韓國水資源學會論文集
第47卷 第8號·2014年 8月
pp. 685~691

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 47, No. 8:685-691, August 2014
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.8.685
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

강변여과 취수정의 간섭효과와 하천수 비율에 대한 해석적 평가

Analytical Evaluation of Interference and Ratio of River Water at Riverbank Filtration Pumping Wells

박 남 식*
Park, Namsik

Abstract

River bank filtration techniques seek to improve river water quality via natural processes occurring when river water is induced to a river bank. When water is pumped from multiple wells, phenomenon known as well interference affect pumping rates. Pumping wells of a bank filtration facility are connected by pipelines. In theses cases well interference is caused not only by groundwater drawdown but also by pipe headloss which depend on flow rates. In this work a comprehensive analytical method which handles groundwater flow and pipe flow is used to evaluate interferences and ratios of river water in pumping wells. A realistic case was used as an example.

keywords : river-bank filtration, multiple wells, interference, river-water ratio

요 지

강변여과는 하천 인근에 다수의 관정을 설치하여 하천수의 수질 개선을 추구하는 기술이다. 그런데 다수의 관정이 인접해 있는 경우 관정간의 상호간섭 현상으로 인하여 취수량에 영향을 미친다. 강변 여과 관정의 경우에는 관정이 관망으로 연결되기 때문에 간섭효과의 요인에는 지하수위 강하량 외에도 유량변화에 따른 관망 수두손실이 포함된다. 간섭효과는 취수정으로 유입되는 하천수와 배후 지하수의 비율에도 영향을 미친다. 본 연구에서는 강변여과시스템의 대수층과 관망흐름을 통합해석하는 기법을 이용하여 복수 관정의 간섭효과와 하천수 비율을 산정하는 방법을 제시하고 실제에 가까운 가상의 강변여과 시스템에 적용하였다. 관정 가동 패턴에 따라 취수량은 5% 이상 차이가 나고 배후지하수 유입비율도 30~40% 범위로 10% 이상 차이가 날 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 강변여과, 군정, 간섭효과, 하천수-지하수 비율

1. 서 론

우리나라에서 강변여과수는 낙동강 주변에서 가장 활발하게 개발되고 있는데 낙동강 하류 지역에서는 철과 망간 등의 농도가 높게 나타나고 있어 대수층 기원의 수질 오염물질의 기원과 대책에 대한 연구가 많이 수행되었다(Kim et al., 2009, Hyun et al., 2013, Kim et al., 2013). 또한 하천수에서 나타나는 오염물의 대수층 내 거동에 대한 연구도 수행되고 있다(Hyun et al., 2013). 그러나 강변여과로 야기되는 대수층 내 흐름에 대한 수량 측면의 연구는 상대적으로 빈약한 편이며 다음과 같은 최근의 연구결과가 보고된 바 있다. Ahn et al. (2005)은 실험(column

* 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: nspark@dau.ac.kr, Tel: 82-51-200-7629)
Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University, 840 Hadan-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

experiment)을 통하여 하상여과시의 유량과 투수계수 감소에 대한 연구를 수행한 바 있다. Jeong et al. (2013)은 수평집수관에 대한 파일롯 규모의 모래수조 실험을 수행하고 집수관에서의 수두분포를 조사하였다. Cheong et al. (2003)은 낙동강 하류 강변 충적층의 지하수위 자료에 자기상관분석 방법을 적용하여 수위변동특성을 분석하였다. Lee et al. (2006)은 한강의 시험 강변여과수 시설의 운영자료 분석을 통하여 취수가능량을 산정하였다. Lee et al. (2004)은 강변여과 배후지의 과도한 지하수 하강을 저감을 위한 인공함양 방법을 연구하였다. Park et al. (2008)은 관망으로 연결된 군정 시스템의 취수량 평가 방법을 제시한 바 있다. Pi and Kim (2012)은 수평 집수관에 대한 실험실 모형 실험을 수행하고 집수관과 대수층의 수두손실 분포에 대하여 조사하였다.

