

## 해석적 모형에 의한 하천변 지하수 양수 영향 분석

이정우\* · 정일문\*\* · 김남원\*\*\* · 이민호\*\*\*\*

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

## Evaluation of Effects of Groundwater Pumping Near Stream Using Analytical Model

### ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the groundwater drawdown and streamflow depletion due to each groundwater pumping from 110 wells located near stream using the Hunt's analytical solution (1999). The calculated results revealed that the streamflow depletion rate divided by the pumping rate for each well location mostly exceeded about 80% of pumping rate on average for 5 years. The results also showed that the stream boundary condition has made the influence distance shorter and the drawdown distribution skewed except for the streambed hydraulic conductivity and the stream bed factor (SBF) lower than  $1.0 \times 10^{-9}$  m/s and 1.0, respectively. It was found that the groundwater pumping has significant impacts on the stream depletion showing above 80 % of stream depletion rate when the streambed hydraulic conductivity is higher than  $1.0 \times 10^{-7}$  m/s and the stream depletion factor(SDF) is lower than 100. However, for other conditions, the SDF is not sufficient to be used as a criterion for determining whether the pumping has great impacts on stream depletion or not. Furthermore, the variation of the streambed hydraulic conductance has little change in stream depletion rate for the condition that the stream width is greater than 400 m.

**Key words :** Groundwater drawdown, Streamflow depletion, Groundwater pumping, Hunt's analytical solution

### 초 록

본 연구에서는 하천변에 실제로 위치한 지하수 관정 110개를 대상으로 Hunt (1999)의 해석해를 이용하여 양수로 인한 지하수위 강하 및 하천수 감소량을 산정하였다. 대상 관정 각각에 대해 양수량 대비 하천수 감소량을 산정한 결과 대부분의 관정에서 양수기간 5년 동안 평균적으로 80%를 초과하는 것으로 분석되었다. 하상수리전도도가  $1.0 \times 10^{-9}$  m/s로 매우 작고 하천바닥인자(SBF)가 1 보다 작은 경우를 제외하고는 하천경계조건의 영향으로 하천방향 영향거리가 짧아져 비대칭적 지하수위 강하 분포를 크게 유발하는 것으로 나타났다. 하상수리전도도가  $1.0 \times 10^{-7}$  m/s 보다 크고 하천고갈인자(SDF)가 100 보다 작은 경우에는 하천수 감소율이 80 %를 초과하여 양수의 영향이 크게 발생하였으나, 그 외의 조건에 대해서는 SDF 값만으로 하천 영향의 대소를 판별하기에 한계가 있는 것으로 분석되었다. 또한 하폭이 400 m를 넘는 경우에는 하상수리전도도 변화에 따른 하천수 감소율의 변화가 크지 않는 것으로 분석되었다.

**검색어 :** 지하수위 강하, 하천수 감소량, 지하수 양수, Hunt 해석해

\* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil engineering and building Technology · lju2961@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)

\*\*\*\* 금강홍수통제소 예보통제과, 연구사 (Geum River Flood Control Office · minholee@korea.kr)

Received April 5, 2016/ revised April 28, 2016/ accepted May 10, 2016

### 1. 서론

하천수와 지하수간 수리적 연결성이 큰 지역에서 지하수를 과다하게 사용하면 하천으로의 기저유량 감소 또는 하천수의 지하수계로의 손실 등으로 인해 하천유량의 감소를 유발하게 되며, 이로 인해 하천수 취수 장애 및 수리권 문제가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 수질과 서식처 환경 등 하천생태계에도 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 하천 인근 지역에서 지하수를 개발·이용하고자 할 때에는 수량측면에서 하천에 미치는 영향을 정량적으로 검토해야 한다.

지하수 양수에 따른 하천수 감소량(stream depletion)은 현지에서 물리적 실험을 수행하여 지하수위 및 하천수-지하수 상호교환률(exchange rate) 변화를 직접 측정하거나 지하수 양수정을 고려한 하천-대수층 경계치 문제의 해를 해석적 또는 수치적 모형을 이용하여 추정할 수 있으며, 이 중에서 비용이나 시간, 그리고 용이성 측면에서는 해석적 모형을 이용하는 것이 가장 유리하다.

Theis (1941)는 하천과 지하수 양수정이 대수층을 완전 관통(fully penetration)한 기하학적 형상을 가진 반무한(semi-infinite) 대수층 영역에 대해서 하천의 수위변화가 없는 무한의 직선을 경계 조건으로 하고 양수로 인한 지하수위 저하가 대수층 두께에 비해 매우 작다는 가정 하에 Dupuit 이론을 적용하여 지하수 양수량에 대한 하천수 감소량의 비로 표현된 해석해를 처음으로 유도하였다. Glover and Balmer (1954)는 여오차함수(complementary error function, erfc)를 사용하여 Theis (1941)의 해석해를 변형하였다. Hantush (1965)는 투수성이 낮은 하천바닥층(semipervious streambed)을 고려할 수 있도록 대수층의 수리전도도, 하천바닥층의 수리전도도 및 두께의 함수로 나타낸 길이의 차원을 가진 누수계수를 추가하여 Glover and Balmer (1954)의 해석해를 확장하였다.

Theis (1941), Glover and Balmer (1954), Hantush (1965)의 해석해들은 하천이 대수층을 완전관통한 경우에 대한 것으로서 제한적으로 이용될 수밖에 없다. Hunt (1999)는 이를 극복하고자 하천바닥층이 대수층 저면까지 닿지 않은 부분 관통 조건과 하천바닥층의 준투수성 조건을 고려한 경우에 대해서 해석해를 유도하였다. 이 해석해는 현재 미국 지질조사소(USGS)에서 소프트웨어화하여 범용적으로 사용되고 있고, 뉴질랜드의 양수 영향 평가 가이드 라인(Pattle Delamore Partners Ltd and Environment Canterbury, 2000)에서도 주된 방법으로 소개되고 있다.

