Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 36, No. 5: 769-777/ October, 2016
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.5.0769

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Water Engineering **수공학**

해석적 모형을 이용한 심부대수층 지하수 양수로 인한 하천수 감소량 분석

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

Evaluation of Stream Depletion from Groundwater Pumping in Deep Aquifer Using An Analytical Model

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the stream depletion from groundwater pumping in deep aquifer using the Ward and Lough's analytical solution (2011) which considers a two-layer leaky aquifer system. The calculated results for each pumping from the 110 wells beside streams showed a wide range of non-dimensional stream depletion, that is the streamflow depletion rate divided by the groundwater pumping rate, from lower than 0.1 to more than 0.9 on average for 5 years depending on the specific properties of well location. From the comparison with Hunt's solution (1999) of a single layer aquifer, the Ward and Lough's solution showed about 50% lower than the Hunt's solution due to the difference of hydraulic properties between the first and second layers as well as the lagged effect of vertical leakance. It was also found that the groundwater pumping has a minor effect on the stream depletion if the stream depletion factor (SDF) of the 1st layer is higher than about 1,000 or the SDF of the 2nd layer is higher than about 100, or the vertical leakance is smaller than 10^{-5} s^{-1}. Furthermore, in the present study, the variations of the stream depletion were assessed according to the magnitude of unmeasured hydraulic properties such as transmissivity and storage coefficient of the 1st layer, vertical hydraulic conductivity of the 2nd layer, the streambed hydraulic conductance.

Key words : Groundwater pumping, Stream depletion, Ward and Lough's analytical solution, Two-layer leaky aquifer

초 록

본 연구에서는 2층 누수대수층 시스템에 관한 Ward and Lough (2011)의 해석해를 이용하여 심부대수층 양수로 인한 하천수 감소량을 분석하였다. 하천변에 위치한 110개 지하수 관정 각각에 대해 양수량 대비 하천수 감소량을 산정한 결과 양수기간 5년 동안 작게는 0.1미만에서 크게는 0.8을 초과하여 관정 위치에 따라 큰 차이를 나타내었다. 단일 대수층 구조에 대한 Hunt (1999) 해석해 적용 결과와의 비교를 통해서 Ward and Lough (2011)의 해석해로 구한 하천수 감소량은 두 층의 수리특성의 상이함과 연직 방향 지체의 영향으로 평균적으로 약 50 % 만큼 작게 산정되었다. 충적층에 대한 하천고갈인자가 약 1,000 보다 크거나 암반층의 하천고갈인자가 100보다 큰 경우, 또는 연직 누수계수가 10^{-5} s^{-1} 보다 작을 경우에는 지하수 양수가 하천수 감소에 미치는 영향이 작은 것으로 분석되었다. 또한 미 측정값인 충적층의 투수량계수 및 저류계수, 충적층과 연결된 하천의 하상수리전도도, 암반층 연직수리전도도 등의 크기에 따른 하천수 감소량의 변동 특성을 평가하였다.

검색어 : 지하수 양수, 하천수 감소량, Ward and Lough 해석해, 2층 누수대수층 시스템

* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, 수석연구원
(**Corresponding Author** · Korea Institute of Civil engineering and building Technology · ljw2961@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 June 14, 2016/ **revised** July 5, 2016/ **accepted** July 15, 2016

Copyright ⓒ 2016 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

하천과 수리적으로 연결된 대수층에서 지하수를 장기간 양수할 경우 하천으로 유입되는 지하수 유출량의 감소 또는 하천수의 지하수계로의 유입 등으로 인해 하천수 감소(stream depletion)를 초래하게 되며, 그 크기와 시간적 변화는 대수층의 투수 및 저류 특성, 하상퇴적층의 투수성, 하천과 지하수 관정간의 거리 등에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 지속적이고 안정적인 하천수 이용 및 관리를 위해서는 지하수 개발·이용 위치에 따라 하천수량에 미치는 영향을 정량적으로 예측, 평가하여야 한다.

지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 산정하기 위해서는 현지에서 직접 실측하는 것이 가장 이상적이지만, 시간이나 비용 등 현실적인 측면을 고려해서 일반적으로 해석해 또는 수치모형을 이용하는 방법이 주로 이용되고 있으며, 특히 해석해를 이용하면 간편하고 신속한 지하수 양수 영향 평가가 가능하다.

Theis (1941)와 Glover and Balmer (1954)는 불투수 수평기저면(impermeable horizontal base)을 가진 대수층을 하천이 완전히 관통한 조건에 대해서 투수량계수, 저류계수, 양수시간, 하천-관정 이격거리 등을 입력변수로 하고 하천수 감소량을 양수량으로 나눈 무차원 하천수 감소량을 종속변수로 하는 해석해를 유도하였다. Hantush (1965)는 Theis (1941)와 Glover and Balmer (1954)의 조건에 추가로 하천과 대수층 사이에 가상의 연직 저투수층을 두어 하천바닥층의 지체(retardation) 영향을 고려한 해석해를 개발하였다. Hunt (1999)는 저투수성의 하천바닥층을 고려하고 하천이 대수층을 부분 관통한 보다 실제적인 조건에 대해 해석해를 유도하였다. 이 조건에 Zlotnik et al. (1999)은 하폭의 영향을 추가적으로 고려하였고, Butler et al. (2001)은 유한 폭(finite width)을 가진 하천과 대수층 조건에 대해 하천이 위치한 영역과 그 양쪽 영역별로 수리상수를 다르게 적용하여 대수층의 비균질성을 고려한 해석적 모형을 개발하였다.