최근 정부에서는 경상남도 창녕과 증산 일대에 용량 68만 m^3/d의 강변여과수 시설을 설치하기 위한 사업을 시작한 바 있다(Construction News, 2012). 그러나 지하수 고갈을 우려하여 사업을 반대하는 의견을 가진 주민들이 다수 있는 실정이다. 따라서 강변 여과수 취수정의 배후 지하수 유입율과 배후 지역의 지하수위 강하량을 정확하게 산정하는 것은 매우 중요하다 할 수 있으나 조사된 바에 따르면 현재까지 이에 대한 연구결과가 보고된 바 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 강변 여과 시설의 복수의 수직 취수정간의 간섭현상과 취수된 물의 하천수와 배후 지하수의 비율을 해석적으로 산정하기 위한 방법을 제시하고 현실에 가까운 가상의 강변여과 취수시스템에 대한 계산 사례를 제시하고자 한다.

2. 관망 흐름과 지하수 흐름의 통합 해석

강변여과 취수시설은 대체적으로 복수의 수평 집수정이나 수직정으로 구성된다. 복수의 양수정이 인접해 있는 경우 취수로 인한 지하수위 강하곡선이 중첩되어 간섭현상이 발생한다. 따라서 군정은 상호 간섭을 줄이기 위하여 일정 간격을 두고 설치된다. 그런데 이는 군정을 연결하는 관로 연장과 관로 수두손실도 증가함을 의미한다. 강변여과 취수정에서처럼 복수의 관정이 관망으로 연결된 경우에는 간섭현상은 대수층의 지하수위 강하 뿐 아니라 관망의 수두손실도 그 원인이 된다.

Park et al. (2008)은 관망으로 연결된 군정에서 관망 수두손실, 대수층 수위 강하 그리고 펌프특성으로부터 취수량 (펌프의 운전점)을 평가하는 방법을 제시한 바 있다. 펌프의 운전점은 펌프 특성곡선(P)과 시스템 저항곡선(R)의 교차점으로 결정된다. 펌프의 양정과 유량 사이 관계를 나타내는 특성곡선은 원심펌프의 경우 다음과 같은 포물선 식으로 표현될 수 있다.

$$P = aQ^2 + bQ + c \tag{1}$$

여기서, P는 양정, Q는 유량, a, b, 그리고 c는 계수로 펌프 실험결과로부터 결정된다.

시스템 저항곡선은 주어진 시스템에서 유량과 수두손실 사이의 관계를 나타낸다. 시스템 저항은 크게 정적저항과 동적저항으로 구성된다. 정적저항은 상류단과 하류단의 표고차이를 나타내며 유량과 관계없이 일정한 값을 가진다. 여기서 상류단의 표고는 대수층내 자연수위, 그리고 하류단의 표고는 정수장의 토출구 표고를 가리킨다. 강변여과의 경우 취수정에서 시작한 관로는 폭기조의 노즐로 연결되는 데 이런 경우 토출구 표고는 폭기조 노즐의 표고가 된다.

동적저항은 흐름으로 발생하는 시스템 손실과 소요 수두로 구성되며 유량의 함수이다. 시스템 손실은 우물 내 수위 강하량과 관로 내 수두 손실(주 손실과 소 손실)로 구성된다. 우물 내 수위 강하량은 대수층 수위강하량과 우물 손실의 합으로 나타난다. 소요 수두는 폭기조의 노즐에서 필요한 수압 또는 속도수두로 정의될 수 있다. 시스템 저항요소는 Table 1과 같이 제시될 수 있다.