이후 Hunt (2003, 2009)는 반피압대수층(semi-confined aquifer)에 대한 해석해를 유도하였으며, Butler et al. (2001, 2007)은 하천이 대수층을 부분 관통하고 하천바닥층이 준투수성인 조건에 대해 하폭을 고려한 해석해를 유도하였다. Singh (2000)은 하천수 감소량을 시간에 대한 변화율뿐만 아니라 양수기간 동안 하천수의

총변화체적 형태로도 제시하였고, 또한 Singh (2005)은 비정상(unsteady)양수로 인한 하천수 감소량을 산정하는 해석적인 방법을 제시하였다. 이외에도 다양한 조건에 대한 해석해들이 지속적으로 개발되어 오고 있다.

국내에서는 Kim (2010)이 Hunt (1999)의 해석해를 감천유역에 적용하여 소유역별 시간에 따른 하천수 감소량의 대표 양상을 분석하였고, HRFCO (2011)에서는 하천변 지하수 이용 영향 평가 기법을 제시하면서 Hunt (1999)의 해석해를 소개하였다. 이들을 제외하고는 Hunt (1999) 해석해의 국내 적용에 관한 연구는 매우 드물며, 특히 하천변 지하수 관정에 적용한 사례는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Hunt (1999)의 해석해를 하천변에 실제로 위치한 지하수 관정에 적용하여 양수로 인한 지하수위 강하 및 하천수 감소량을 산정하고, 대수층의 수리상수, 하천과 관정간의 이격거리, 하천바닥층의 하상수리전도도 등에 따른 그 변동 특성을 분석, 제시하였다.

### 2. 이론적 배경 및 분석 대상

#### 2.1 Hunt (1999) 해석해

Hunt (1999)는 Fig. 1과 같이 상대적으로 규모가 매우 작은 하천이 대수층을 부분 관통하고 양수정이 대수층 바닥까지 완전 관통한 경우에 대해 지하수 양수로 인한 수위 저하 및 하천수 감소량을 계산하기 위한 해석해를 개발하였다.

균질, 등방성을 가진 무한 대수층에 대해서 연직방향 지하수 유동속도가 수평방향 속도에 비해 매우 작고 양수로 인한 수위 저하가 대수층 두께에 비해 매우 작다는 가정 하에 Eq. (1)과 같이 생성과 소멸항을 가진 2차원 지하수 유동 방정식에 대한 경계치 문제를 구성하였다.

$$T \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = S \frac{\partial \phi}{\partial t} - Q_w \delta(x-l) \delta(y) + \lambda \phi \delta(x) \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 투수량계수,  $\phi$ 는 수위강하량,  $S$ 는 저류계수,  $Q_w$ 는 양수량,  $\delta$ 는 Direc delta 함수,  $l$ 는 하천과 양수정간 거리, 그리고

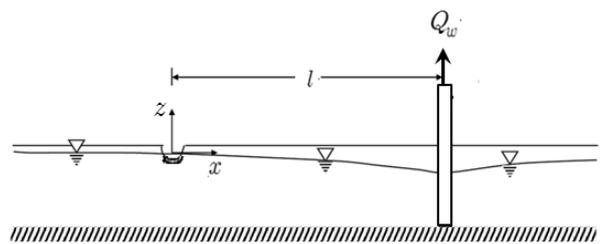


Fig. 1. Definition Sketch for Hunt (1999) Solution

$\lambda$ 는 하상수리전도성(streambed hydraulic conductance)으로 하상수리전도도  $k_s$ 와 하폭  $W$ 의 곱을 하천바닥층 두께  $M$ 으로 나눈 값이다.

$$\phi(x, y, 0) = 0 \tag{2}$$

$$\lim_{(x^2 + y^2) \rightarrow \infty} \phi(x, y, t) = 0 \tag{3}$$

Hunt (1999)는 각각 Eqs. (2) and (3)과 같은 초기 및 경계조건에 대해 편미분 방정식 Eq. (1)을 시간에 대해 Laplace 변환, 공간에 대해 Fourier 변환을 통해 상미분 방정식으로 변형하고 다시 역변환을 거쳐 Eq. (4)와 같은 지하수위 강하량에 관한 해를 유도하였다.

$$\phi(x, y, t) = \frac{Q_w}{4\pi T} \left\{ E_1 \left[ \frac{(l-x)^2 + y^2}{4Tt/S} \right] - \int_0^\infty e^{-\theta} E_1 \left[ \frac{(l+|x| + 2T\theta/\lambda)^2 + y^2}{4Tt/S} \right] d\theta \right\} \tag{4}$$

여기서,  $E_1$ 은 지수적분함수(exponential integral)로서 우물함수(well function)이다.

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

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

Hunt (1999)는 Eq. (5)를 Laplace 변환하고 여기에 Eq. (4)의 Fourier-Laplace 변환치를 대입하고, 다시 역변환을 취해 Eq. (6)과 같이 양수량에 대한 하천수 감소량의 비인 무차원 하천수 감소량 산정식을 유도하였다.

$$\frac{\Delta Q}{Q_w} = \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{S^2 t}{4Tt}} \right) - \exp \left( \frac{\lambda^2 t}{4ST} + \frac{\lambda l}{2T} \right) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\lambda^2 t}{4ST}} + \sqrt{\frac{S^2 t}{4Tt}} \right) \tag{6}$$

여기서  $\operatorname{erfc}$ 는 complementary error 함수이다.

Eq. (6)에서 알 수 있듯이 Hunt (1999)의 해석해는 투수량계수, 저류계수, 하천-양수정 이격거리 뿐만 아니라 하폭, 하상수리전도도와 같은 하천의 수리특성치도 양수로 인한 하천수 감소량을 계산하는데 있어서 중요한 영향인자로 작용한다. 본 연구에서는 Eq. (4)와 Eq. (6)을 이용하여 하천인근 지하수 양수로 인한 지하수위 강하량과 하천수 감소량을 산정하고 그 거동 특성을 분석하였다.

