0.37, 심부지하수 0.36, 양수기간 5년 동안 천부지하수는 0.61, 심부지하수는 0.59의 값을 나타내었고,  $K_v/B = 10^{-2} 1/d$  일 때는 평균 하천수 감소비가

양수기간 1년 동안 천부지하수 0.41, 심부지하수 0.43, 양수기간 5년 동안 천부지하수는 0.66, 심부지하수는 0.67의 값을 나타내어 천부와 심부지하수 양수의 경우 하천수량에 미치는 영향이 거의 유사하다.

천부와 심부지하수 양수 결과의 차이를 야기하는 누수계수값 이외의 다른 수리특성인자의 영향을 살펴보기 위해서 Fig. 6과 같이 천부와 심부지하수 양수에 따른 5년 평균 하천수 감소비를 산정하고 그 차이를 천부대수층의 하천고갈인자(Stream Depletion Factor, SDF)에 따라 나타내었다. 여기서 SDF란 하천관정 이격거리 제곱과 저류계수의 곱을 투수량계수로 나눈 값으로서 하천-관정 이격거리가 작거나 수리확산계수(T/S)가 커질수록 지하수 양수의 영향이 크고 빠르게 하천에 도달함을 의미한다(Lee et al., 2016b). Fig. 6(a)는  $K_v/B = 10^{-6} 1/d$  일 때 SDF에 따른 하천수 감소비의

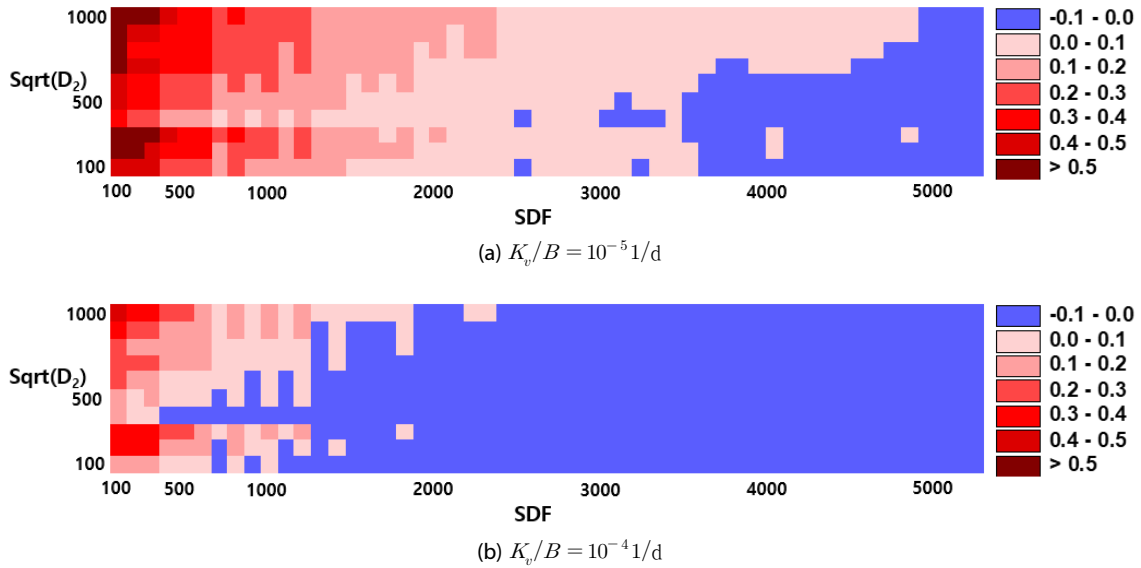


Fig. 7. Differences of Dimensionless Stream Depletions according to SDF and  $\sqrt{D_2}$  Values

차이를 나타낸 것으로 SDF가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하는 양상을 보이고 있으며, 상부층간의 누수계수가 작아 하부층의 수리특성의 영향이 적게 미쳐 산포도는 작게 발생하고 있다. 누수계수가 매우 작은 지역에서는 천부대수층의 SDF에 따라 천부와 심부지하수 양수 영향이 큰 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면에 Figs. 6(b) and 6(c)는 각각 누수계수가  $K_v/B = 10^{-5} 1/d$ ,  $K_v/B = 10^{-4} 1/d$  일 때의 결과로서 역시 SDF값과 지수함수적 관계를 나타내고 있지만 상부층간의 수리적 연결성이 커짐에 따라 천부지하수와 심부지하수간의 상호 영향 영향이 증가하여 Fig. 6(a)에 비해 동일 SDF에 대해 편차가 크게 발생하고 있으며 특히 SDF가 작은 범위에서는 그 양상이 더욱 두드러지게 나타나고 있다. Fig. 6(b) 처럼 SDF가 약 3,000 d 보다 큰 경우 오히려 하천수 감소비의 차이가 음의 값을 보여 심부층 양수의 영향이 더 큰 경우도 발생하고 있다. 이러한 경우는 하부층의 수리확산계수에 비해 상부층의 수리확산계수가 매우 작을 때 발생하였다. Fig. 6(d)는  $K_v/B = 10^{-3} 1/d$ 로 큰 경우에는 최대 0.2 만큼의 차이를 나타내고 있고 그 외에는 SDF 값과 상관없이 거의 차이를 보이고 있지 않다. 즉, 누수계수가 큰 지역에서는 천부 및 심부지하수 양수로 인한 하천의 수량에 미치는 영향은 서로 거의 동일함을 의미한다. 따라서 심부지하수 양수가 항상 하천의 수량에 미치는 영향이 절대적으로 작을 것이라는 직관적 판단은 옳지 않은 것으로 보인다.