그러면 i번째 취수정의 펌프에서 감당해야하는 시스템 저항은

$$R_i = S_i + D_i + L_i + H_i + E_i \tag{2}$$

Table 1. Elements of System Resistance

Group	Remarks		Symbols
Static resistance	Elevation difference between natural groundwater level and nozzle		S
Dynamic resistance	Water level drop in a well	Aquifer loss	D
		Well loss	L
	Pipe head loss		H
	Residual head at nozzle		E

로 나타난다. 각각의 요소들을 기술하면 다음과 같다. 우물손실은 관정 인근과 스크린에서 발생하는 난류로 인한 추가 수두 손실을 나타낸다. 우물손실은 일반적으로 다음과 같이 취수량의 지수함수로 표현된다.

$$L_i = C_i Q_i^n \tag{3}$$

여기서, C_i는 i번째 관정의 손실계수, Q_i는 취수량, 지수 n은 1보다 크며, 난류 마찰손실을 나타내는 Darcy-Weisbach식에 의하면 2의 값을 가진다.

i번째 관정의 취수펌프는 해당 관정의 하류부 관망에서 발생하는 수두손실을 극복해야한다. 수지상 관망(branched network)의 i번째 관정의 하류에 속한 관망에서 발생하는 수두 손실 공식은 다음과 같다.

$$H_i = \sum_{j=i}^{N}\left[f_j \frac{l_j}{d_j}\frac{1}{2gA_j^2}\left(\sum_{k=1}^{j} Q_k\right)^2\right] \tag{4}$$

여기서, N은 관망에 속한 관로 개수, f_j, l_j, d_j 그리고 A_j는 각 각 도수관로 j의 마찰손실 계수, 길이, 직경, 그리고 단면적이며 Q_k는 관정 k의 양수량이다.

관말의 잔류 수두가 속도수두로 지정되는 경우 E_i는 다음과 같이 나타난다.

$$E_i = \left(\sum_{i=1}^{N} Q_i\right)^2 / (2gA_i^2) \tag{5}$$

대수층내 지하수위 강하량은 일반적으로 수치모델링을 통해 산정된다. 그러나 불균질성이 그다지 크지 않고 수평 규모가 큰 대수층의 경우 해석해를 이용하여 지하수위 강하량 분포를 산정할 수도 있다. 무한 평면에서 정상상태의 수위강하량은 관정으로부터의 거리에 따라 감소하며 기본적으로 log 함수로 나타난다. N개의 관정이 있는 경우 지하수위 강하량은 중첩의 원리를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$D = \sum_{j=1}^{N} \frac{Q_j}{2\pi KB} ln\frac{R}{r_j} \tag{6}$$

여기서, D는 수위강하량, K는 투수계수, B는 대수층 두께, R은 관정의 영향 반경(radius of influence), 그리고 r_j는 j번째 관정과 지하수위 강하량 계산 지점 사이의 거리이다. 상술된 수위강하식은 피압대수층에 대하여 유도되었지만 수위강하량이 포화대의 두께에 비하여 그다지 크지 않은 경우에는 비피압대수층에도 확장 적용되기도 한다. 대수층의 수평방향에 경계가 존재하는 경우 경계조건이 적절하게 처리되어야 한다.

상술된 시스템 저항 요소들의 합과 펌프특성곡선으로 구성되는 운전점 방정식을 모든 관정에 대하여 적용하면 비선형 연립방정식이 구성되며 이로부터 취수량의 조합을 계산할 수 있다(Park et al., 2008).

3. 군정의 간섭효과와 하천수 비율

3.1 가상의 강변여과 시스템

본 연구에서는 상술된 군정의 간섭효과와 하천수 비율 산정 기법을 하천의 만곡부에 거의 평행하게 설치된 2열의 수직정 36개로 구성된 가상의 강변여과시스템(Fig. 1)에 적용하였다. 수직정은 하천변으로부터 최소 50 m, 최대 250 m 이격되어 있으며 인접 관정간의 거리는 약 80 m로, 한 열의 연장은 약 1.3 km 정도이다. 36개의 관정을 연결하는 관망도는 Fig. 2에, 제원은 Table 2에 제시되었다. 관로