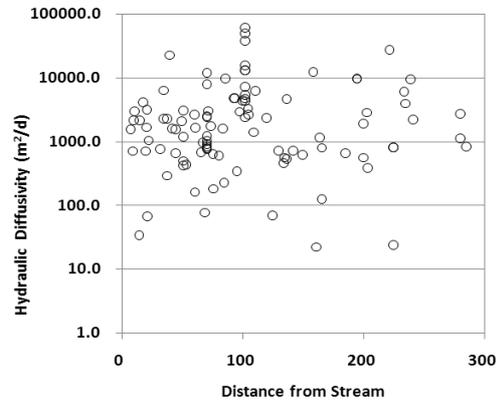


Fig. 2. Hydraulic Diffusivity According to Distance between Well and Stream

## 2.2 분석 대상

지하수개발 이용 허가를 득하기 위해서는 지하수영향조사서를 첨부하여 허가 신청을 해야 하고, 특히 하천구역으로부터 300 m 이내에서 지하수를 개발 이용하고자 할 때에는 지하수 양수로 인한 하천에 미치는 영향을 사전에 검토하고 홍수통제소와 협의하도록 법제화되어 있다. 본 연구에서는 2012년 이후 한강홍수통제소와의 협의 대상인 지하수 영향조사서 중에서 임의적으로 55권을 선별하고 그 대상 관정 110개에 대해 하천 인근 지하수 양수로 인한 지하수 및 하천에 미치는 영향을 분석하였다.

Hunt (1999)의 해석해인 Eqs. (4) and (6)을 적용하기 위해 필요한 입력자료로 양수량  $Q_w$ , 대수층의 수리상수값  $T$ 와  $S$ , 그리고 하천-관정 이격거리  $l$ 은 각 관정의 해당 지하수영향조사서에 기재된 값을 사용하였으며, 하천-관정 이격거리가 명시되지 않은 경우에는 지형도를 이용하여 도측하였다. 하상수리전도성  $\lambda$  값을 구하기 위해서 하폭은 도측하였고, 하상수리전도도  $k_s$ 와 하천바닥층두께  $M$ 은 지하수영향조사서에서 측정되지 않았기에 기존 연구결과(Calver, 2001; Lee et al., 2015)을 참조하여 적정 값을 가정하여 사용하였다.

Fig. 2는 분석 대상 관정의 수리확산계수(hydraulic diffusivity,  $D = T/S$ )를 하천과 관정간 이격거리에 따라 도시한 것이다. 수리확산계수는 1,000~10,000  $m^2/d$ 의 값을 가지는 관정수가 53개로 가장 많고, 100~1,000  $m^2/d$ 의 값을 가지는 관정수가 36개로, 관정이 위치한 곳의 수리확산계수가 100~10,000  $m^2/d$ 의 범위에 대부분 분포하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 지하수위 강하 및 하천수 감소량 산정

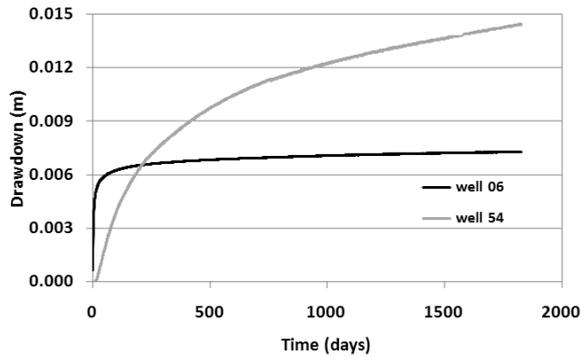
분석 대상 110개 지하수 관정 각각에 대해 Hunt (1999)의 해석해

인 Eqs. (4) and (6)을 이용하여 지하수 양수에 따른 지하수위 강하량과 하천수 감소량을 계산하였다. 앞서 기술한대로 Hunt (1999)의 해석해 적용에 필요한 입력자료는 해당 지하수영향조사서에서 발췌하였으며, 미측정 입력변수인 단위깊이당 하상수리전도도  $k_s/M$  값은 가정하였다. Calver (2001)는 하상수리전도도가  $1.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  m/s의 범위의 값을 가지며 일반적으로  $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-3}$  m/s의 범위에서 집중적으로 분포한다고 하였다. 또한 Lee et al. (2015)에 따르면 국내 하천을 대상으로 측정된 하상수리전도도는  $1.64 \times 10^{-8} \sim 1.97 \times 10^{-3}$  m/s의 값을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 이들의 개략적인 평균값인  $1.0 \times 10^{-5}$  m/s를 사용하였으며, 하천바닥층두께는 1 m로 가정하였다.

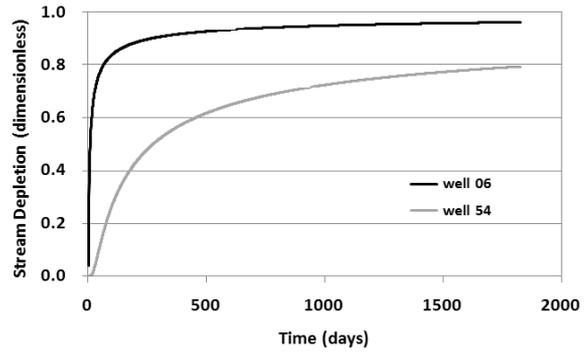
Figs. 3 and 4는 110개 지하수 관정 중에서 6번과 54번 관정에 대한 결과를 예로 나타낸 것이다. Fig. 3(a)은 하천이 위치한  $(x,y) = (0,0)$ 에서의 지하수위 강하량의 시간적 변화를 도시한