이상의 결과로부터  $K_v/B = 10^{-6} 1/d$  이하인 경우는 천부 및 심부지하수 양수로 인한 하천수 감소비의 차이가 천부대수층의 SDF와 지수함수적 관계가 뚜렷한 양상을 보이기 때문에 SDF

인자만으로 심부지하수 양수가 하천의 수량측면에서 얼마나 덜 영향을 미치는 지를 판단할 수 있다. 반면에 누수계수가  $K_v/B = 10^{-3} 1/d$  이상인 경우 SDF가 매우 작은 경우만 최대 0.2로 작은 차이를 보였고 대부분 SDF 값과 상관없이 하천수량에 미치는 영향이 천부나 심부나 거의 차이가 없기 때문에 하천수량 감소 측면에서는 지하수 양수심도가 중요한 요소로 작용하지 않음을 의미한다.  $K_v/B = 10^{-5} 1/d$ 와  $K_v/B = 10^{-4} 1/d$ 로 누수계수가 상대적으로 중간 크기일 때에는 천부와 심부지하수 양수 영향이 하천-관정 이격거리나 천부대수층의 수리확산도를 나타내는 SDF 뿐만 아니라 심부대수층의 수리확산계수 크기에도 지배적인 영향을 받는 것으로 분석되었다. 이러한 조건일 때 천부와 심부지하수 양수에 따른 하천수 감소비의 차이를 Fig. 7과 같이 천부대수층의 SDF와 심부대수층 수리확산계수( $D_2 = T_2/S_2$ )의 1/2승( $\sqrt{D_2}$ )에 따라 2차원 평면상에 도시하였다. 전반적으로 천부대수층의 SDF가 증가함에 따라 차이가 줄어드는 양상을 보이고 있고 심부층 양수가 하천수량에 더 영향을 주는 경우도 분명하게 확인할 수 있다. Fig. 7(a)와 같이  $K_v/B = 10^{-5} 1/d$  일 때에는 SDF가 300d 보다 작은 경우 대부분 차이가 0.3을 초과하였고, SDF가 400 ~ 600 d 이면서  $\sqrt{D_2}$ 가 200 ~ 300  $m/d^{-1}$  또는 700 ~ 1,000  $m/d^{-1}$  인 경우 천부와 심부 양수 영향의 차이가 0.3 보다 컸다. 반면에 Fig. 7(b)와 같이  $K_v/B = 10^{-4} 1/d$  일 때에는 Fig. 7(a) 보다 작은 범위로 SDF가 300d 보다 작으면서  $\sqrt{D_2}$ 가 200 ~ 300 이거나 1,000  $m/d^{-1}$  일 때 그 차이가 0.3 보다 큰 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 누수대수층-하천-양수정 경계치 문제에 대한 Hunt(2009) 해석해와 Ward and Lough(2011) 해석해를 이용하여 투수량계수와 저류계수의 대수층 수리특성, 천부와 심부대수층간 누수계수, 하천-관정이격거리 조합에 따라 총 45,000가지 조건에 따른 천부 및 심부 지하수 양수량 대비 하천수 감소량을 산정, 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 층간 누수계수가  $10^{-6}1/d$ 로 매우 작은 경우 천부지하수 양수로 인한 5년 평균 하천수 감소비는 수리조건에 따라 작게는 0.05에서 크게는 0.9를 초과하는 큰 변동을 보이지만 심부지하수 양수시에는 0.05~0.35의 범위로 상대적으로 작은 값과 변동을 나타내었다. 누수계수가  $10^{-5}1/d$ 일 때는 하천수 감소비가 천부지하수 양수시 평균 0.60, 심부지하수 양수시 평균 0.19, 누수계수가  $10^{-4}1/d$ 일 때에는 천부지하수 양수시 평균 0.59, 심부지하수 양수시 평균 0.41로 산정되어 심부지하수 양수가 천부지하수 양수에 비해 하천수량에 영향을 미치는 정도가 작고 누수계수가 작을수록 더욱 그러한 양상을 보였다. 그러나, 일부 수리특성 조건에 대해서는 심부지하수 양수 영향이 더 크게 나타나는 경우도 발생하였다. 누수계수가  $10^{-3}1/d$ 일 때에는 천부와 심부지하수 양수로 인한 하천수 감소비의 최대 차이가 0.2로 크게 줄고, 누수계수가  $10^{-2}1/d$ 로 매우 큰 조건에서는 두 층에 대한 양수 영향의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 층간 수리적 연결성이 큰 대수층 조건에는 지하수 양수 심도를 깊게 하더라도 하천의 수량 보전 측면에서 유리하지 않을 수 있는 것으로 분석되었다.
- (2) 천부와 심부지하수 양수에 따른 5년 평균 하천수 감소비를 산정하고 그 차이를 천부대수층의 하천고갈인자 값에 따른 양상을 분석한 결과 누수계수가  $10^{-6}1/d$ 로 작은 경우 수리특성조건에 따라 최대 0.9로 큰 편차를 보이고 하천고갈인자(SDF) 값이 증가할수록 지수함수적으로 감소하는 양상이 지배적으로 나타났다. 누수계수가  $10^{-5}1/d$ ,  $10^{-4}1/d$ 로 증가함에 따라 층간 상호작용 영향으로 이러한 SDF 값과의 지수함수적 관계가 점차 둔화되고 심부대수층 수리특성이 반영되어 산포도가 커지는 양상을 나타내었다. 누수계수가  $10^{-3}1/d$  이상이 되면 최대 0.2로 작은 차이가 발생하고 천부대수층의 SDF 값과도 상관성이 낮아 층간 수리적 연결성이 큰 조건에서는 지하수 양수 심도에 따른 하천수 감소량의 차이는 매우 적은 것으로 분석되었다.
- (3) 천부와 심부지하수 5년 양수에 따른 하천수 감소비의 차이를 천부대수층의 SDF와 심부대수층의  $\sqrt{D_2}$ 에 따라 도시한 결과