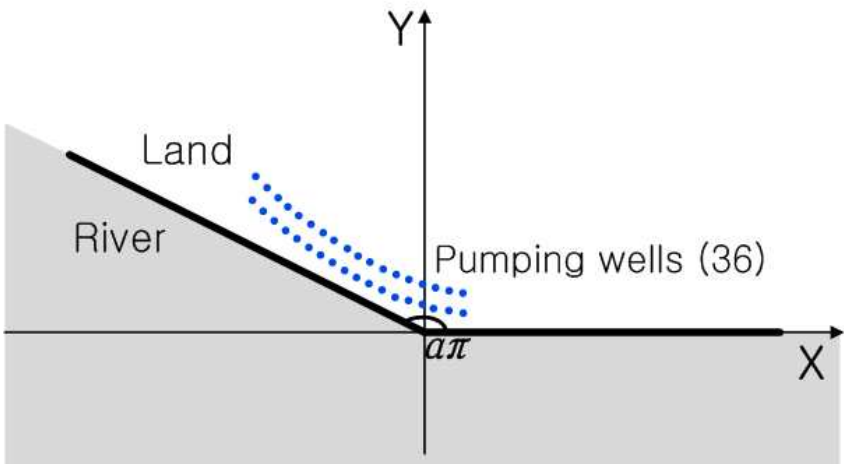

Fig. 1. Hypothetical River-bank-filtration Pumping Wells

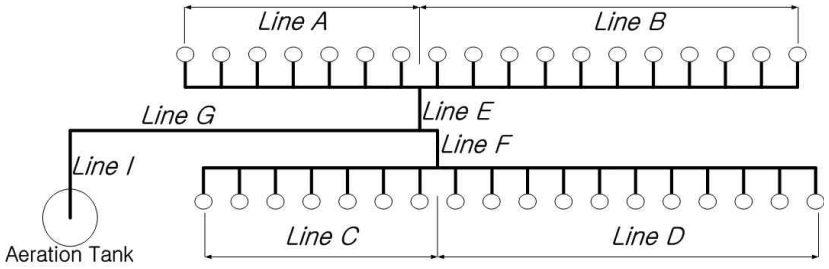

Fig. 2. Pumping Wells and Connecting Pipe Network

Table 2. Characteristics of the Pipe Network

Line	Length (m)	Diameter (mm)
A	520	400
B	840	400
C	520	400
D	840	400
E	52	600
F	78	600
G	720	800
I	195	800
Total	3,765	

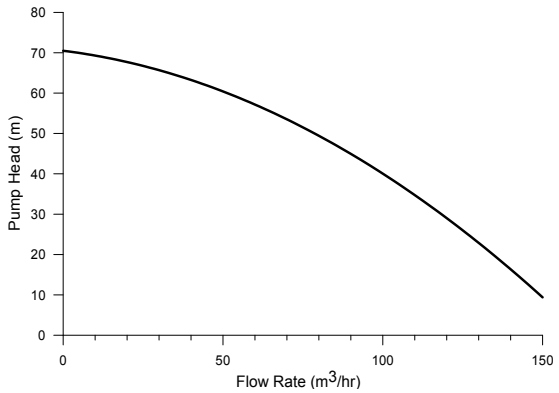

Fig. 3. Pump Characteristic Curve

의 마찰계수는 0.03으로 균일한 것으로 가정하였다. 자연지하수위와 노즐의 표고차이는 약 39 m로 설정하였다.

하천은 대수층을 완전 관통하고 있으며 제내지의 대수층은 하천 반대 방향으로 무한한 것으로 가정하였다. 대수층의 두께는 40 m이며 대수층의 구성물질은 모래자갈로 투수계수는 0.001 cm/s를 적용하였다. 각 관정에 설치된 펌프 특성곡선은 Fig. 3으로 제시되었다. 곡선으로부터 유도된 펌프특성 계수 a, b, 그리고 c는 각각 -0.0021, -0.099 그리고 70.5로 산정되었다.

