



## Evaluation of long-term stream depletion due to cyclic groundwater pumping using analytical model

Lee, Jeongwoo<sup>a\*</sup> · Chung, Il-Moon<sup>b</sup> · Kim, Nam Won<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>b</sup>Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>c</sup>Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 19-027

Received: 13 May 2019; Revised: 24 June 2019; Accepted: 24 June 2019

### Abstract

An analytical model was developed to estimate the stream depletion due to cyclic groundwater pumping by extending the Hunt's analytical solution which was derived from considering the hydraulic characteristics of the aquifer and the streambed. The model was applied to analyze the long-term effects of groundwater pumping on stream depletion during irrigation season. For the case of a total of 1,500 conditions according to various aquifer and streambed hydraulic characteristics and stream-well distance, the stream depletion due to cyclic groundwater pumping for 10 years was calculated and the results were graphically represented. Especially, the maximum and average stream depletion rates were calculated and compared with the results for continuous groundwater pumping. Furthermore, considering both stream depletion and return flow rates, the limit hydraulic condition that minimizes the influence of groundwater pumping for irrigation water supply on stream depletion was suggested.

**Keywords:** Hunt analytical solution, Cyclic groundwater pumping, Stream depletion rate, Limit hydraulic condition

## 해석적 모형을 이용한 주기적 지하수 양수가 하천의 수량에 미치는 장기 영향 분석

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

<sup>a</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원, <sup>b</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원,

<sup>c</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

### 요 지

대수층과 하상의 수리특성을 고려하여 유도된 Hunt 해석해에 영상정과 중첩원리를 적용하여 양수 및 중단을 반복하는 주기적 지하수 양수로 인한 하천수 감소량을 산정할 수 있는 해석적 모형을 개발하고, 이를 활용하여 관개기 지하수 양수에 따른 하천수량에 미치는 장기 영향을 분석하였다. 대수층과 하상의 다양한 수리특성값과 하천-관정 이격거리 조합에 따라 총 1,500 가지 조건에 대해 10년 양수시 하천수 감소량을 산정하고 그 결과를 도시적으로 나타내었으며, 특히 양수기간동안 최대 및 평균 하천수 감소율의 거동 특성을 연속적인 양수의 결과와 비교, 분석하였다. 또한, 하천수 감소율과 농업용수 회귀율을 함께 고려하여 하천수량 측면에서 관개기 지하수 양수 영향을 최소화할 수 있는 한계수리조건을 제시하였다.

**핵심용어:** Hunt 해석해, 주기적 지하수 양수, 하천수 감소율, 한계수리조건

\*Corresponding Author. Tel: +82-32-910-0529  
E-mail: ljw2961@kict.re.kr (J. Lee)

### 1. 서론

하천 주변에서 지하수를 취수할 경우 하천으로의 지하수 유출량 감소(reduced discharge) 또는 대수층으로의 유도함양(induced recharge)을 일으켜 하천의 수량에 영향을 미친다. 따라서 하천과 하천 인근 지하수의 효율적 이용·관리를 위해서는 지하수 취수와 하천의 수량 변화간의 상호관계를 파악하는 것이 중요하다. 특히 농업가뭄대책의 일환으로 비상용수 확보를 위해 하천 주변에 지하수 관정 신규 개발이 증가하고 있어 지하수 취수로 인한 영향 예측이 필요하다.

연속적인 지하수 양수로 인해 하천의 수량이 얼마나 감소하는지를 간편하게 예측하기 위해서 다양한 해석적 모형(Theis, 1941; Glover and Balmer, 1954; Hantush, 1965; Jenkins, 1968; Hunt, 1999)이 개발되었다. Theis (1941)는 반무한(semi-infinite) 균질(homogeneous) 대수층에 대해서 하천과 양수정이 대수층 바닥을 완전 관통한 경우 지하수 양수량 대비 하천수 감소량(이하 하천수 기여율)을 계산하는 해석해를 최초로 유도하였다. Glover and Balmer (1954)는 적분형태의 Theis (1941) 해석해를 여오차함수(complementary error function)를 사용하여 다시 나타내었고, Hantush (1965)는 여기에 하상의 준투수층(semi-pervious layer)을 추가로 고려한 해석해를 개발하였다. Jenkins (1968)는 Glover and Balmer (1954) 해석해를 쉽게 사용할 수 있도록 여러 조건에 대해 하천수 기여율과 하천수 감소체적을 계산하고, 양수정과 하천간의 거리를 제공하고 수리확산계수로 나눈 값인 하천고갈인자(Stream Depletion Factor, SDF)와 시간에 따라 도시적으로 나타내었다. Hunt (1999)는 양방향 무한대수층에 대해서 하천의 규모가 매우 작고 대수층을 일부 관통한 조건에 대해 대수층과 하상의 수리상수를 입력변수로 하는 해석해를 개발하였다.

Jenkins (1968)은 지하수 양수 중단 후에도 하천수량에 미치는 영향이 지체되어 나타나는 잔류효과(residual impact)가 나타날 수 있음을 보였고 비균일(non-uniform) 양수에 대해 고찰하였다(Darama, 2001). Wallace *et al.* (1990)과 Darama (1991)은 Glover and Balmer (1954) 해석해를 기반으로 중첩

원리(principle of superposition)를 적용하고 잔류효과를 고려하여 주기적인 양수(cyclic pumping)에 따른 하천수 감소량을 산정하는 해석해를 개발하였다. 또한 장기간 양수 후 평형상태에 도달하는 시간을 결정하는 방법을 제안하고 그 적용 결과를 도시적으로 나타내었다. Darama (2001)는 하상의 준투수층을 고려한 Hantush (1965)의 해석해를 이용하여 주기 양수에 대한 하천수 감소량 산정식을 제시하였다. 이러한 연구들은 하천과 양수정이 대수층 바닥까지 완전 관통한 조건에 대한 주기 양수의 영향을 분석한 것으로 하천이 대수층을 일부 관통한 조건과 같이 보다 실제적인 조건에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 Hunt (1999)의 해석해를 확장하여 주기 양수에 따른 하천수 감소량을 산정하는 해석적 모형을 개발하고, 이를 이용하여 대수층 및 하상 수리특성변수의 다양한 조건에 대해 관개기 4월~9월 지하수 양수에 따른 장기간 영향을 분석하였다. 또한, 하천수 감소량과 농업용수 회귀율을 함께 고려하여 관개기에 하천의 수량에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 수리특성조건을 제시하였다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 Hunt (1999) 해석해