누수계수가  $10^{-5}1/d$  인 경우 SDF < 300 d 일 때 대부분 차이가 0.3을 초과하였고, SDF가 400 ~ 600 d 이면서  $\sqrt{D_2}$  가 200 ~ 300 또는 700 ~ 1,000 m/d<sup>-1</sup> 일 때 천부와 심부 지하수 영향의 차이가 0.3 보다 컸다. 누수계수가  $10^{-4}1/d$  일 때에는 차이가 큰 수리특성 범위가 줄어들어 SDF < 600 d이고,  $\sqrt{D_2}$  = 200 ~ 300 또는 1,000 m/d<sup>-1</sup>일 때 그 차이가 0.3 보다 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 조건일 때 심부지하수를 양수한다면 하천수량 보전 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서 활용한 Hunt(2009) 및 Ward and Lough(2011) 해석해와 그 적용 결과는 개략적인 영향 분석과 신속한 의사결정에 유용하게 활용할 수 있을 것이다. 그러나, 두 해석해 모두 하천대수층-양수정 시스템을 단순화한 조건에서 개발된 것으로 대수층의 비균질성 등의 복잡한 수리지질조건과 수문시스템의 동적 변화조건을 모사하는데는 한계가 있다. 따라서 하천의 수량에 미치는 지하수 양수 영향을 보다 정밀하게 분석하기 위해서는 지하수 유동 수치해석 모델링과 현장 양수시험이 함께 수반되어야 할 것이다. 또한 천부와 심부대수층간의 수리적 연결성 평가를 위해서 하천 인근 대수층 지질구조 파악을 위한 시추 및 착정 조사, 각 층의 연직수리전도도 및 층간 누수계수 값 측정을 위한 현장 수리 시험 및 방법의 개선이 필요할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부 한강홍수통제소 “하천 인근 지하수 영향평가기술 시범적용 및 개선 연구(2차)” 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

Han River Flood Control Office (HRFCO) (2018). *Study on the groundwater management near stream with considering streamflow depletion*, Ministry of Environment.

Hong, S. H., Cho, H. S., Lee, J. W., Chung, I. M. and Kim, N. W. (2019). “Technique for evaluation of groundwater pumping effects on near-stream.” *River and Culture*, Vol. 15, No. 2, pp. 65-71 (in Korean).

Hunt, B. (1999). “Unsteady stream depletion from ground water pumping.” *Ground Water*, Vol. 37, No. 1, pp. 98-102.

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, No. 24, pp. 3535-3546.



- Lee, J. W., 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 Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 36, No. 5, pp. 769-777 (in Korean).
- Lee, J. W., Chung, I. M., Kim, N. W. and Hong, S. H. (2016b). "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. W., Chung, I. M., Kim, N. W. and Lee, M. H. (2016c). "Evaluation of effects of groundwater pumping near stream using analytical model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 36, No. 4B, pp. 617-625 (in Korean).
- 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.