것으로 진한 실선으로 나타난 관정 6번의 경우가 흐린 실선인 관정 54번에 비해 양수에 대한 반응 속도가 양수초기에 빠르게 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 관정 6번의 수리확산계수가  $424.0 \text{ m}^2/\text{d}$ 로 관정 54번의  $68.2 \text{ m}^2/\text{d}$  크고, 하천과 관정간의 이격거리도 관정 6번이 53.0 m, 관정 54번 125.0 m로 관정 6번이 더 짧아 양수의 영향이 하천에 보다 빠르게 도달하였기 때문이다. 또한 하상수리전도성이 관정 6번이 54번에 비해 2배 이상 커서 하천과 대수층간 수리적 연결성이 우수하여 상대적으로 양수에 대한 초기반응이 빠르게 나타나고 있다. Fig. 3(b)은 시간에 따른 하천수 감소량을 양수량으로 나누어 무차원화하여 나타낸 것으로 지하수위 변화와 마찬가지로 관정 6번의 경우가 관정 54번보다 하천수 감소량의 증가가 빠르게 일어나고 있다.

Fig. 4는 지하수 관정 6번과 54번에 대해 양수 후 1년 뒤 지하수위 강하량의 공간적 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(b)와 같이 상대적으로 저투계수가 작은 관정 54번 양수의 경우가 지하수위의 경사가

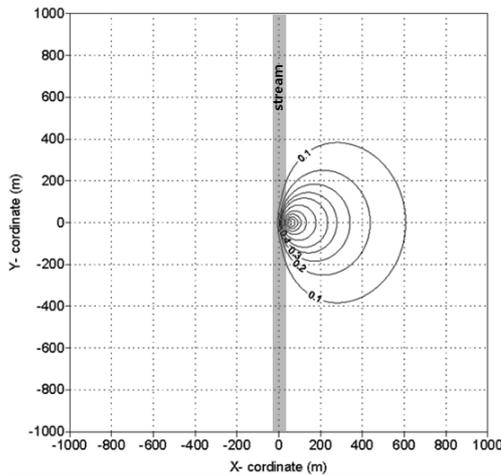


(a) Drawdown at  $(x,y) = (0,0)$

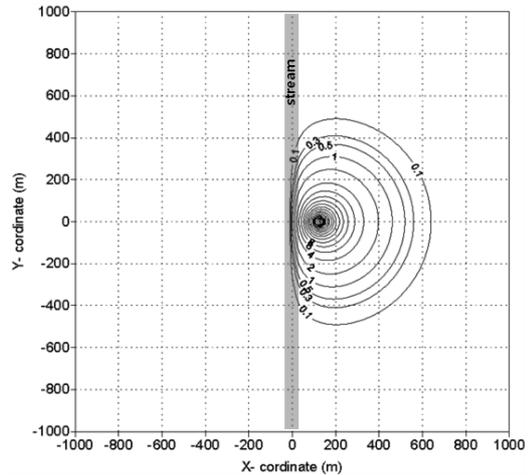


(b) Stream Depletion

Fig. 3. Drawdown and Stream Depletion for Well 6 and Well 54



(a) Well 6



(b) Well 54

Fig. 4. Distribution of Drawdown for Well 6 and Well 54

급하게 나타나고 있다. 두 경우 모두 하천의 영향으로 지하수위 강하량 분포가 비대칭적으로 왜곡된 형상을 보이고 있음을 알 수 있다.

대상 지하수 관정 각각에 대해 양수로 인한 하천수 감소량을 계산하고 양수기간 5년 동안 평균값을 무차원화하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 5년 평균 하천수 감소율을 하천과 관정간의 이격거리에 따라 도시한 것으로 이격거리가 증가할수록 하천수 감소량이 다소 줄어드는 경향을 나타내고 있으며, 일부 관정을 제외하고는 양수량 대비 80%를 넘는 하천수 감소가 일어나고 있다. 일부 관정에서 하천수 감소율이 작게 산정되었는데, 이는 투수량계수  $T$ 가 매우 작고, 하폭이 좁아 하상수리전도성  $\lambda$ 가 매우 작은 값을 가지기 때문이다. Fig. 5(b)는 양수기간 5년 평균 하천수 감소율을 수리확산계수에 따라 도시한 것으로 이 값이

클수록 하천수 감소율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Fig. 3(b)에서도 확인할 수 있듯이 수리확산계수  $D$ 가 클수록 평형 상태로 빠르게 진행해 가기 때문이다.

Hunt (1999)의 해석해는 Dupuit 근사이론이 적용된 수평방향 2차원 지하수 유동방정식을 지배방정식으로 하였기 때문에 지하수위의 저하에 따른 투수량계수의 감소 영향과 연직방향 지체의 영향을 반영하지 못하므로 지하수 양수로 인한 하천수 감소율 산정 결과는 최대치의 의미를 가지는 것으로 해석될 수 있다.

### 3.2 하상수리전도도 영향 분석

하상수리전도도  $k_s$ 의 크기에 따른 영향을 분석하기 위해서 Calver (2001)가 제시한  $1.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  m/s 내에서  $k_s$  값을 변경시켜 가면서 각 분석 대상 관정별로 지하수위 강하량