Hunt (1999)는 Fig. 1과 같이 대수층 두께에 비해 하폭과 수심이 매우 작은 하천으로부터 길이  $l$ 만큼 떨어진 위치에서 지하수를 양수할 경우 하천수 감소량을 산정하는 해석해를 Eq. (1)과 같이 개발하였다. 해석해 유도시 기본 가정사항으로 대수층은 무한하고 균질, 등방하며, 지하수 유동의 연직방향 속도가 수평방향에 비해 무시할 정도로 작고 지하수 양수량은 일정하며, 양수로 인한 지하수위 저하가 대수층 두께에 비해 매우 작다는 조건을 가진다. 또한 하천은 길이  $y$  방향으로 직선의 무한대이고, 하천의 단면은 포화대수층 두께에 비해서 매우 작고 하천의 수위변화는 대수층 지하수위 변화에 비해 매우 작으며, 하천에서 대수층으로의 유동량은 준투수층의 수두차이에 비례한다는 전제조건을 가진다.

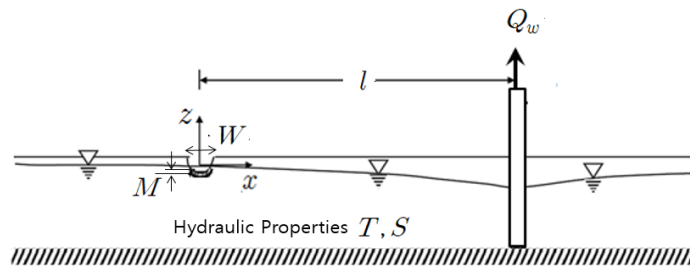


Fig. 1. Definition sketch for Hunt (1999) solution (Modified from Lee *et al.*, 2016)

$$\frac{\Delta q}{Q_w} = \frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}}\right) - \exp\left(\frac{\lambda^2 t}{4ST} + \frac{\lambda l}{2T}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\lambda^2 t}{4ST}} + \sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}}\right)} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta q$ 는 하천수 감소량,  $Q_w$ 는 지하수 양수량,  $\operatorname{erfc}$ 는 여오차함수(complementary error function),  $T$ 는 투수량계수,  $S$ 는 저류계수,  $l$ 은 하천과 양수정간 거리,  $t$ 는 양수경과시간, 그리고,  $\lambda$ 는 하상수리전도성(streambed hydraulic conductance)으로 하상수리전도도(streambed hydraulic conductivity)  $k_s$ 와 하폭  $W$ 의 곱을 하천바닥층 두께  $M$ 으로 나눈 값이다.

Eq. (1)에서  $\lambda$ 가 무한대로 크면 우변의 두 번째 항이 0이 되어 Eq. (2)와 같이 Glover and Balmer (1954)의 해석해와 같고,  $\lambda = 27L$ 이면 Eq. (3)과 같이 Hantush (1965)의 해석해와 같게 된다.

$$\frac{\Delta q}{Q_w} = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta q}{Q_w} = \frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}}\right) - \exp\left(\frac{Tt}{SL^2} + \frac{l}{L}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{Tt}{SL^2}} + \sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}}\right)} \quad (3)$$

여기서,  $L$ 은 하천과 대수층간의 누수계수로서 대수층의 수리전도도  $K$ 를 하천과 대수층 경계부의 수리전도도  $K'$ 로 나누고 하천과 대수층 경계부의 두께  $b'$ 를 곱한 값이다.

### 2.2 주기 양수에 대한 하천수 감소량 산정식 개발

하천수 감소량은 양수 기간 동안 증가하다가 양수를 중단하면 지하수위가 회복되어 점차 줄어든다. Wallace *et al.* (1990)는 Glover and Balmer (1954)의 해석해에 중첩원리를 적용하여 양수 중단 후 하천수 감소량 산정식을 Eq. (4)와 같이 나타내었다.

$$\frac{\Delta q}{Q_w} = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{t_a}{4t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{t_a}{4(t-t_p)}}\right) \quad (4)$$

for  $t_p \leq t < \infty$

여기서,  $t_a = l^2 S/T$ 이고,  $t_p$ 는 양수기간이다. Eq. (4) 우변의 첫 번째 항은 연속적인 일정 양수에 대한 하천수 감소량이고, 두 번째 항은 첫 번째 항을  $t_p$ 만큼 지체시키고 부호를 반대로 한 것으로 영상정에서 주입시 하천수 증가량이며, 이를 개념화하여 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 양수 중단 후에도 양수 영향이 지체되어 나타나는 잔류효과를 표현하고 있다.

Eq. (4)는 일종의 맥동응답함수(pulse response function)의 형태를 나타내고 있다. 양수 시작과 양수 중단을 반복하는 주기 양수에 대한 하천수 감소량 변화 양상은 역시 중첩원리에 따라 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta q}{Q_w} = \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t-t_d i) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{t_a}{4(t-t_d i)}}\right) - \delta(t-t_p - t_d i) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{t_a}{4(t-t_p - t_d i)}}\right) \quad (5)$$

for  $0 \leq t < \infty$

여기서,  $N$ 은 양수와 양수 중단 반복횟수인 전체 주기 개수,  $t_d$ 는 한 주기로서 양수기간과 비양수기간의 합,  $\delta$ 는 괄호안의 값이 0보다 크면 1, 그 외에는 0의 값을 갖는 단위계단함수(unit step function)이다.

본 연구에서는 Wallace *et al.* (1990)의 주기 양수시 하천수 감소량 산정 방법을 확장하여 하천이 대수층 두께에 비해 규모가 작고 하상의 준투수층을 고려한 경우인 Fig. 1과 같은 보다 실제적인 하천-대수층 조건에 대해 주기 양수에 따른 하천수 감소량 산정식을 Eq. (6)과 같이 구성하였다.

$$\frac{\Delta q}{Q_w} = \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t-t_d i) \left[ \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{t_a}{4(t-t_d i)}}\right) - \exp\left(\frac{(t-t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4t_b}}{\sqrt{(t-t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4(t-t_d i)}}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{(t-t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4t_b}}{(t-t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4(t-t_d i)}}}\right) \right] - \delta(t-t_p - t_d i) \left[ \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{t_a}{4(t-t_p - t_d i)}}\right) + \exp\left(\frac{(t-t_p - t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4t_b}}{\sqrt{(t-t_p - t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4(t-t_p - t_d i)}}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{(t-t_p - t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4t_b}}{(t-t_p - t_d i)/4t_b + \sqrt{t_a/4(t-t_p - t_d i)}}}\right) \right] \quad (6)$$

for  $0 \leq t < \infty$

여기서,  $N$ ,  $\delta$ ,  $t_p$ ,  $t_d$ ,  $t_a$ 는 Eq. (5)에서와 같고,  $t_b = ST/\lambda^2$ 이다. Eq. (6)은 Eq. (5)에 비해 하상퇴적층의 수리전도성 크기의 영향을 추가적으로 고려할 수 있다.