2000년대 들어서면서부터 연직방향으로 복수의 층으로 구성된 누수 대수층 조건에 대한 해석해가 본격적으로 개발되었다. Hunt (2003)는 하천이 준대수층(aquitard)을 부분 관통하고 그 아래에 위치한 반피압대수층(semi-confined aquifer)에서 양수를 하는 조건에 대한 해석해를 유도하였고, 이후 Hunt (2008)는 유한 폭의 대수층 및 하천 조건에 대해 해석해를 다시 유도하였다. Butler et al. (2007)과 Zlotnik and Tartakovsky (2008)은 상, 하부대수층 사이에 준대수층이 존재하고 수두변화가 없다고 가정한 하부대수층을 공급원(source bed)으로 하는 조건에 대해 상부대수층 양수로 인한 하천수 감소량을 계산하는 해석해를 유도하였다. Hunt (2009)는 하부대수층의 수두변화 영향도 함께 고려한 상태에서 상부대수층 양수에 관한 해석해를 개발하였다. Ward and Lough (2011)는 Hunt (2009)의 방법을 도입하고 하부대수층 양수로 인한 수위저하 및 하천수 감소량을 계산하는 해석해를 유도하였고, Ward and Falle (2013)는 이를 확장하여 3개의 대수층과 각 층 사이에 준대수층이 위치한 경우 중간의 2층 대수층에서 양수하는 조건에 대한 해석해를 개발하였다.

이상과 같이 점차적으로 실제 상황에 보다 가깝게 하천-대수층 조건을 모형화하여 양수에 따른 하천수 감소량을 계산하기 위한 다양한 해석해가 개발되어왔다. 국내에서는 단일 대수층 조건에 대한 Hunt (1999)의 해석해를 적용하여 양수로 인한 하천수 감소량을 산정한 연구(Kim, 2010; Lee et al., 2016)가 일부 수행되었을 뿐, 다층의 누수 대수층 조건에 대한 해석해를 적용한 연구는 찾아보기 어렵다. 특히 하천 인근에서의 지하수 개발·이용 허가를 얻으려면 양수로 인해 하천수량에 미치는 영향을 사전에 검토하도록 법제화되어 있는데, 이 때 대부분의 검토 대상 관정이 충적층 보다는 심부의 암반층에 위치해 있어 심부대수층 양수로 인한 하천수 감소에 미치는 영향 분석이 수반되어야 한다. 이를 위해서 기 개발된 여러 다양한 해석해들 중에서 2층 누수대수층 구조 및 심부대수층 양수 조건에 대해 유도된 Ward and Lough (2011) 해석해가 국내 실무에서 유용하게 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Ward and Lough (2011)의 해석해를 소개하고, 이를 하천 인근에 실제로 위치한 지하수 관정에 적용하여 양수로 인한 하천수 감소량을 산정하고 그 거동 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

2. 이론적 배경 및 분석 대상

2.1 Ward and Lough (2011) 해석해

Ward and Lough (2011)는 Fig. 1과 같이 두 개의 대수층 사이에 준대수층(aquitard)이 있는 누수대수층에 대해 하부 2층 양수로 인한 지하수위 강하량과 하천수 감소량을 계산하는 해석해를 유도하였다.

Eqs. (1) and (2) 같이 1, 2층의 지하수위 강하량을 미지수로 하고, 하천수 유입의 생성항, 지하수 양수의 소멸항, 그리고 각 대수층간 상호작용항을 가진 연립 지하수 유동방정식을 지배방정

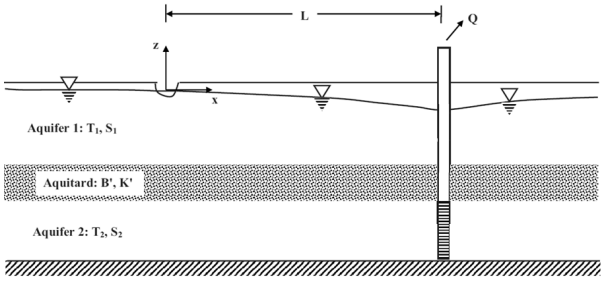


Fig. 1. Definition Sketch for Ward and Lough (2011) Solution

식으로 하고 있다.

$$T_1\left(\frac{\partial^2 s_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 s_1}{\partial y^2}\right)= S_1\frac{\partial s_1}{\partial t}+\frac{K^{'}}{B^{'}}(s_1-s_2)+\lambda\delta(x)s_1 \quad (1)$$

$$T_2\left(\frac{\partial^2 s_2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 s_2}{\partial y^2}\right)= S_2\frac{\partial s_2}{\partial t}+\frac{K^{'}}{B^{'}}(s_2-s_1)-Q\delta(x-L)\delta(y) \quad (2)$$

여기서, T는 투수량계수, S는 저류계수, s 는 수위강하량, 아래첨자 1, 2는 각각 상부와 하부대수층을 나타내며, $K^{'}$는 준대수층의 수리전도도, $B^{'}$는 준대수층 두께, Q는 양수량, δ는 Direc delta 함수, L은 하천과 양수정간 거리, 그리고, λ는 하상수리전도성(streambed hydraulic conductance)으로 하상수리전도도(streambed hydraulic conductivity) K_s와 하폭 W의 곱을 하천바닥층 두께 M으로 나눈 값이다.