3.2 등각사상

직선형태("1")의 하천경계가 존재하는 경우 하천변을 중심으로 대칭위치에 가상 관정을 이용하여 경계조건을 처리할 수 있다. 그런데 하천의 형태가 직선이 아닌 경우 하천 경계조건의 처리가 곤란하다. 여기서는 하천변의 형태가 연결된 두 개의 직선으로 나타낼 수 있는 경우로 가정하였다. 이러한 경우 복소해석(등각사상)을 이용하여 반 평면(half plane)으로 변환할 수 있다. 만곡부의 내각이 $\alpha\pi$일 때 반 평면 $u-v$로 변환하기 위한 mapping 함수는 다음과 같다.

$$w = z^{1/\alpha} \tag{7}$$

여기서, $z = x + iy$는 실제 평면, $w = u + iv$는 변환된 반평면이며, i는 단위허수 $\sqrt{-1}$ 이다. 반 평면에서도 지하수위 강하량 분포식은 Laplace 방정식으로 나타나며 "1" 자형 하천 경계는 통상적인 가상 관정을 이용하여 처리할 수 있다(Fig. 4).

그러면 반 평면에서 N_w개의 관정으로 인한 지하수위 강하량 분포는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$D(u,v) = \frac{q_0}{K}v - \sum_{j=1}^{N_w} \frac{Q_i}{2\pi Kb} ln \frac{r_{mj}}{r_{pj}} \tag{8}$$

여기서, q_0는 하천에 수직방향으로 유출되는 것으로 가정된 배후 지하수 기저유출 유속이며 여기서는 2×10^{-5}m/d로 설정하였다. r_{mj}와 r_{pj}는 각 각 반 평면에서 j번째 가상 주입정 (u_{mj}, v_{mj})과 j번째 실제 양수정(u_{pj}, v_{pj})으로부터 수위강하량 계산 지점까지의 거리를 나타낸다. 실제관정과 가상관정의 좌표 관계는 $u_{mj} = u_{pj}$, $v_{mj} = -v_{pj}$가 된다. 상술된 식으로 계산된 지하수위 강하량 분포는 역변환 함수를 통하여 실제 평면 좌표로 변환된다.

$$z = w^{\alpha} \tag{9}$$

3.3. 하천수 비율

취수정으로 유입되는 하천수량은 하천 경계의 흐름률

로부터 산정될 수 있다. 반 평면에서 단위 하천 길이당 흐름률은 다음과 같이 계산된다.

$$q = -KB\frac{\alpha h}{\alpha v}\Big|_{v=0} = \sum_{j=1}^{N_w}\frac{Q_i}{\pi B}\frac{2v_{pj}}{(u-u_{pj})^2+v_{pj}} - q_0 B \quad (10)$$

여기서, 흐름률이 양의 값인 경우 하천수 유입, 그렇지 않으면 기저유출이다. 취수정으로 유입되는 하천수량은 하천수가 유입되는(즉, $q>0$) 하천변에 대하여 적분하여 얻을 수 있다.

$$I_{riv} = \int_{-\infty}^{\infty} q(u)H(q)du \quad (11)$$

여기서, $H(x)$는 계단함수로 양의 x의 경우 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다.

36개 관정 중 하천 인접 관정 한 개가, 하천에서 멀리 떨어진 관정 한 개가 가동되는 경우를 각 각 분석하였다. Figs. 5 and 6에 가동 중인 관정이 빈 원으로 표시되고 하천변에는 흐름 방향을 화살표로 도시하였다. 관정방향 화살표는 하천수 유입, 반대방향 화살표는 기저유출을 의미한다. 단일 관정이 가동되는 상황에 대한 흐름에서는 가동관정 인근에서만 하천수가 유입됨을 나타낸다(Fig. 5). 단하천 인접 관정 가동의 경우 취수량은 2,260 m^3/d로 산정되었으며 이 중 하천수는 26%인 580 m^3/d로 나타났다. 두 번째 경우 취수량은 2,060 m^3/d로 약간 감소하였으며 하천수 비율은 0%로 나타났다(Table 3). 두 경우 모두 하천수보다 기저유출 지하수가 지배적으로 취수정으로 유입되고 있음을 나타낸다.