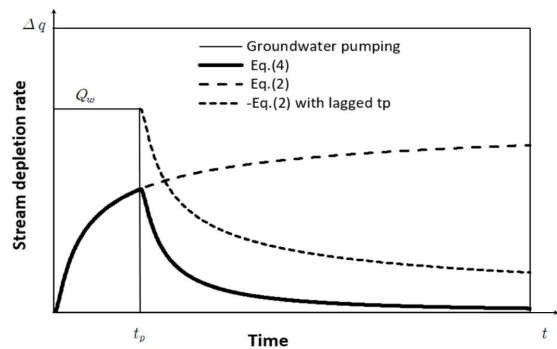


Fig. 2. Conceptual diagram of stream depletion during and after pumping

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대수층 및 하상 수리특성조건에 따른 주기적 지하수 양수로 인한 하천수량 감소 특성 분석

주기적인 지하수 양수에 따른 하천수 감소량 산정식 Eq. (6)을 이용하여 관개기 4월~9월간 180일 양수를 매년 반복했을 경우 하천의 수량에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 3은 하천-관정 이격거리 100 m, 투수량계수 100 m<sup>2</sup>/일, 저류계수 0.15, 하상수리전도성 10 m/일인 조건에 대해 연속 및 주기 양수에 따른 무차원 하천수 감소량 즉, 하천수 기여율의 시간적 변화를 도시한 것이다. 이격거리가 짧고, 대수층의 투수량계수 및 하상수리전도성이 커서 지하수 양수의 영향이 하천에 빠르게 도달하여 양수 6개월 후에 0.8을 초과하는 것을 확인할 수 있다. 주기 양수인 경우 매년 양수 시작과 종단을 반복함에 따라 하천수 감소 또한 주기적 패턴을 보이고 있으며, 매년 하천수 감소의 급격한 증가뿐만 아니라 양수 중단 후 가파르게 줄어들어 양수가 없는 상태로 거의 회복되고 있다. 양수 중단 후 회복성은 좋지만, 주기별로 하천수 감소율의 일 최대치가 연속 양수인 경우와 큰 차이가 없는 등 하천수 감소 영향이 관개기에 집중되어 하천의 수량 측면에서 불리한 대수층 조건이다.

Fig. 4는 하천-관정 이격거리 100 m, 투수량계수 20 m<sup>2</sup>/일, 저류계수 0.1, 하상수리전도성 1.0 m/일인 조건에서 연속 및 주기 양수에 따른 하천수 기여율을 나타낸 것으로 Fig. 1 조건에 비해 투수량계수와 하상수리전도성이 작아 양수에 대한 반응이 상대적으로 지체되어 나타나고 있다. 매 주기마다 회복이 충분히 이뤄지기 전에 양수 재시작으로 양수 중단 후 잔류효과가 다음 주기까지 누적되어 기여율의 최대 및 최소치가 양수 주기에 따라 증가하고 있다. 양수 후 첫 해 하천수 기여율의 최대값은 연속 양수시 약 0.5, 주기 양수시 약 0.4로 차이가 크지 않지만 양수가 장기간 진행되면서 차이가 증가하여 10년 후에는 주기 양수시 0.55로 연속 양수시 0.85의 65% 수준으로 크게

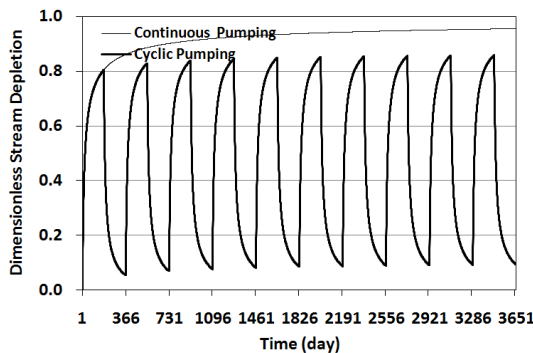


Fig. 3. Dimensionless stream depletion for  $l=100$  m,  $T=100$  m<sup>2</sup>/d,  $S=0.15$ ,  $\lambda=10$  m/d

줄었다. 즉, 관개기 양수 영향이 시기적으로 분산되어 갈수기 하천유량에 미치는 영향이 Fig. 3에 비해 크게 줄어들었다.

Fig. 5는 하천-관정 이격거리 300 m, 투수량계수 10 m<sup>2</sup>/일, 저류계수 0.05, 하상수리전도성 0.1 m/일 일 때의 하천수 기여율을 산정한 결과로서 Figs. 3 and 4에 비해 이격거리가 길고 하상수리전도성 또한 작아 하천수에 미치는 영향이 크게 감소하였다. 주기 양수의 영향은 연속 양수에 비해 거의 반으로 줄어들었으며, 이는 하천수 감소량(=지하수 양수량 × 하천수 기여율) 측면에서 보면 관개기 양수량을 2배로 증가시켜도 연중 연속적인 일정 양수일 때와 동일한 영향을 미치는 것을 의미한다. 수리확산계수(=투수량계수/저류계수)는 100 m<sup>2</sup>/일로 Fig. 4 조건과 같지만, 하천-관정 이격거리를 길게 함으로써 10년 장기간 양수를 했음에도 불구하고 주기 양수의 경우 하천수 기여율이 0.4를 초과하지 않아 하천에 미치는 영향이 작다. 물론 하상수리전도성이 작아진 영향도 포함되었지만 본 경우는 하천-관정 이격거리가 더 지배적으로 작용하였다. 이와 같이 관정의 위치를 조정함으로써 하천의 수량에 미치는 영향을 저감시킬 수 있다.