지배방정식 Eqs. (1) and (2)를 Eq. (3)으로 표현된 무차원 변수를 사용하여 다시 나타내면 Eqs. (4) and (5)와 같은 무차원 방정식이 된다.

$$(s_1^*,s_2^*,x^*,y^*,t^*,T^*,S^*,K^*,\lambda^*,Q^*) \quad (3)$$
$$=\left(\frac{s_1T_2}{Q},\frac{s_2T_2}{Q},\frac{x}{L},\frac{y}{L},\frac{tT_2}{S_2L^2},\frac{T_1}{T_2},\frac{S_1}{S_2},\frac{(K^{'}/B^{'})L^2}{T_2},\frac{\lambda L}{T_2},\frac{\triangle Q}{Q}\right)$$

$$T^*\left(\frac{\partial^2 s_1^*}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^2 s_1^*}{\partial y^{*2}}\right)= S^*\frac{\partial s_1^*}{\partial t^*}+K^*(s_1^*-s_2^*)+\lambda^*\delta(x^*)s_1^* \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 s_2^*}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^2 s_2^*}{\partial y^{*2}}= \frac{\partial s_2^*}{\partial t^*}+K^*(s_2^*-s_1^*)-\delta(x^*-1)\delta(y^*) \quad (5)$$

Ward and Lough (2011)는 Eqs. (4) and (5)와 같은 무차원항으로 표현된 편미분 방정식을 무차원 시간 변수 t^*에 대해 Laplace 변환, 무차원 공간 변수 y^*에 대해 Fourier 변환을 수행하여 상미분 방정식으로 나타내고, 초기 수위강하량과 무한경계부에서의 수위강하량이 0이라는 조건을 부여하여 무차원 수위강하량 s_1^*, s_2^*와 무차원 하천수 감소량 Q^*에 관한 해석해를 유도하였다. Eq. (6)은 하천수감소량을 양수량으로 나눈 무차원 하천수 감소량에 관한 해석해를 나타낸 것이다.

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

여기서, ΔQ는 하천수 감소량, Q는 양수량, $\mathcal{L}^{-1}$는 라플라스 역변환을 나타내며, 기타 변수들은 다음 Eqs. (7)~(10)과 같다.

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

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

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

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

이상과 같이 Ward and Lough (2011)의 해석해를 사용하기 위해서는 1, 2층의 투수량계수, 저류계수, 준대수층 수리전도도 및 두께, 하천바닥 저투수층의 수리전도도 및 두께 등의 입력 값이 필요하며, 특히 양수량 대비 하천수 감소량을 구하기 위해서는 수치적인 라플라스 역변환 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 Eq. (6)을 계산하기 위해 일련의 과정을 전산프로그램화하였다.

2.2 분석 대상

본 연구에서는 Lee et al. (2016)의 논문에서의 분석 대상과 동일한 110개 지하수 관정에 대해 Ward and Lough (2011)의 해석해를 이용하여 하천 인근 암반대수층 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 산정하고 그 거동 특성을 분석하였다. 충적대수층과 암반대수층의 2개의 층으로 구분하였고, Eq. (6)을 적용하기 위해 필요한 암반대수층의 투수량계수, 저류계수는 각 관정별 해당 지하수영향조사서에서 양수시험을 통해 기조사된 값을 사용하였으며, 미측정값인 충적대수층의 투수량계수는 암반대수층과 같고 저류계수는 0.1이라 가정하였다. 하상수리전도성 λ 값을 입력하기 위해서 지도상에서 하폭을 도측하고 Lee et al. (2016)에서와 마찬가지로 미측정값인 단위길이당 하상수리전도도 k_s/M값을 1.0×10^{-5} 1/s로 가정하였다. 각 관정의 주상도에 따르면 충적층과 암반층 사이에 저투수층이 존재하지 않으며, 따라서 본 연구에서는 Eq. (11)과

같이 McDonald and Harbaugh (1988)가 제시한 1층과 2층이 연결된 조건에 대한 누수계수 근사화 방법을 적용하여 K'/B' 을 산정하였다.

$$K'/B' = \frac{1}{\frac{B_1/2}{K_{v1}} + \frac{B_2/2}{K_{v2}}} \cong \frac{1}{\frac{B_2/2}{K_{v2}}} \quad \text{for} \quad K_{v1} \gg K_{v2} \tag{11}$$

여기서, B_1과 B_2는 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. 2는 지하수 관정의 양수 위치에서의 투수량계수와 저류계수를 나타낸 것이다. 투수량계수는 0.2~242.0 m^2/d의 범위로 평균 10.6 m^2/d의 값을 가지며, 저류계수는 0.0001~0.108로 관정별로 차이가 크고 평균적으로 0.022의 값을 나타내었다.