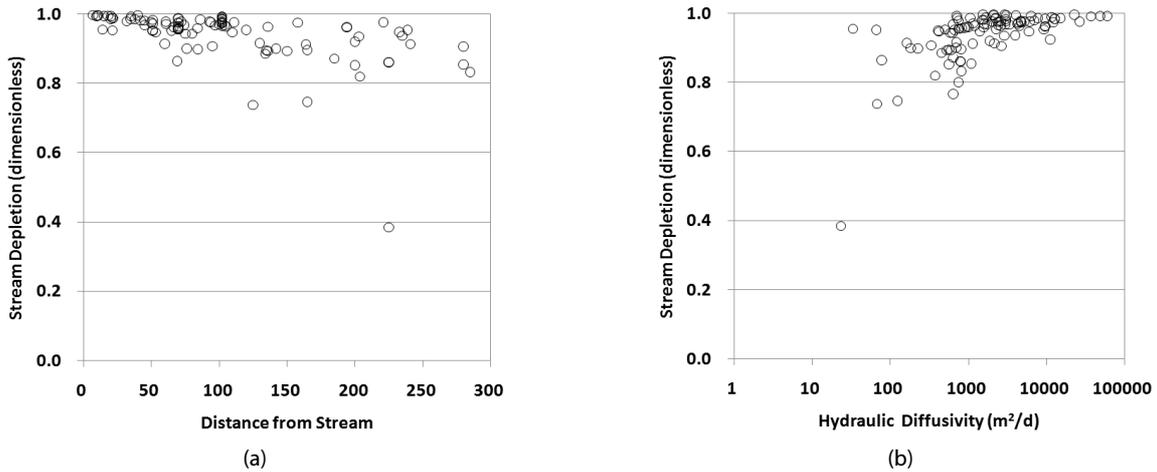


Fig. 5. Streamflow Depletions According to Well-Stream Distance (a), and Hydraulic Diffusivity (b)

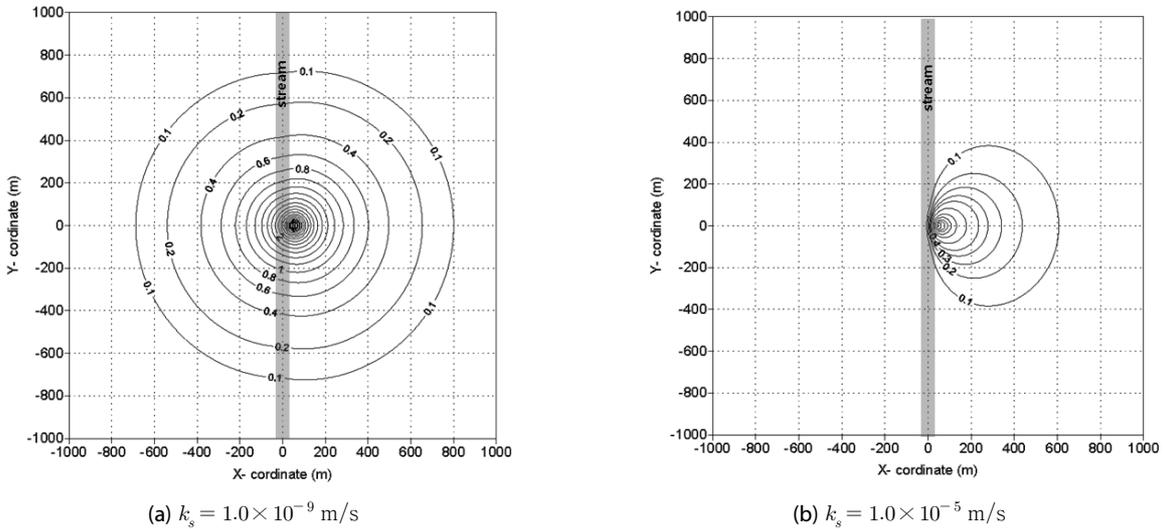


Fig. 6. Distribution of Drawdowns According to Streambed Hydraulic Conductivity

및 하천수 감소량을 계산하였다. Fig. 6은 그 결과의 예로서 지하수 관정 6번에 대한 양수 후 1년 뒤 지하수위 강하량 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)과 같이 하상수리전도도가  $k_s = 1.0 \times 10^{-9}$  m/s로 매우 작은 경우에는 관정을 기준으로 좌우측 지하수위 분포에 큰 차이가 없어 하천 존재의 영향이 미미한 것으로 나타났으나, Fig. 6(b)과 같이 하상수리전도도  $k_s = 1.0 \times 10^{-5}$  m/s로 상대적으로 큰 경우에는 하천 경계의 영향으로 영향거리가 Fig. 6(a)에 비해 짧아졌으며 특히 관정에서 하천 방향으로의 영향거리가 짧아져 비대칭적 지하수위 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

관정중심으로부터 지하수위의 강하가 일어나지 않는 영향추의 가장자리까지의 수평거리를 영향반경 또는 영향권이라 하며, 관정 가까이에 하천이 존재하는 경우는 하천 경계조건의 영향으로 영향권이 모든 방향으로 동일하지 않고 비대칭 형태를 나타내게 된다. 본 연구에서는 수위강하량이 0.01 m 보다 작은 지점까지의 거리를 영향거리(influence distance)라 정하였으며, 각각의 관정에 대해서 양수기간 5년 동안 하천 방향 및 하천 반대 방향으로의 평균적인 영향거리를 각각 산정하고 그 상대비를 Fig. 7과 같이 하상수리전도도  $k_s$ 와 하천바닥인자(Stream Bed Factor, SBF)에 따라 도시하였

다. 여기서 하천바닥인자 SBF는 하상수리전도성  $\lambda$ 와 하천관정 이격거리  $l$ 의 곱을 투수랑계수  $T$ 로 나눈 값이며,  $R_1$ 은 관정으로부터 하천 반대방향으로의 영향거리이며,  $R_2$ 는 하천 방향으로의 영향거리를 의미한다. Fig. 7(a)과 같이 하상수리전도도가  $k_s = 1.0 \times 10^{-9}$  m/s로 매우 작은 경우에는 거의 대부분의 관정에서  $R_1$ 에 대한  $R_2$ 의 비가 1에 가깝다. 이는 하천의 존재가 지하수위 변화에 미치는 영향이 매우 작아 영향추가 거의 원형에 가까운 형상을 나타내고 있음을 의미한다. Figs. 7(b)~7(d)에서 보이는 바와 같이 하상수리전도도 및 SBF가 증가할수록 영향거리의 비가 줄어드는 양상을 보이고 있어 하천 존재의 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 보았을 때 SBF가 1보다 작은 경우를 제외하고는 영향거리가 하천에 큰 영향을 받고 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 8은 하상수리전도도  $k_s$ 에 따른 양수로 인한 하천수 감소율을 일대일로 비교하여 도시한 것으로, Fig. 8(a)과 같이  $k_s = 1.0 \times 10^{-9}$  m/s와  $k_s = 1.0 \times 10^{-5}$  m/s일 때 하천수 감소율은 서로 큰 차이를 나타내고 있으나, Fig. 8(b)에서와 같이  $k_s$ 가  $1.0 \times 10^{-5}$  m/s 이상일 때에는 하천수 감소율의 차이가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