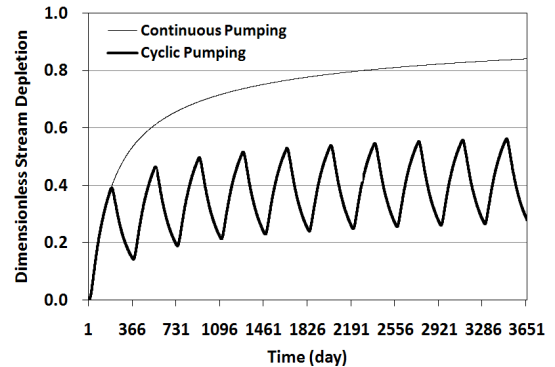


Fig. 4. Dimensionless stream depletion for  $l=100$  m,  $T=20$  m<sup>2</sup>/d,  $S=0.1$ ,  $\lambda=1$  m/d

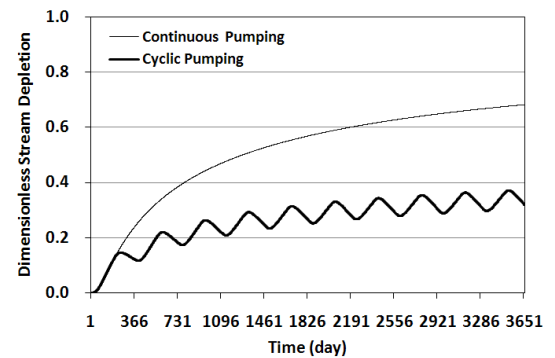


Fig. 5. Dimensionless stream depletion for  $l=300$  m,  $T=10$  m<sup>2</sup>/d,  $S=0.05$ ,  $\lambda=0.1$  m/d

대수층 및 하상 수리특성변수의 다양한 조건에 대해 관계기 4월~9월 지하수 양수에 따른 하천의 수량에 미치는 장기 간 영향을 분석하였다. 하천-관정 이격거리는 100 m 간격으로 100~500 m의 5가지, 투수량계수 10 m<sup>2</sup>/일 간격으로 10~100 m<sup>2</sup>/일의 10가지, 저류계수 0.05 간격으로 0.05~0.30의 6가지, 하상수리전도성 10배 간격으로 0.01~100 m/일의 5가지로 총 1,500 (= 5×10×6×5) 가지 조합에 따라 일단위로 하천수 기여율을 계산하였다. 양수기간 동안 하천수 기여율의 일 최대값을 Figs. 6~8에 나타내었으며, 연속 양수의 경우도 함께 비교하여 나타내었다.

Fig. 6은 하상수리전도성 λ가 0.1 m/일일 때 양수기간 및 SDF값 변화에 따른 하천수 기여율의 최대값을 나타낸 것으로 양수 첫해에는 SDF값이 작은 경우에만 양수 영향이 하천에 도달하고 있으며, 주기 양수인 Fig. 6(a)의 경우 SDF 값에 따라 양수량 대비 최대 35.9%, 평균 9.2%의 값을 나타내었다.

양수 5년째에는 최대 49.8%, 평균 20.4%, 양수 10년에는 최대 53.6%, 평균 26.0%로 양수가 장기간 진행됨에 따라 하천수 기여율이 증가하지만 그 증가율은 점차 둔해지고 있다. 양수 중단 및 회복의 영향으로 주기 양수시 최대 하천수 기여율은 양수기간별 평균치를 기준으로 연속 양수의 결과인 Fig. 6(b)에 비해 양수 경과년도에 따라 약 55~65% 수준인 것으로 분석되었다. SDF가 0에 가까울 때 하천수 기여율의 최대치가 발생하는데 이를 기준으로 주기 양수시 하천수 감소율은 연속 양수시 결과의 67~74% 수준으로 평균치 기준 보다 크다. 즉, SDF가 작을수록 양수 중단에 따른 회복성이 우수함을 나타낸다.

Fig. 7은 하상수리전도성 λ가 1.0 m/일일 때 양수기간 및 SDF값 변화에 따른 하천수 기여율의 최대값을 나타낸 것으로 주기 양수(Fig. 7(a)) 첫 해에는 양수량 대비 최대 74.1%, 평균 31.6%, 양수 5년에는 최대 80.0%, 평균 45.7%, 양수 10년에는 최대 81.3%, 평균 50.0%로 SDF 값에 따라 큰 차이를

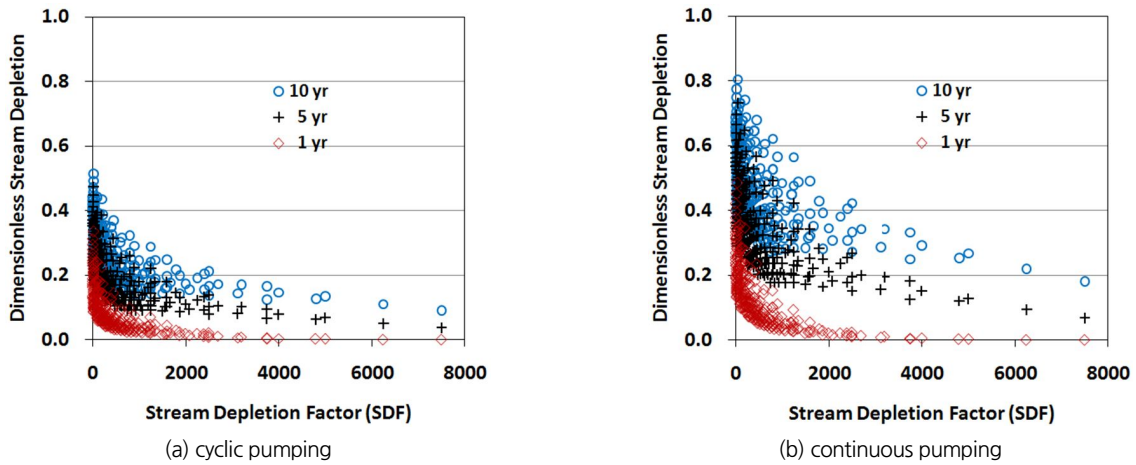


Fig. 6. Dimensionless maximum stream depletion according to SDF values ( $\lambda=0.1$  m/d)