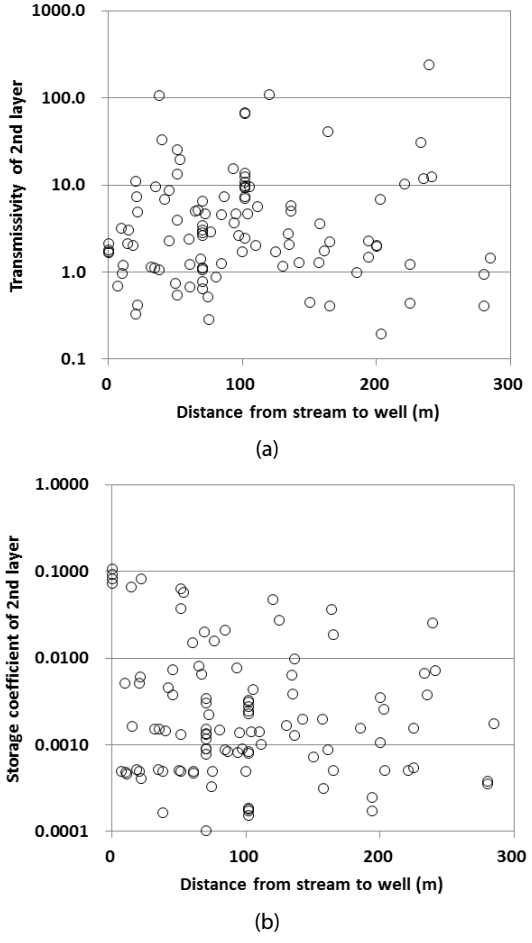


Fig. 2. Transmissivities and Storage Coefficients for Wells

3. 결과 및 고찰

3.1 하천수 감소량 산정

Ward and Lough (2011)의 해석해를 분석 대상 관정에 각각 적용하여 지하수 양수량 대비 하천수 감소량의 비인 무차원 하천수 감소량(이하 하천수 감소비)을 산정하고 그 결과를 Fig. 3에서 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 3은 관정 6번과 54번에 대해 하천수 감소비의 시간적 변화를 계산하여 그림으로 나타낸 것이다. 연직방향 지체의 영향을 검토하기 위해서 대수층을 균질의 단일층에 대한 Hunt (1999)의 해석해를 적용한 결과도 함께 도시하였다. 그림에서 실선은 Ward and Lough (2011) 해석해 적용 결과를, 점선은 Hunt (1999) 해석해 적용 결과를 나타낸 것이며, 진한 선은 관정 6번, 흐린 선은 관정 54번에 대한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 관정 6번 지하수 양수로 인한 하천수 감소가 관정 54번에 비해 빠르게 일어나고 있다. 이는 Table 1에 나타낸 바와 같이 관정 6번이 관정 54번에 비해 하천과의 이격거리가 짧고, 1, 2층의 수리확산계수(hydraulic diffusivity, $D = T/S$)가 커서 하천과 대수층간 수리적 연결성이 크며, 하상의 투수성과 1, 2층간 연직 누수계수가 더 커서 지체 영향이 작아지는 등 지하수 양수로 인한 영향이 하천에 보다 빨리 도달하는데 유리한 조건을 가지기 때문이다. 또한 1층과 2층으로 구분하고 층간의 연직방향 지체의 영향을 고려한 Ward and Lough (2011) 해석해 적용 결과가 Hunt (1999)의 해석해 적용 결과보다 양수에 대한 반응이 둔하며, 특히 관정 54번과 같이 층간 누수계수가 매우 작은 경우 하천수 감소비가 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

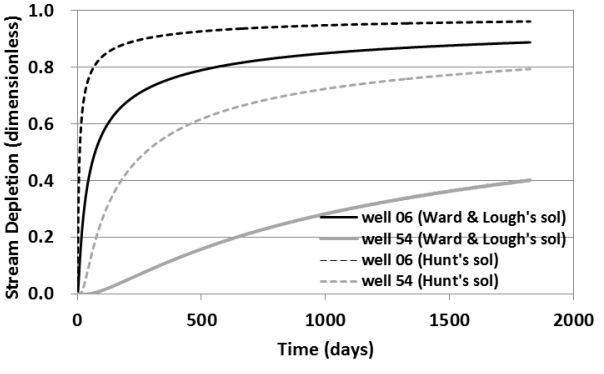


Fig. 3. Stream Depletion for Well 6 and Well 54

Table 1. Hydraulic Properties for Well 6 and Well 54

Well No.	l (m)	T_1/S_1 (m^2/d)	T_2/S_2 (m^2/d)	λ (m/s)	K'/B' (1/s)
6	53.0	197.7	334.5	170.0	2.9×10^{-3}
54	125.0	17.5	62.6	89.9	4.7×10^{-5}

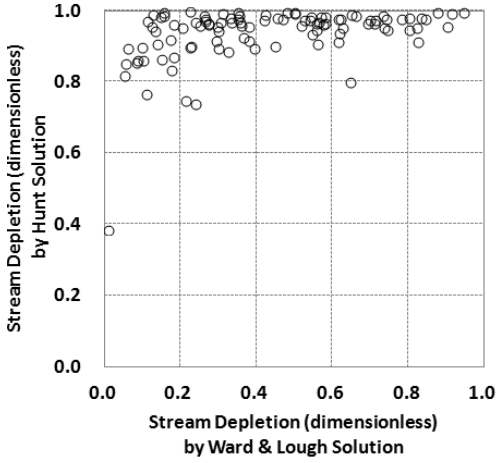


Fig. 4. Comparison of Dimensionless Stream Depletions for 5-Year Pumping Estimated by Ward and Lough (2011) and Hunt (1999) Solutions

Fig. 4는 분석 대상 관정 각각에 대해 Ward and Lough (2011) 및 Hunt (1999)의 해석해로 하천수 감소비를 산정하고 양수기간 5년 동안 평균하여 그 결과를 일대일로 도시한 것이다. 충적층과 암반층 수리특성의 이질성과 층간 연직방향 지체의 영향으로 Ward and Lough (2011) 해석해로 산정한 결과가 Hunt (1999) 해석해 적용 결과에 비해 변동폭이 매우 큰 것을 알 수 있으며, 관정 전체의 평균값이 약 50% 만큼 작게 산정되었다. 따라서 Hunt (1999) 해석해는 충적 및 암반층간 수리특성의 차이가 크지 않은 곳에서만 적용하는 것이 바람직하며, 상부와 하부대수층간 수리적 이질성을 고려하는 Ward and Lough (2011) 해석해를 이용하여 암반층 양수로 인한 하천수량에 미치는 영향을 예측하고자 할 경우에는 실무에서 암반층의 수리상수 뿐만 아니라 충적층의 수리상수도 함께 추정토록 유도해야 할 것이다.