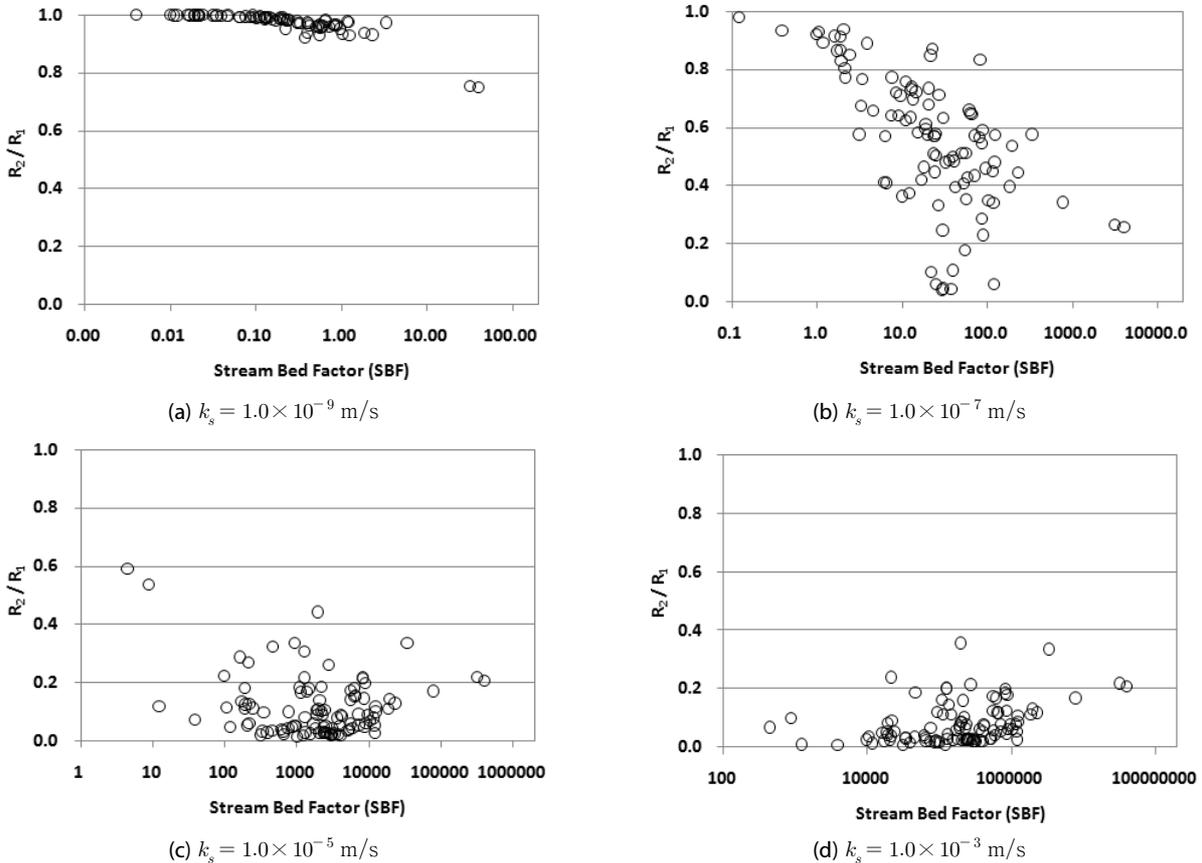


Fig. 7. Ratios of Influence Distances According to Streambed Hydraulic Conductivity