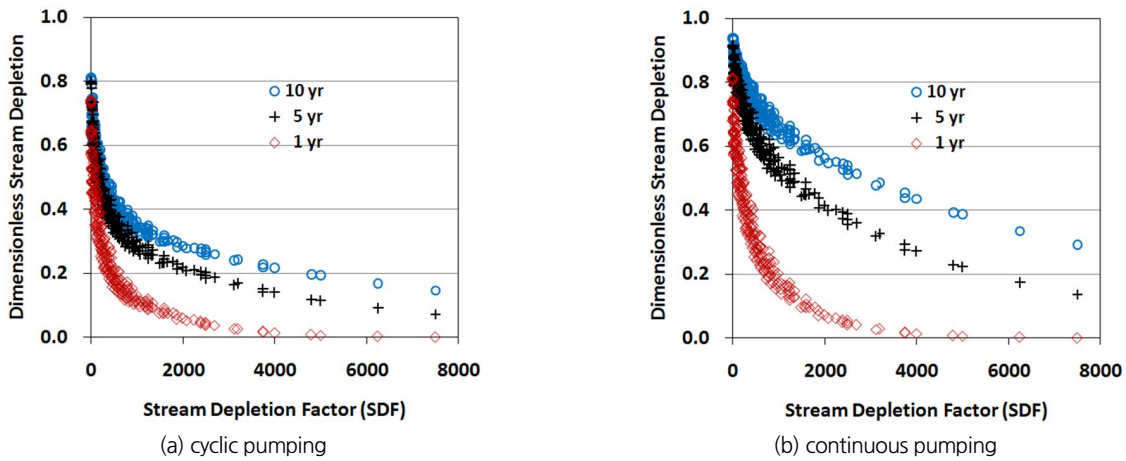


Fig. 7. Dimensionless maximum stream depletion according to SDF values ( $\lambda=1.0$  m/d)



보이고 있으며, 하상수리전도성  $\lambda$ 이 상대적으로 작은 0.1 m/일인 Fig. 6에 비해 하천수 기여율이 약 2배 증가하여 하상수리전도성 크기에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 주기 양수시 최대 하천수 기여율은 연속 양수 (Fig. 7(b))에 비해 양수 경과년도에 따라 평균치를 기준으로는 약 65~75%, 최대치를 기준으로는 약 86~91% 수준으로 나타나 하상수리전도성이 작은 Fig. 6에 경우에 비해 양수 중단에 따른 회복 영향이 줄어들었다.

Fig. 8은 하상수리전도성  $\lambda$ 가 10.0 m/일일 때의 하천수 기여율의 최대값을 나타낸 것으로 주기 양수(Fig. 8(a))로 인해 양수 첫해에 양수량 대비 최대 88.6%, 평균 41.7%, 양수 5년에 최대 91.2%, 평균 54.0%, 양수 10년에 최대 91.7%, 평균 57.5%의 하천수량의 감소가 일어나는 것으로 나타났다. Fig. 8은 Fig. 7 조건에 비해 하상수리전도성이 10배 증가하였지만, 하천수 감소율은 약 10% 증가하여 하상수리전도성이 어느 이상

이면 하천수 기여율에 미치는 영향에 큰 차이를 주지 않는 것을 의미한다. Fig. 8에서 동일 SDF에 대해 하천수 기여율의 산포도가 적어 하상수리전도성의 지체 영향이 거의 나타나지 않는 데서도 확인할 수 있다. 주기 양수시 최대 하천수 기여율은 연속 양수시 결과(Fig. 8(b))에 비해 평균치 및 최대치를 기준으로 각각 약 70~80%, 약 94~96% 수준으로 산정되어 하상수리전도성이 큰 경우에는 양수 중단 및 회복의 영향이 앞선 경우에 비해 더욱 줄어들었다. 따라서 SDF가 작고 하상수리전도성이 커서 하천과 대수층간의 수리적 연결성이 큰 지역에서는 관개기에만 양수하는 경우나 연중 양수하는 경우나 하천의 수량에 미치는 일 최대 영향에는 큰 차이가 없다.

Fig. 9는 전체 1,500가지 경우의 수에 대해 산정한 주기 양수시 하천수 감소량을 연속 양수시 하천수 감소량으로 나눈 값을 하천고갈인자 SDF에 따라 도시한 것으로 Fig. 9(a)는 양수 시작 후 1년, 2년, 5년, 10년 평균 하천수 감소량의 상대비

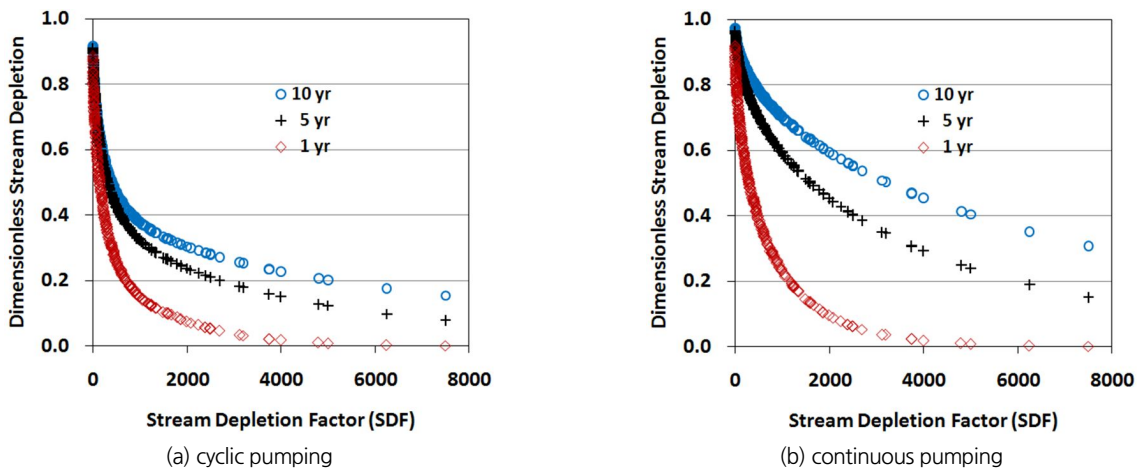


Fig. 8. Dimensionless maximum stream depletion according to SDF values ( $\lambda = 10.0$  m/d)