분석 대상 관정 각각에 대해 양수기간 5년 평균 무차원 하천수 감소량을 산정하고 하천고갈인자(Stream Depletion Factor, SDF) 및 연직누수계수값 범위에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 하천과 관정 간의 이격거리의 제곱 l^2을 수리확산계수(T/S)로 나눈 값인 하천고갈인자는 지하수 양수의 영향 정도의 크고 작음을 판별하는 지표로 많이 사용되는 것으로 이 값이 100 보다 큰 경우 하천수 감소에 미치는 영향이 작다고 알려져 있다(Environment Canterbury, 2000). 하천고갈인자가 증가함에 따라 하천수 감소비가 감소하는 양상을 나타내고 있으며, Fig. 5(a)와 같이 충적층에 대한 하천고갈인자가 약 1,000 보다 큰 경우 하천수 감소비가 0.4 보다 작고, Fig. 5(b)와 같이 암반층의 경우는 약 100보다 큰 경우 일부 관정을 제외하고 하천수 감소비가 0.2 보다 작아 하천수량에 미치는 지하수 양수의 영향이 작은 것으로 분석되었다. 연직 누수계수가 작아짐에 따라 하천수 감소비가 현저하게 줄어드는 등 1층과 2층 사이의

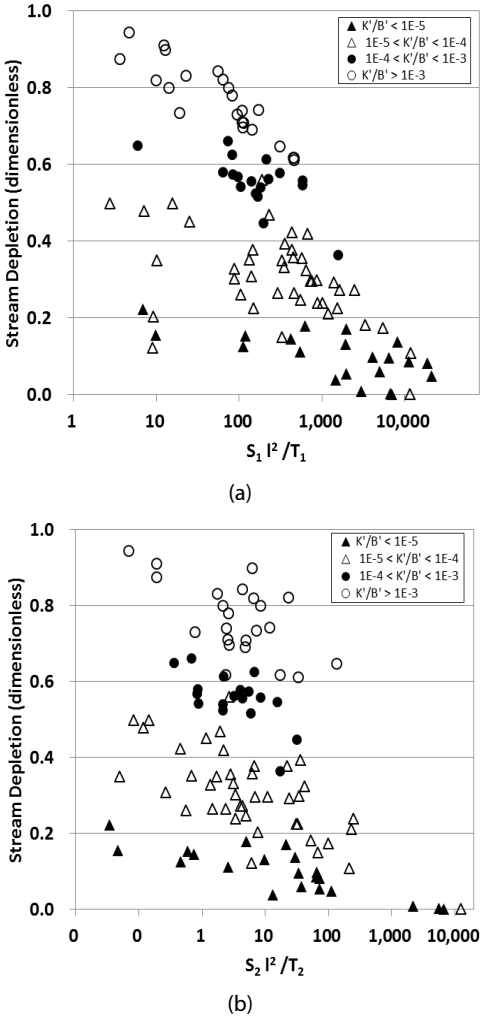


Fig. 5. Stream Depletion according to Stream Depletion Factor and Vertical Leakance

수리적 연결성이 하천수 감소 정도에 지배적인 영향 인자인 것으로 나타났다. 특히 연직 누수계수 값이 $1.0\times10^{-5}\ 1/s$ 보다 작은 경우에는 하천고갈인자의 크기와 상관없이 하천수 감소에 미치는 영향이 매우 작은 것으로 분석되었다.

하상수리전도성 λ는 하천과 대수층간의 수리적 연결성을 나타내는 척도로서 일반적으로 이 값이 클수록 지하수 양수로 인한 하천수 감소에 미치는 영향이 커진다. Fig. 6은 양수기간 5년 평균 하천수 감소비를 하상수리전도성에 따라 나타낸 것으로 관정 전체를 대상으로 하면 뚜렷한 상관성을 보이고 있지 않으나, 채워진 원형 심볼로 표시된 것처럼 연직 누수계수값이 $1.0\times10^{-5}\ 1/s$ 보다 작은 경우에 대한 결과를 제외하면, 하상수리전도성이 커질수록 하천수 감소비가 전반적으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 하상수리전도성이 800 m/d을 초과하여 매우 큰 값을 가지더라도 층간 누수계수가 $1.0\times10^{-5}\ 1/s$ 보다 작은 경우에는 하천수 감소비가

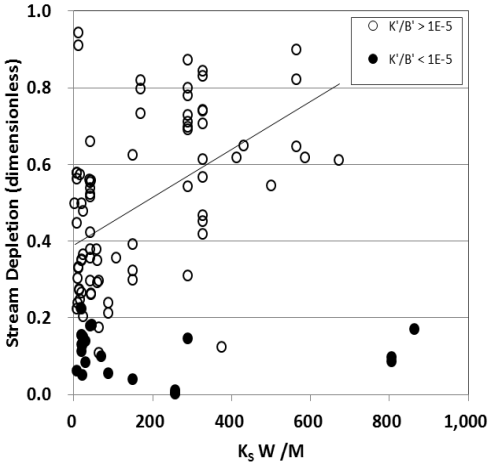


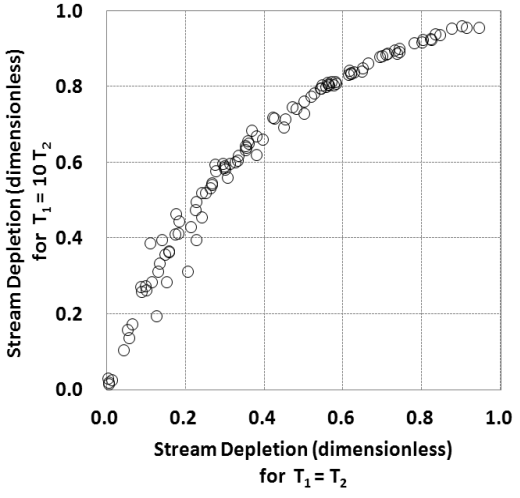
Fig. 6. Stream Depletion according to Streambed Hydraulic Conductance and Vertical Leakance

작게 산정되는 등 2층의 누수대수층 구조에 대해서는 하상수리전도성 뿐만 아니라 누수계수의 영향이 매우 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 특히 본 연구에서와 같이 누수계수를 암반층의 수리전도도의 함수로 나타내었기에 암반층 두께에 비해 수리전도도가 매우 작은 경우가 이에 해당된다고 할 수 있다.