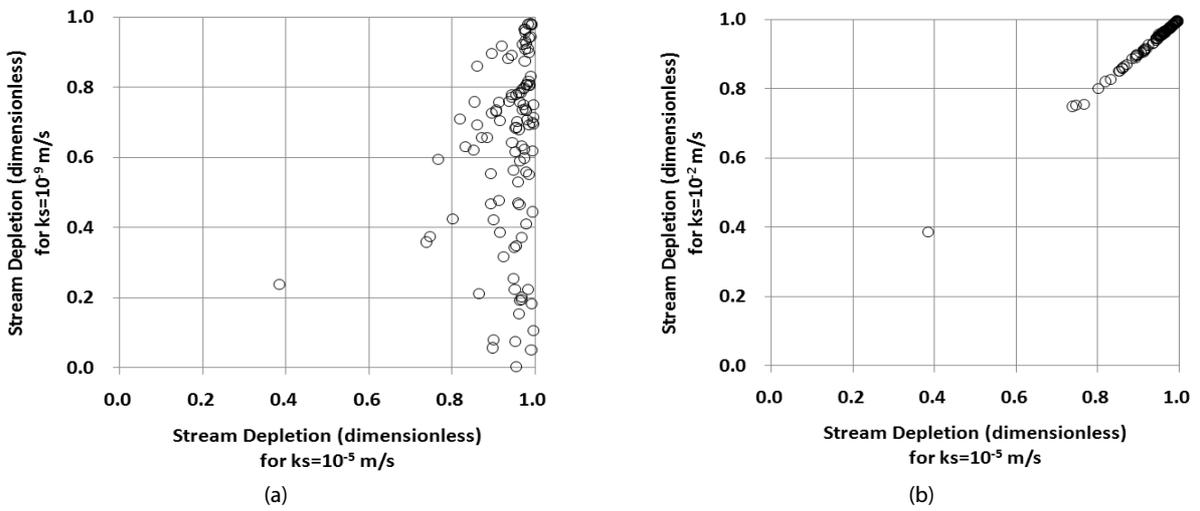


Fig. 8. Stream Depletion Rates According to Streambed Hydraulic Conductivity

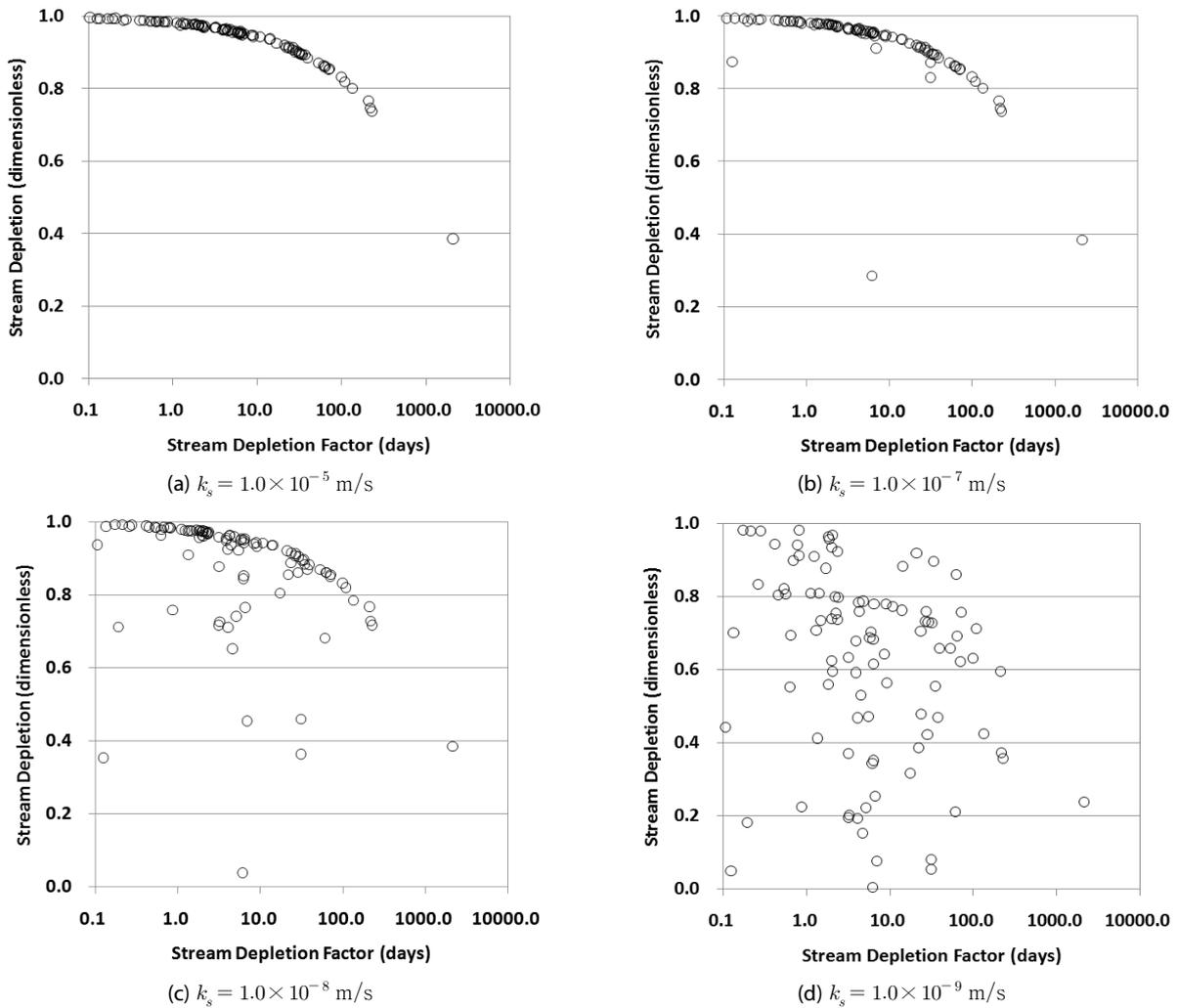


Fig. 9. Stream Depletion Rates According to Stream Depletion Factor and Streambed Hydraulic Conductivity

Fig. 9는 양수 후 5년 평균 하천수 감소량을 무차원화하고, 하천 고갈인자(Stream Depletion Factor, SDF)에 따라 도시한 것이다. 여기서 하천고갈인자 SDF는 저류계수  $S$ 와 하천-관정 이격거리 제곱  $l^2$ 의 곱을 투수량계수  $T$ 로 나눈 값으로, 이 값이 100보다 작은 경우에는 지하수 양수가 하천수량 감소에 미치는 영향이 크다고 평가하고 있다(Pattle Delamore Partners Ltd and Environment Canterbury, 2000). Figs. 9(a) and 9(b)와 같이 하상수리전도도가  $k_s = 1.0 \times 10^{-7}$  m/s 이고 SDF가 100 보다 작을 때 거의 대부분의 관정에서 하천수 감소율이 80%를 초과하여 양수의 영향이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 특히 SDF와 하천수 감소율의 관계가 매끄러운 곡선 형태를 보이고 있는데, 이는  $\lambda$ 가 커짐에 따라 Eq. (6)의 우변의 두 번째항에서  $erfc$ 이 0에 가까워져서 SDF 함수로 표현된 Thies (1941) 및 Glover and Balmer (1954)의 하천수 감소량 산정식과 같아진데서 기인한다. 반면 Figs. 9(c) and 9(d)와 같이  $k_s$ 가 작아지고 SDF가 증가함에 따라 하천수 감소율이 전반적으로 감소하는 양상을 보이고 있으며  $k_s$  값의 영향으로 하천수 감소율의 변동폭이 크게 증가하고 산포도가 커진 것을 확인할 수 있다. 따라서 하천바닥층의 투수성이 작은 경우에는 SDF 값만으로 하천 영향의 대소를 판별하기에 한계가 있고, 하상수리전도성  $\lambda$ 와 같은 하천의 특성을 고려해야 한다.