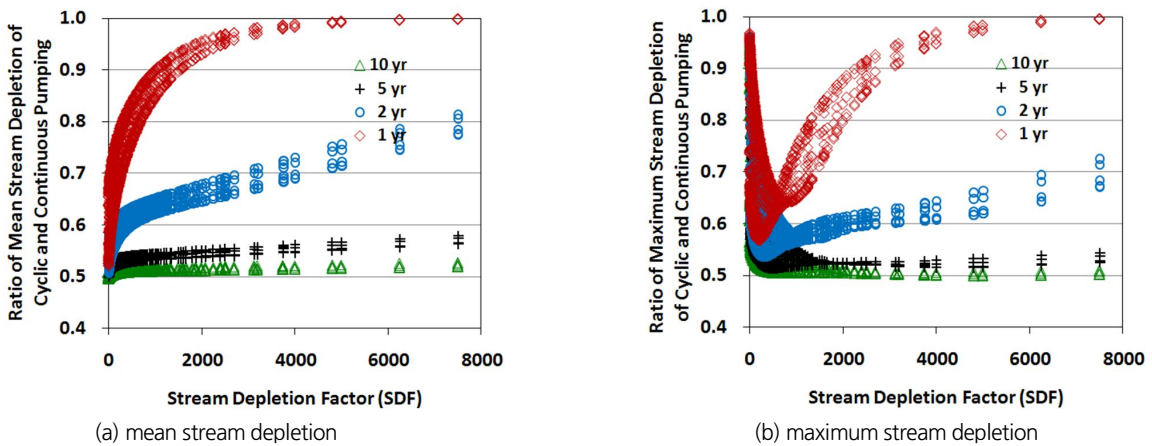


Fig. 9. Relative ratio of stream depletion due to cyclic and continuous pumping

를, Fig. 9(b)는 같은 기간 최대 하천수 감소량의 상대비를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에서 보이는 바와 같이 양수 1년, 2년에는 SDF 값에 따라 상대비의 차이가 크지만, 양수 5년, 10년과 같이 양수기간이 증가함에 따라 SDF 값에 따른 상대비의 차이가 줄고 0.5에 가까운 값을 보이고 있다. 즉, 장기간 양수하면 주기적인 양수시 하천수 감소량은 연속 양수에 비해 평균적으로 반으로 줄어들음을 의미한다. 양수 1년에는 SDF값이 큰 경우 즉, 관정이 하천에서 멀거나 수리확산계수가 작아 양수에 대한 반응이 느린 조건에서는 양수 중단에 따른 회복 속도 역시 느려져 주기 양수와 연속 양수시 연평균 하천수 감소량의 차이가 작다. 이러한 경우는 앞선 그림 Fig. 5에서 처음 1년 사이클에서 확인할 수 있다. 반면에 SDF가 0에 가까울 정도로 매우 작은 경우에는 양수 개시에 따른 반응과 양수 중단에 따른 회복이 빨라 상대비가 0.5에 근접하는 것을 알 수 있으며, 이러한 예는 Fig. 3과 같다.

특정 양수기간 동안 하천수 감소량의 최대값에 대한 상대비를 도시한 Fig. 9(b)를 보면, SDF가 매우 작은 경우 상대비 값이 1.0에 가깝다. 이러한 경우는 Fig. 5와 같은 조건에 해당한다. 즉, SDF가 작은 지역에서는 주기 양수시 연중 지하수 양수총량은 반으로 줄고 하천수 감소총량 또한 거의 반으로 줄지만, 하천수 감소량의 최대값은 연속 양수시와 차이가 없어 갈수시 하천유량에 미치는 영향 관점에서 보면 양수 중단 효과가 적음을 의미한다. 하천수 감소량 최대치의 상대비가 1.0에 근접하는 경우는 이와 같은 경우뿐만 아니라, 양수 1년과 같이 양수초기에 SDF가 큰 경우에도 나타난다. 이는 Fig. 3(c)에서와 같이 양수에 대한 반응이 느리게 지체된 경우에는 주기 양수와 연속 양수간의 최대치의 차이가 거의 없기 때문이다. 양수기간이 증가함에 따라 이와 같은 양상은 줄어들고 있으며, 양수 5년 이후부터는 SDF가 약 1,000을 넘어서면서부터 하천수 감소량의 최대치의 상대비가 0.5에 근접하고 있다. 한편, 양수 1, 2년에서는 SDF가 200~1,000 구간에서 상대비가 가장 작은 값을 보이고 있는데, 농업가뭄 대책의 일환으로 일시적인 지하수 신규 개발시 이와 같은 SDF 조건을 고려하여 관정 개발 적지를 선정하면 하천의 수량 측면에서도 관정 개발의 영향을 최소화할 수 있다.

**3.2 회귀율을 고려한 지하수 양수 영향 최소화 방안**

관개기 용수공급을 위해 취수한 지하수의 일부가 사용되지 않고 농배수로를 통해 하천으로 직접유출되거나 재침투되어 중간유출 혹은 기저유출의 형태로 하천으로 회귀될 수 있다. 회귀율을 0.35로 가정(MLTMA, 2011)하고 회귀수량의 지체를 무시하면 지하수 양수에 따른 하천수 감소량은 Fig. 10과

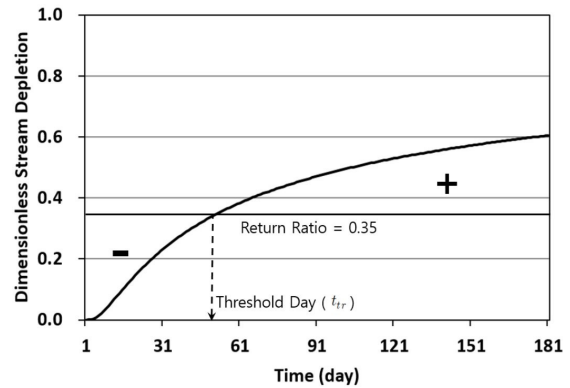


Fig. 10. Definition of threshold day

같이 나타낼 수 있다. 그림에서와 같이 양수 초기에는 회귀수량의 영향으로 하천수량 변화가 음(-)의 값으로 하천의 수량이 증가하고 어느 한계를 지나면 하천수 감소량이 양(+의 값으로 하천의 수량이 줄어든다. 본 연구에서는 하천수 감소량에서 회귀량을 감한 값이 0보다 커서 순 하천수 감소량이 발생하기 시작하는 시점을 한계일(threshold day,  $t_{tr}$ )로 정의하고 대수층 수리특성 조건에 따른 한계일의 변화를 분석하였다.