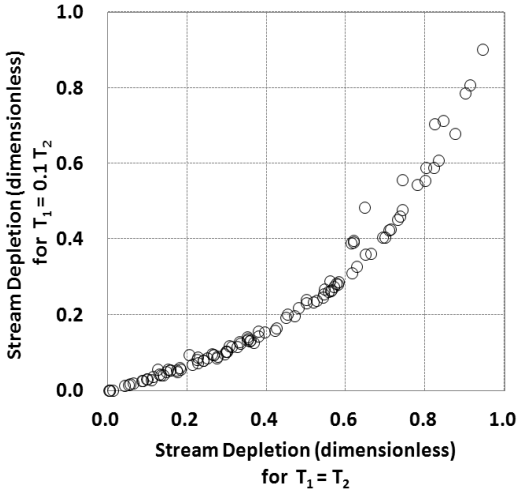
3.2 미측정 수리특성값 영향 분석

3.1절에서 사용한 입력변수값 및 그 결과를 기준(base case)으로 하고, 충적대수층 투수량계수 및 저류계수, 단위깊이당 하상수리전도도, 암반층 연직수리전도도 등 미측정 수리특성값들의 크기 변화에 따른 하천수 감소비의 상대적 변화를 분석하였다. 1층 충적층의 투수량계수는 기준 조건의 1/10, 1, 10배, 저류계수는 0.05, 0.1, 0.2, 단위깊이당 하상수리전도도는 1.0×10^{-7}, 1.0×10^{-5}, 1.0×10^{-3} 1/s, 2층 암반층의 수직수리전도도는 수평수리전도도의 1/10, 1배로 하여 총 54가지 경우의 수에 대해서 Ward and Lough (2011)의 해석해로 하천수 감소량을 산정하였다.

Fig. 7(a)는 1층 투수량계수를 2층 투수량계수와 같게 놓은 경우와 10배 크게 한 경우에 대해 대상 관정별로 시간에 따른 양수량 대비 하천수 감소량을 산정하고 이를 5년 평균하여 일대일로 도시한 것이다. 기준 시나리오에 대한 하천수 감소비(횡축)가 0.3보다 작은 경우에서는 투수량계수를 10배 증가로 인해 하천수 감소비(종축)가 2배 이상 커졌으며, 하천수 감소비가 큰 관정일수록 투수량계수 증가에 따른 하천수 감소비의 증가가 둔화된 것을 알 수 있다. 평균적으로 하천수 감소비가 0.41에서 0.62로 0.21 만큼 증가한 것으로 분석되었다. Fig. 7(b)는 1층 투수량계수를 2층 투수량계수와 같게 한 경우와 1/10배 줄인 경우에 대한 5년 평균 하천수 감소비 산정 결과를 비교한 것으로 횡축의 하천수 감소비가



(a) $T_1 = 10\,T_2$ vs $T_1 = T_2$

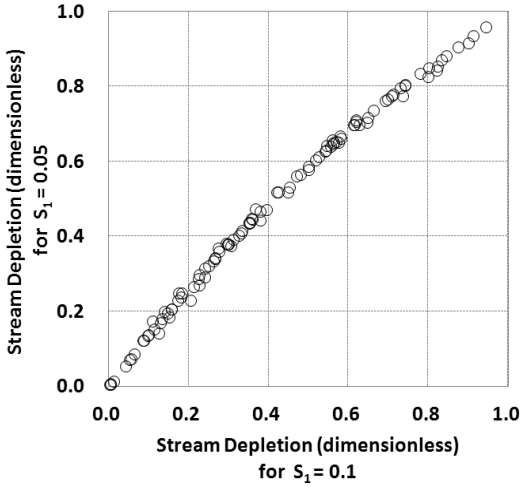


(b) $T_1 = 0.1\,T_2$ vs $T_1 = T_2$

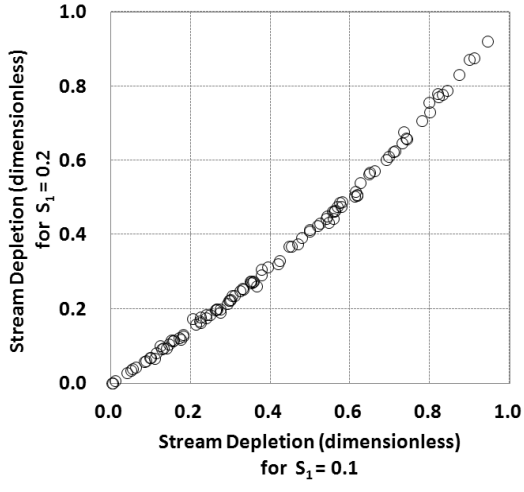
Fig. 7. Comparison of Dimensionless Stream Depletions for 5-Year Pumping according to Transmissivity of 1st Layer

0.6 보다 작은 경우 투수량계수 감소의 영향이 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 평균적으로 기준 조건에 대한 하천수 감소비 0.41에서 0.22로 줄어 0.19 만큼 감소하였다. 따라서 1층과 2층의 투수량계수의 비가 십의 일승(1 order) 차이가 날 때 하천수 감소율이 약 0.20 증감하는 것으로 분석되었다.