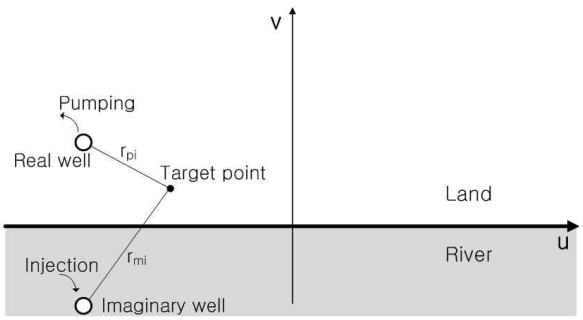

Fig. 4. Transformed u-v Half Plane

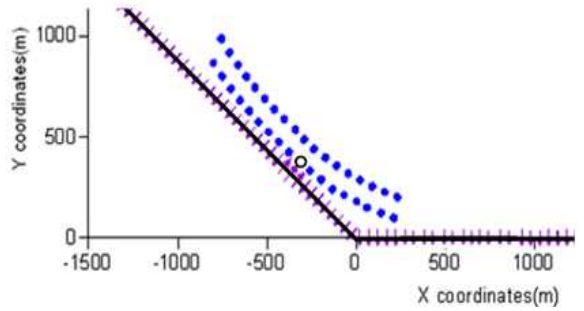

Fig. 5. Pumping from Single Well (open circle)-near the River

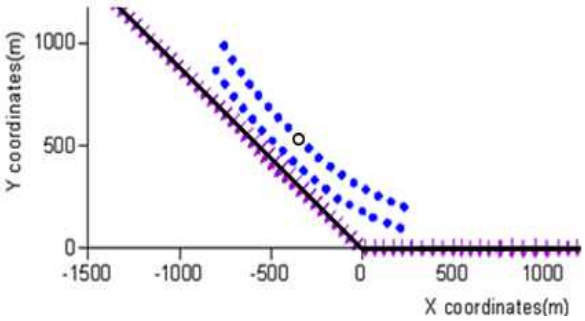

Fig. 6. Pumping from Single Well (open circle)- away from the River

Table 3. Pumping Rates and Ratios of River Water

Cases			Pumping rates		River water	
			Total (m^3/d)	Per well (m^3/d)	Flow rate (m^3/d)	Ratio (%)
Single well	Near river		2,260	2,260	580	26
	Away from river		2,060	2,060	0	0
Multiple wells	10 wells	Congregated	20,690	2,069	11,280	55
		Distributed	21,050	2,105	12,190	58
	18 wells	Congregated	35,880	1,993	25,900	72
		Distributed	36,500	2,027	24,740	68
		Near the river	35,210	1,956	25,130	71
		Away from the river	34,510	1,917	21,260	62
	30 wells		55,580	1,852	42,190	76

36개 관정 중 반에 해당하는 18개 관정을 (i) 집중, (ii) 분포, (iii) 하천 인접, (iv) 하천 이격 등 4가지 형태로 분포시켜 가동하는 경우를 분석하였다. 이 중 (i)과 (ii) 경우의 하천변 흐름 방향을 Figs. 7 and 8에 도시하였다. 두 가지 분포 중에서 (ii)의 경우가 하천수가 유입되는 하천변의 길이가 (i)의 경우보다 더 긴 것으로 나타났지만 하천수 유입량의 경우 (i)의 경우가 총 취수량 35,880 m^3/d의 72%인 25,900 m^3/d로 (ii)의 경우보다 더 큰 것으로 나타났다(Table 3). 4가지 경우 중에서 총 취수량은 최소 (iv) 34,510 m^3/d에서 최대 (ii) 36,500 m^3/d의 분포를 보였으며 하천수 비율은 최소 (iv) 62%에서 최대 (i) 72%의 분포를 보였다.