Fig. 11은 앞선 1,500 가지 주기 양수 모의 결과 중에서 하상 수리전도성이  $\lambda$ 가 10.0 m/일 이상인 경우에 대해 한계일을 산정하고 이를 대수층의 응답함수인 하천고갈인자(SDF)에 따라 나타낸 것이다. Figs. 11(a) and 11(b)는 각각 양수 시작 후 1년과 5년에 대한 한계일을 도시한 것으로 SDF 값에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 양수 기간이 길어질수록 기울기가 감소하는 특성을 나타내고 있다. 주기적인 양수가 장기간 진행됨에 따라 잔류효과가 누적되어 동일한 SDF값에 대한 한계일이 양수 5년일 때 양수 1년에 비해 짧아지는 특성을 보이고 있다. 한계일이 짧아지면 양수 초기에 하천수 증가 효과가 줄어들어 하천의 수량 측면에서 불리하게 되며, 특히 한계일이 갈수기인 4월에서 6월 사이에 위치한 경우에는 더욱 불리하다. 따라서 한계일이 갈수기 이후 홍수기에 발생하는 조건에서 지하수를 취수해야 하천수 입장에서 유리하다. 따라서 한계일을 90일(4~6월)로 설정하면 한계 하천고갈인자 SDF<sub>tr</sub>값이 Fig. 11(a)에서는 약 145일, Fig. 11(b)에서는 약 338일이다. 극한 가뭄이 발생하여 비상용수공급을 위해 일시적으로 지하수 관정을 다량으로 개발할 경우에는 SDF값이 양수 1년일 때의 SDF<sub>tr</sub>값 145일을 넘는 지역에서 취수하는 것이 이상적이다. 만일 대수층의 수리확산계수 ( $D=T/S$ )가 100 m<sup>2</sup>/일 이라면 관정의 위치를 하천에서 120.4 m ( $= \sqrt{(SDF_{tr} \times D)} = \sqrt{145 \times 100}$ )를 이격시켜 개발하는 것이 갈수기 하천유량 확보 측면에서 바람직하다.

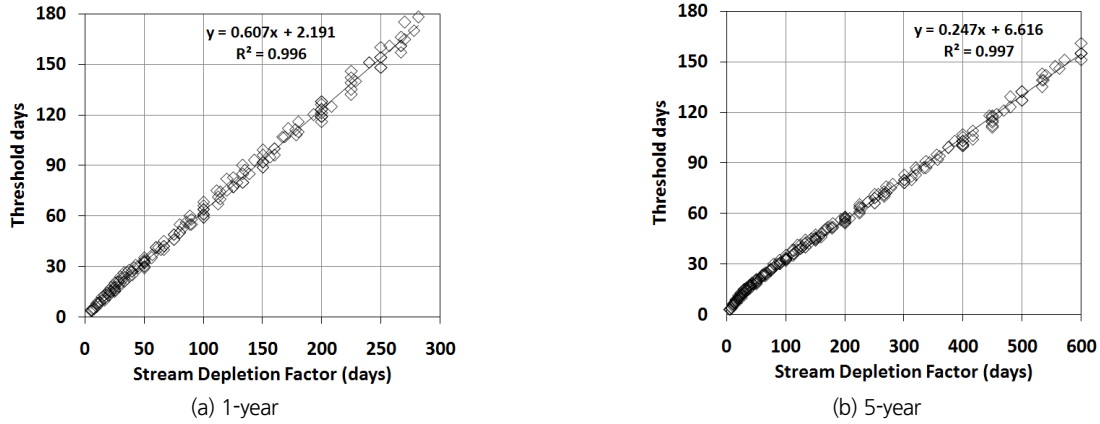


Fig. 11. Threshold days according to SDF values

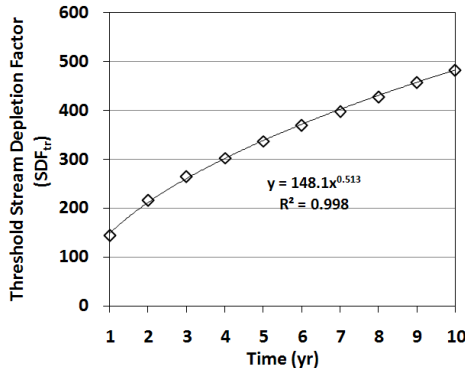


Fig. 12. Time varying threshold SDF

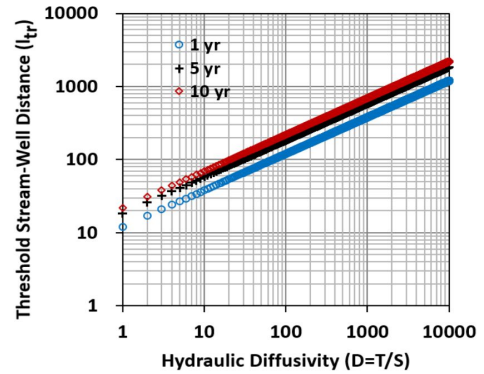


Fig. 13. Threshold distance according to hydraulic diffusivity

양수 경과년수에 따라 한계 하천고갈지수  $SDF_{tr}$  값을 산정하여 Fig. 12와 같이 나타내었다. 양수 경과년수가 증가할수록  $SDF_{tr}$  값이 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 이를 수식으로 표현하면 Eq. (7)과 같다.

$$SDF_{tr}(t_{yr}) = 148.1 t_{yr}^{0.513} \quad (7)$$

여기서,  $SDF_{tr}(t_{yr})$ 은 양수 경과년수  $t_{yr}$ 년일 때의 한계 하천고갈인자 값이다.

양수 경과년수별  $SDF_{tr}$  값에 대해 수리확산계수 값을 변경해가면서 하천-관정 이격거리를 계산(이하 한계거리)하고 Fig. 13과 같이 대수축에 나타내었다. 대수축상에서 수리확산계수와 한계거리간에 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 수리확산계수와 경과년수가 증가할수록 한계거리가 증가하고 있다. 중회귀분석을 통해 Fig. 13을 수식으로 표현하면 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_{tr} = 12.17 D^{0.5} t_{yr}^{0.26} \quad (8)$$

여기서,  $l_{tr}$ 은 한계거리(m),  $D = T/S$ 는 수리확산계수( $m^2/s$ ),  $t_{yr}$ 은 양수 경과년수(년)이다. Eq. (8)은 하상수리전도성이 10.0 m/일 이상인 조건에 대해 개발되었지만, 앞선 Figs. 7 and 8 간의 차이가 작기에 하상수리전도성이 1.0 m/일 보다 큰 경우에도 사용 가능하다. 또한 그 보다 더 작은 하상수리전도성인 경우 한계일, 한계 SDF가 늘어나고 한계거리가 줄어들겠지만 하천구역내에서 하상수리전도성 측정의 어려움과 안전측값을 사용하는 측면에서는 이와 같은 관계식을 보편적으로 활용해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 무한대수층-하천-양수정 경계치 문제에 대해 유도된 Hunt (1999)의 해석해를 확장하여 지하수 양수 시작과 중단을 반복하는 주기적 양수로 인한 하천수 감소량을 산정할 수 있는 해석적 모형을 개발하였다. 그리고, 이 모형을 이용하여 대수층 및 하상의 수리상수값과 하천-관정 이격거