Fig. 8(a)는 1층 저류계수를 기본 조건일 때의 값인 0.1인 경우와 그 크기를 반으로 줄인 경우에 대해 5년 평균 하천수 감소비를 산정하여 함께 도시한 것으로 서로 작은 차이를 나타내고 있으며 평균적으로 하천수 감소비가 0.41에서 0.47로 0.06 만큼 약간 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 8(b)는 저류계수를 0.1보다 2배 크게 한 경우의 결과로서 평균적으로 하천수 감소비가 0.41에서 0.34로 0.07 만큼 감소하였다. 따라서 충적층 저류계수가 2배 증가

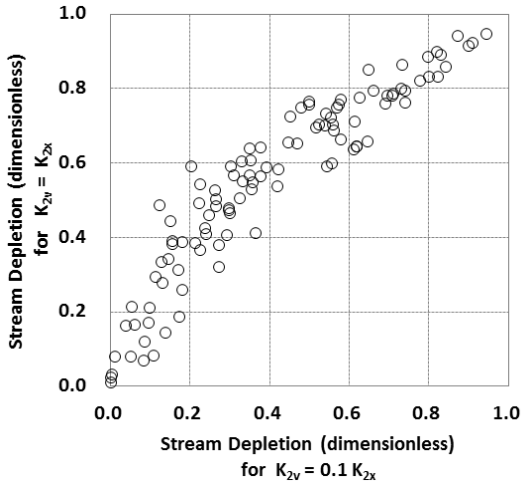


(a) $S_1 = 0.05$ vs $S_1 = 0.1$

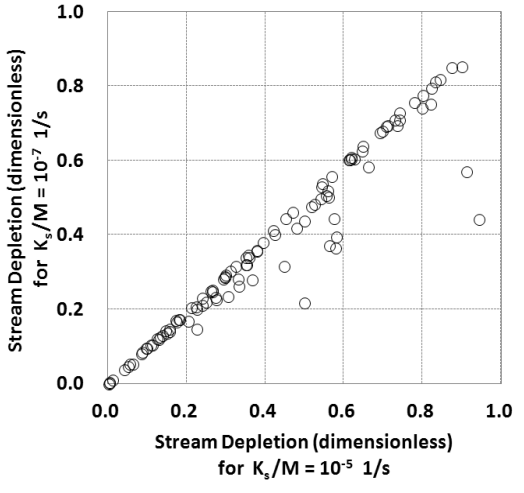


(b) $S_1 = 0.2$ vs $S_1 = 0.1$

Fig. 8. Comparison of Dimensionless Stream Depletions for 5-Year Pumping according to Storage Coefficient of 1st Layer



(a) $K_{2v} = K_{2x}$ vs $K_{2v} = 0.1K_{2x}$



(b) $K_s/M = 10^{-7}\ 1/s$ vs $K_s/M = 10^{-5}\ 1/s$

Fig. 9. Comparison of Dimensionless Stream Depletions for 5-Year Pumping according to Vertical Hydraulic Conductivity of 2nd Layer and Streambed Hydraulic Conductivity

또는 감소함에 따라 하천수 감소율이 약 0.06~0.07 만큼 비교적 작은 변화를 나타내는 것으로 분석되었다.

Fig. 9(a)는 2층 암반층의 연직수리전도도를 수평수리전도도의 0.1배(기준) 및 1배로 하였을 때의 무차원 하천수 감소량을 함께 도시한 것으로 작게는 0.01 크게는 0.3 만큼의 차이가 나는 등 관정에 따라 그 변화 정도가 크게 나타났다. 평균적으로 0.14 만큼의 차이가 발생하여 암반층의 연직수리전도도 즉, 1층과 2층간의 누수계수가 한 오더 차이가 날 때 하천수 감소량이 약 0.14 만큼 증감하는 것으로 분석되었다. Fig. 9(b)는 단위깊이당 하상수리전도도 크기에 따른 하천수 감소비를 도시한 것으로 하폭이 작아 하상수리전도성이 매우 작은 일부 관정에서는 하상수리전도도 크기에 따라 큰 차이를 나타내고 있으나, 그 외 대부분의 관정에서는 하상수리전도도 크기에 따른 변화가 작게 나타나고 있다. 단위깊이당 하상수리전도도를 1.0×10^{-5} 에서 1.0×10^{-7} $1/\mathrm{s}$로 십의 이승만큼 줄였음에도 불구하고 하천수 감소비의 변화가 평균적으로 0.04로 매우 작게 줄어드는 것으로 분석되었다.

Table 2는 관정 각각에 대해 1층 충적층의 투수량계수 및 저류계수, 2층 암반층의 수직수리전도도, 하상수리전도도 값에 따른 Ward and Lough (2011)의 해석해로 산정한 5년 평균 무차원 하천수 감소량을 평균하여 정리한 것이다. 표에서 밑줄과 진하게 표기된 값은 Figs. 3~6과 같은 기준 조건(base case)에 대한 결과의 평균치이고, 진하게 표기된 값은 Figs. 7~9의 평균치를 나타낸 것이다. 총 54가지 경우의 하천수 감소비 평균치는 0.46으로 산정되었으며, 최대치는 0.81로 기준값(base case) 0.41에 비해 0.40만큼 증가하

Table 2. Variations of Dimensionless Stream Depletions for 5-Year Pumping according to Hydraulic Properties of Aquifers and Streambed