4가지 경우에 대한 동적 양정 요소의 평균값 분포는 Table 4에 제시되었다. 우물 손실은 대체적으로 유사한

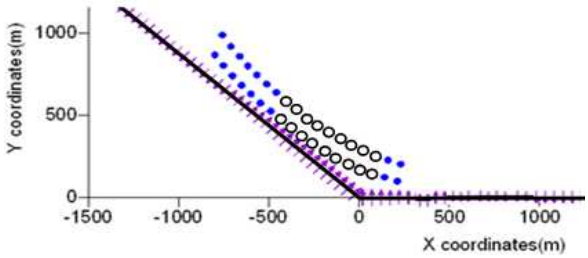

Fig. 7. Pumping from 18 wells (open circles)-congregated

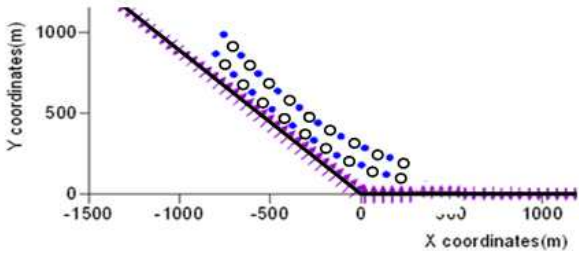

Fig. 8. Pumping from 18 Wells (open circles)-distributed

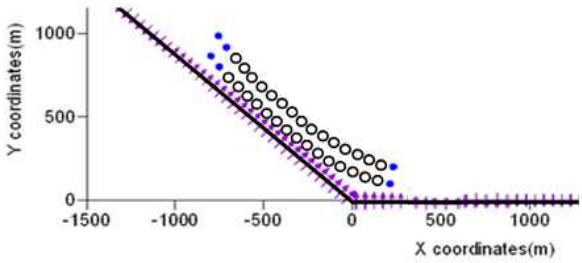

Fig. 9. Pumping from 30 Wells

값을 보였으며 대수층 수두손실의 변화폭은 2.38~2.88 m로 약간 더 크게 나타났다. 그런데 관망 수두손실은 취수정 가동 형태에 따라 1.55~3.81 m로 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 취수정 연결 관망의 설계와 취수정 가동 패턴이 중요한 요소임을 보여주는 것이라 할 수 있다.

전체 관정 중에서 10개 관정을 18개 관정과 유사한 형태로 집중시킨 경우와 분포시킨 경우에 대한 계산결과는 Tables 3 and 4에 제시되었다. 18개 경우의 결과와 유사한 거동을 보이고 있다. 30개 관정을 가동하는 경우에 대한 흐름 방향은 Fig. 9에 제시하였다. 총 양수량은 55,600여 m^3/d로 나타났으며 관정당 평균 취수량은 1,852 m^3/d로 감소하였지만 하천수 비율은 76%로 가장 크게 나타났다.

4. 결론 및 토의

강변여과 취수정들의 간섭효과와 취수정으로 유입되는 물의 하천수와 배후 지하수 비율을 해석적 모델을 이용하여 평가하는 방법을 제시하고, 실제에 가까운 가상의 강변여과 취수정에 대한 적용을 통하여 방법의 활용성과 강변여과 흐름을 분석하였다. 강변여과 시설에서는 지하수 흐름과 관망흐름이 취수펌프로 연결되어 상호 영향을 미친다. 따라서 간섭효과는 양수로 인한 지하수 수위강하와 관망의 수두손실로 인하여 발생한다. 고려된 가상의 강변

Table 4. Average Pumping Rates and Headloss

Number of wells	Pattern	Pumping rate(m^3/d)	Headloss (m)		
			Well	Aquifer	Pipe
10	Congregated	2,069	3.92	2.27	0.79
	Distributed	2,105	3.84	2.17	0.63
18	Congregated	1,993	3.47	2.88	1.55
	Distributed	2,027	3.48	2.61	1.91
	Near the river	1,956	3.15	2.38	3.81
	Away from the river	1,917	3.79	2.54	3.63
30	-	1,852	3.08	3.55	4.25