리의 다양한 조건에 대해 관개기인 4월에서 9월까지 180일 동안 지하수 양수를 매년 반복하였을 경우 하천의 수량에 미치는 장기간 영향을 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 대수층의 수리확산계수가 커서 양수에 대한 응답이 빠르고, 하천-관정 이격거리가 짧고 하상의 수리전도성이 커서 하천과 대수층간의 수리적 연결성이 큰 경우에는 양수 중단에 따라 회복성이 뛰어나 비관개기 하천수량에 미치는 영향은 작으나, 양수 시작에 따른 하천수 감소량의 급격한 증가로 순간적인 최대 감소량이 연속적인 양수의 경우와 큰 차이가 없는 등 양수 영향이 관개기에 집중되는 것을 확인하였다. 그 반대의 조건에서는 관개기 지하수 양수의 영향이 비관개기로 분산되어 갈수량에 미치는 영향이 줄어들음을 보였다.
- 2) 하천-관정 이격거리는 100 m 간격으로 100~500 m의 5가지, 투수량계수는  $10 \text{ m}^2/\text{일}$  간격으로  $10 \sim 100 \text{ m}^2/\text{일}$ 의 10가지, 저류계수는 0.05 간격으로 0.05~0.30의 6가지, 하상수리전도성은 10배 간격으로 0.01~100 m/일의 5가지를 서로 조합하여 총 1,500개 조건에 대해 10년 동안 주기적 양수로 인한 지하수 양수량 대비 하천수 감소율을 일별로 계산하고, 양수 경과 1, 5, 10년 중 최대치를 하천고갈인자 및 하상수리전도성 크기에 따라 도시적으로 나타내었다. 하상수리전도성이 0.1 m/일로 작은 경우 최대 하천수 감소율이 양수 경과년수 및 SDF에 따라 평균적으로 양수량 대비 9.2~26.0% 정도로 하천의 수량에 미치는 영향이 작으며, 연속적인 양수시 하천수 감소율의 55.0~65.0% 수준으로 감소하는 것으로 분석되었다. 반면에 하상수리전도성이 1.0 m/일인 경우 최대 하천수 감소율은 SDF 값에 따라 큰 차이를 나타내었고, 최대 하천수 감소율의 평균값은 31.6~50.0%로 하상수리전도성이 0.1 m/일인 조건에 비해 약 2~3배 증가하여 하상수리특성이 하천수량에 영향을 미치는 중요한 인자인 것으로 평가되었다. 하상수리전도성을 10.0 m/일로 10배 증가시켰을 경우 최대 하천수 감소율이 약 10% 소폭 상승하여 하상수리전도성이 1.0 m/일을 초과하면 하천수량에 미치는 영향에 큰 차이를 주지 않는 것으로 분석되었다.
- 3) 주기 양수와 연속 양수시 발생하는 하천수 감소량의 상대적 크기를 비교한 결과, 양수 기간동안 평균적인 하천수 감소량은 SDF 값이 커서 양수 시작에 대한 반응과 양수 중단에 대한 회복이 느린 조건에서는 양수 초기에 상대적으로 차이가 거의 없다가 양수가 장기화됨에 따라 차이가 증가

하여 주기 양수가 연속 양수에 비해 하천수 감소량이 반으로 줄어들었으며, 반면에 SDF 값이 작아 양수 시작과 중단에 따른 반응이 매우 빠른 경우에는 양수 초기부터 상대적 크기 비가 0.5에 근접하였다. 또한, 양수 기간 동안 최대 하천수 감소량은 SDF가 매우 작은 경우 주기 양수와 연속 양수 시 차이가 적어 양수 중단에 따른 수량 회복 효과가 미미한 것으로 나타났으며, 양수 1, 2년에서는 SDF가 200~1,000 사이에서 상대적 차이가 최대로 발생하고 양수 5년 이후에는 SDF가 1,000을 넘어서면서부터 상대비가 0.5에 근접하는 등 주기 양수에 따른 양수 중단 효과가 지배적으로 발생하는 SDF 구간이 나타났다. 따라서 하천수량 측면에서 양수 중단 효과가 큰 SDF 조건을 고려하여 지하수 관정을 개발하면 하천수량에 미치는 영향을 저감시킬 수 있다.

- 4) 지하수 양수량의 일부가 다시 하천으로 유출되는 회귀수 영향을 고려하여 순 하천수 감소량이 발생하는 시작점을 한계일로, 한계일이 90일 때의 SDF와 하천-관정 이격거리를 각각 한계 하천고갈인자 및 한계거리로 정의하고, 양수 경과년수에 따른 한계고갈인자 산정식, 양수 경과년수와 수리확산계수에 따른 한계거리 산정식을 개발하였다. 이러한 한계조건을 고려하여 가뭄시 비상용수공급을 위한 지하수 관정 개발 적지를 선정하면 하천의 수량에 미치는 영향을 최소화할 수 있을 것이다.

결론적으로 대수층과 하천의 수리특성을 고려하여 주기적인 양수시 하천의 수량에 미치는 영향을 분석할 때 간편하게 활용할 수 있는 해석적 모형을 개발하고, 다양한 수리특성 조건에 대해 관개기 장기 양수 영향 평가를 통해 갈수기 하천수량에 유리한 지하수 개발 조건을 제안하였다. 개발한 해석적 모형은 지하수 양수와 하천수 감소량간의 시간적 지연과 크기 관계를 파악할 수 있어 가뭄시 지하수 개발·이용 관리에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 해석적 모형의 활용성을 높이기 위해서는 하천주변과 하상의 수위조사, 수리지질조사, 양수시험 등 현장 조사·연구를 통한 기초자료 축적이 이뤄져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급서비스 연구사업(과제번호: 146515)의 지원을 받아 연구되었습니다.

## References

- Darama, Y. (1991). *Interactions between stream-wetland and aquifer system in the presence of a pumping well*. Ph. D diss., Michigan State University, East Lansing, Michigan.
- Darama, Y. (2001). "An analytical solution for stream depletion by cyclic pumping of wells near streams with semipervious beds." *Ground Water*, Vol. 39, No. 1, pp. 79-86.
- 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.
- Jenkins, C. T. (1968). *Computation of rate and volume of stream depletion by wells*. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 4, Chapter D1.
- 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.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011). *The 4th Long-term Comprehensive Plan for Water Resources (2011~2020)*.
- 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.
- Wallace, R. B., Darama, Y., and Annable, M. D. (1990). "Stream depletion by cyclic pumping of wells." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 6, pp. 1263-1270.