Fig. 10은 대상 관정 각각에 대해 하상수리전도도가  $k_s = 1.0 \times 10^{-2}$  m/s인 조건에서 계산한 하천수 감소량을  $k_s = 1.0 \times 10^{-9}$  m/s 일 때의 하천수 감소량으로 나눈 값을 하폭에 따라 도시한 것으로 하폭이 커짐에 따라 상대비가 줄어드는 양상을 보이고 있다. 특히 하폭이 400 m를 넘는 경우에는 상대비가 1에 가까워 하상수리전도도의 크기에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 하폭이 넓은 중대규모 하천의 경우에는 하상수리전

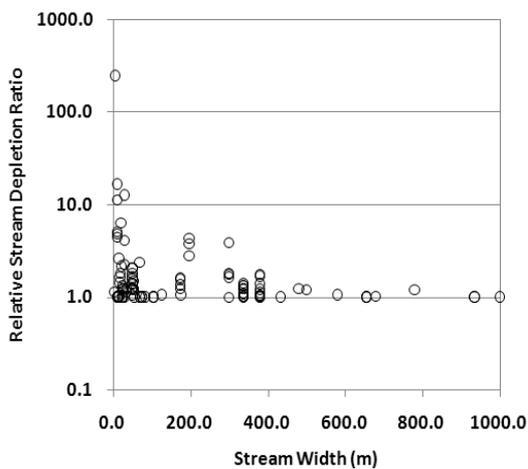


Fig. 10. Ratio of Stream Depletion for  $k_s = 1.0 \times 10^{-2}$  m/s to Stream Depletion for  $k_s = 1.0 \times 10^{-9}$  m/s

도도보다 하천-관정 이격거리, 대수층 수리상수 등 다른 인자들이 하천수 감소량의 크기나 시간적 변화를 결정하는데 더 지배적인 역할을 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 하천변에 실제로 위치한 지하수 관정 110개를 대상으로 Hunt (1999)의 해석해를 이용하여 지하수 양수로 인한 지하수위 및 하천수량에 미치는 영향을 분석하였으며, 다음과 같은 주요 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수리확산계수가 크고 하천과 관정간의 이격거리가 작을수록 지하수 양수로 인한 지하수위 강하 및 하천수 감소량이 급격하게 증가하는 양상을 나타내었으며, 특히 지하수위 저하가 일어나는 공간적인 한계인 영향거리라는 하천경계의 영향으로 비대칭적으로 왜곡된 분포 형상을 나타내었다.
- (2) 미세측 값인 하상수리전도도를  $1.0 \times 10^{-5}$  m/s로 가정하고 대상 관정 각각에 대해 지하수 양수량 대비 하천수 감소량을 계산한 결과 대부분의 관정에서 양수기간 5년 동안 평균적으로 양수량 대비 80%를 초과하여 양수 영향이 큰 것으로 분석되었다.
- (3) 하상수리전도도 값을 변경하면서 지하수위 강하량 및 하천수 감소량을 산정한 결과, 하상수리전도도가  $1.0 \times 10^{-9}$  m/s로 매우 작고 하천바닥인자 SBF가 1 보다 작은 경우에는 하천경계로 인한 지하수위의 공간적 분포에 미치는 영향이 미미하였으나, 그 이상의 조건에 대해서는 하천 존재의 영향이 크게 작용하여 관정에서 하천방향으로의 영향거리가 짧아져 비대칭적 지하수위 분포를 크게 유발하는 것으로 나타났다.
- (4) 하상수리전도도가  $k_s = 1.0 \times 10^{-7}$  m/s 이상이고 SDF가 100 보다 작은 조건에 대해서는 하천수 감소율이 80%를 초과하여 양수의 영향이 크게 발생하는 것으로 분석되었으나, 그 외의 조건에 대해서는 SDF 값만으로 하천 영향의 대소를 판별하기에 한계가 있는 것으로 분석되었다.
- (5) 하폭이 400 m를 넘는 경우에는 하상수리전도도 크기에 따른 하천수 감소율의 변화가 작은 것으로 나타나, 하폭이 넓은 중대규모 하천의 경우에는 하상수리전도도보다는 하천-관정 이격거리, 대수층 수리상수 등 다른 인자들이 하천수 감소량 크기를 결정하는데 더 지배적인 역할을 하는 것으로 추론되었다.

#### 감사의 글

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

## References

- Butler, J. J. Jr., 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, J. J. Jr., 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.
- Calver, A. (2001). "Riverbed permeabilities: Information from pooled data." *Ground Water*, Vol. 39, pp. 546-553.
- Glover, R. E. and Balmer, G. G. (1954). "River depletion from pumping a well near a river." *American Geophysical Union Transactions*, Vol. 35, No. 3, pp. 468-470.
- Han River Flood Control Office (2011). *Assessment of streamflow depletion according to groundwater withdrawals near stream*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- 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. (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.
- 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.
- Pattle Delamore Partners Ltd and Environment Canterbury (2000). *Guidelines for the Assessment of Groundwater Abstraction Effects on Stream Flow*, Environment Canterbury Technical Report R00/11.
- Singh, S. K. (2000). "Rate and volume of stream depletion due to pumping." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 336-338.
- Singh, S. K. (2005). "Rate and volume of stream flow depletion due to unsteady pumping." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 6, pp. 539-545.
- 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.