Hydraulic Properties		$K_{2v} = 0.1K_{2x}$			$K_{2v} = K_{2x}$			Average	
		$T_1=0.1T_2$	$T_1=T_2$	$T_1=10T_2$	$T_1=0.1T_2$	$T_1=T_2$	$T_1=10T_2$		
$Kr/M = 1\times10^{-3}$	$S_1 = 0.05$	0.28	0.48	0.67	0.42	0.62	0.81	0.55	0.49
	$S_1 = 0.10$	0.22	**0.41**	0.62	0.35	0.56	0.77	0.49	
	$S_1 = 0.20$	0.18	0.35	0.56	0.28	0.48	0.71	0.43	
$Kr/M = 1\times10^{-5}$	$S_1 = 0.05$	0.28	**0.47**	0.67	0.42	0.62	0.81	0.55	0.48
	$S_1 = 0.10$	**0.22**	**0.41**	**0.62**	0.35	**0.55**	0.76	0.49	
	$S_1 = 0.20$	0.18	**0.34**	0.56	0.28	0.47	0.70	0.42	
$Kr/M = 1\times10^{-7}$	$S_1 = 0.05$	0.26	0.44	0.57	0.40	0.57	0.69	0.49	0.42
	$S_1 = 0.10$	0.21	**0.37**	0.51	0.33	0.50	0.62	0.42	
	$S_1 = 0.20$	0.16	0.30	0.43	0.25	0.41	0.54	0.35	
Average		0.22	0.40	0.58	0.34	0.53	0.71	0.46	
		0.40			0.53				

였고, 최소치는 0.16로 기준값에 비해 0.25만큼 감소하였다. 단위깊이당 하상수리전도도가 작고 저류계수가 커질수록 투수량계수 변화에 따른 영향이 다소 줄어들고는 있느나 투수량계수가 십의 일승만큼 변할 때 평균적으로 하천수 감소비가 약 0.18 증감하는 것으로 분석되었다. 또한 저류계수가 2배 변할 때 평균적으로 0.06~0.07 증감하였고, 연직 누수계수에 영향을 미치는 2층 수리전도도가 십의 일승만큼 커질 경우 평균적으로 약 0.13 증가하는 것으로 나타났다. 단위깊이당 하상수리전도도가 1.0×10^{-5} 1/s 에서 1.0×10^{-7} 1/s로 십의 이승만큼 작아질 경우 약 0.06 만큼 하천수 감소비가 줄어들었으나, 1.0×10^{-5} 1/s 보다 큰 경우에는 이 값 변화에 따른 하천수 감소비의 변화가 거의 나타나고 있지 않는 것으로 분석되었다. 이는 하상수리전도성이 커질수록 하천수 감소량이 커지는 양상을 보이지만 일정 값 이상에서는 그 증가 정도가 둔화됨을 의미한다.

이상과 같이 심부대수층 양수로 인한 하천수 감소량은 천부 및 심부대수층간의 상호관계에 따라 다양하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 암반층 지하수 양수가 하천수량에 미치는 영향을 정밀하게 예측, 평가하기 위해서는 암반층에 국한하던 기존의 대수성 시험을 충적층에 대해서도 수행하고, 또한 하천과 대수층간의 수리적 연결성 척도인 하상수리전도도 측정 시험도 병행할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Ward and Lough (2011)가 유도한 누수대수층-하천-양수정 경계치 문제에 대한 해석해를 하천 인근에 실제로 존재하는 관정 110개에 적용하여 암반층 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 산정하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 지하수 양수량 대비 하천수 감소량의 시간적 변화는 충적층과 암반층의 투수량계수 및 저류계수, 두 층간의 누수계수, 대수층과 연결된 하상수리전도도, 하천과 관정간의 이격거리 등 관정이 위치한 곳의 수리특성에 따라 다양하게 나타남을 확인할 수 있었다. 특히 누수계수가 매우 작은 경우 양수에 대한 시간적 반응이 현저하게 줄어드는 등 연직방향 지체의 영향을 고려한 Ward and Lough (2011) 해석해로 각 관정별로 계산한 양수기간 5년 평균 하천수 감소량은 균질의 단일층에 대한 Hunt (1999)의 해석해 적용 결과에 비해 평균적으로 약 50% 작게 산정되었다.

(2) 양수기간 5년 동안 평균적인 하천수 감소량은 충적층에 대한 하천고갈인자가 약 1,000 보다 큰 경우 양수량 대비 40% 미만이고 암반층의 경우는 약 100보다 큰 경우 대부분 20% 미만으로 지하수 양수의 영향이 작은 것으로 분석되었다. 또한 충적과 암반층간 수리적 연결성의 척도인 연직 누수계수가 $1.0\times10^{-5}\,1/s$ 보다 큰 경우에는 하상수리전도성이 커질수록 하천수 감소량이 증가하는 양상을 나타내었으며, 연직 누수계수가 $1.0\times10^{-5}\,1/s$ 보다 작은 조건일 때에는 양수량 대비 하천수 감소량이 대부분 0.2 보다 작아 양수 영향이 매우 작은 것으로 분석되었다.

(3) 미 측정값인 충적층의 투수량계수 및 저류계수, 충적층과 연결된 하천의 하상수리전도도, 암반층 연직수리전도도 등의 크기에 따른 총 54가지 경우에 대해 무차원 하천수 감소량을 산정한 결과 평균 0.46, 최대 0.81, 최소 0.16로 조건에 따라 큰 변동

특성을 나타내었다. 암반층 수리전도도 및 충적층 투수량계수를 10배만큼 증감시킬 경우 관정 전체 평균치가 각각 0.13 및 0.18 만큼 변하였으며, 충적층 저류계수를 2배 증감시켰을 때에는 평균적으로 0.06~0.07 증감하였다. 또한, 하상수리전도도를 10^{-5} 1/s에서 100배만큼 줄일 경우 0.06 만큼 줄어들었으나, 10^{-5} 1/s 보다 크게 한 경우에는 이 값 변화에 따른 하천수 감소량의 증가가 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

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.

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.

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.

Lee, J., Chung, I. M., Kim, N. W. and Lee, M. H. (2016). "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.

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.

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 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, M. (2008). "Stream depletion by groundwater pumping in leaky aquifers." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 43-50.