여과 시스템에서는 취수정 가동 패턴을 변화함에 따라 관망 수두손실로 인한 간섭효과가 지하수 흐름으로 간섭효과보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 관망 설계와 취수정 운전이 시스템 효율에 큰 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

취수정으로의 지하수와 하천수 유입비율은 강변 여과 시설 가동이 배후 지역의 지하수 흐름에 미치는 영향과 직결된다. 가상의 강변여과 취수정으로 유입되는 하천수 비율을 평가한 결과 동일한 갯수의 취수정을 가동하더라도 가동 취수정 분포 패턴에 따라 취수량은 최대 약 5%, 하천수 비율은 최소 62%에서 최대 72%까지 10%까지 변화하는 것으로 나타났다. 이러한 분석 결과는 가동 취수정 분포 패턴에 따라 취수량에는 물론 배후 지하수 유입량에도 큰 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 본 연구에서 제안된 강변여과 시스템 흐름의 통합 해석 방법은 취수정, 펌프 그리고 관망의 최적 설계 및 운영기술 개발에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

Ahn, K.H., Son, D.B., Kim, S.H., and Moon, H.J. (2005). "A Study on the Flow Rate and Permeability Reductions in Riverbed Filtration Using Column Experiment." *The Spring Conference of the Korean Society of Environmental Engineers, Korean Society of Environmental Engineers*, pp. 723-726.

Cheong, J.Y., Hamm, S.Y., Kim, H.S., Son, K.T., Cha, Y.H., Jang, S., and Baek, K.H. (2003). "Characteristics of Waterlevel Fluctuation in Riverside Alluvium of Daesan-myeon, Changwon City." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 13, No. 4, pp. 457-473.

Construction News (2012). Rising interest on medium and large water resources projects (February 28th, 2012).

Hyun, S.P., Moon, H.S., Yoon, P.S., Kim, B.A., and Ha, K.C. (2013). "Iron Extraction Characteristics of Sediment Samples from a River Bank Filtration Site." *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, Vol. 26, No. 2, pp. 129-138.

Jeong, J.M., Park, J.Y., Lee, J.J., Kim, Y.W., and Kim, S.H. (2013). "A Study on the Distribution of Hydraulic Head Along the Lateral in a Pilot-Scale Riverbank Filtration." *Environmental Engineering Research*, Vol. 35, No. 5, pp. 334-339.

Kim, G.B., Kim, B.W., Shin, S.H., and Park, J.H. (2009). "Iron and Manganese Removal through Well Development at River Bank Filtration Site." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 19, No. 3, pp. 389-400.

Kim, G.B., Shin, S.H., Kim, B.W., and Park, J.H. (2013). "Geochemical Characteristics of Groundwater during the Constant and Step-drawdown Pumping Tests at the River Bank Filtration Site." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 8, pp. 11-21.

Lee, D.K., Park, J.H., Park, C.K., Yang, J.S., Nam, D.H., Kim, D.K., Jeong, G.C., Choi, Y.S., and Boo, S.A. (2004). "Application of the artificial recharge to reduce the groundwater drawdown of the riverbank filtration." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 14, No. 4, pp. 391-400.

Lee, S.S., You, S.Y., and Lee, S.I. (2006). *Evaluation of Water Supply Amount Based on the Operation of Riverbank Filtration Pilot Plant in Seoul*. The Conference of Korean Society Civil Engineers, Korean Society Civil Engineers, pp. 205-253.

Park, N.S., Kim, S.Y., Kim, B.G., and Kim, I.R. (2008). "Evaluation of Pumping Rates for Multiple-Well Systems." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 18, No. 4, pp. 439-446.

Pi, S.M., and Kim, S.H. (2012). "A Study on the Optimum Design of Horizontal Collectors in Floodplain Filtration." *Environmental Engineering Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 430-437.

논문번호: 14-035	접수: 2014.04.15
수정일자: 2014.07.11	심사완료: 2014.07.11