

## 군정의 주입량의 정밀 제어를 위한 유량조절밸브의 개도 및 최소 펌프 소요양정

### Valve Openings and Minimum Pump Head for Precise Operation of Multiple Groundwater Injection Wells

박 남 식\* / 장 치 응\*\* / 조 광 우\*\*\*

Park, Namsik / Jang, Chi Woong / Cho, Kwangwoo

#### Abstract

Freshwater may be injected into aquifers to combat sea water intrusion in groundwater or to store water for later retrieval. For these cases to achieve the desired goal groundwater modeling is commonly used to determine locations and rates of injection wells. When these wells are connected to a pipe network, a flow control valve is installed for each well to regulate the injection rate. When a valve opening is modified, pressure changes in the entire pipe network and thereby changes flow rates in other wells. Therefore, desired valve openings must be determined for all injection wells. The pipe flow analysis allows estimation of the minimum pump power in addition to valve openings. Methods are developed to identify valve openings for multiple wells and the minimum pump power. The methodology developed in this work can contribute to precise operation of multiple injection wells.

**Keywords** : sea water intrusion, injection wells, valve openings, minimum pump head

#### 요 지

해수침투 방지나 대수층 인공함양을 위하여 다수의 관정을 통하여 대수층으로 물을 주입하는 공법이 있다. 이러한 공법의 경우 소기의 목적을 달성하기 위해서는 관정의 위치와 주입량, 그리고 결과되는 관정의 지하수위 등이 별도의 지하수 모델링을 통하여 결정된다. 주입수는 통상 관망을 통하여 관정으로 공급되는 데 이 때 관망에는 관정별 주입량을 조절하기 위한 밸브가 설치된다. 본 연구에서는 다수의 주입 관정이 연결된 관망에서 사전에 산정된 주입량 분포를 준수하기 위한 밸브 개도와 주입관망 가동에 필요한 펌프 최소 소요양정 산정방안을 제시하였다. 본 연구결과는 주입군정 운영의 정밀도를 향상시키는 데 기여할 수 있다.

**핵심용어** : 해수침투, 주입정, 밸브 개도, 펌프 최소 소요양정

#### 1. 서 론

지하수 해수침투란 바닷물이 해저를 통하여 대수층으

로 유입되는 현상을 일컫는다. 또한 내륙에서 흘러나오는 담수 지하수가 해저를 통하여 유출된다. 따라서 해안선 인근의 대수층에서는 밀도가 큰 해수가 대수층 하부에 쫓겨

\* 교신저자, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: [nspark@dau.ac.kr](mailto:nspark@dau.ac.kr), Tel: 82-51-200-7629)  
*Corresponding Author*, Professor., Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\* 동아대학교 토목공학과 학부과정 (e-mail: [18kps@naver.com](mailto:18kps@naver.com))  
Undergraduate, Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\* 한국환경정책평가연구원 (e-mail: [kwcho@kei.re.kr](mailto:kwcho@kei.re.kr))  
Korea Environment Institute, Sejong 339-007, Korea

형태로 존재하고 담수 지하수는 해수침투의 상부로 흘러 바다로 유출된다. 지하수 해수침투는 지하수 개발이 없는 자연 상태에서도 발생한다. 그러나 지하수 개발이 있는 경우에는 해수침투가 더욱 내륙으로 침범하는데 이 현상을 해수침투라 부르는 경우가 많다. 자연적이든 인위적이든 해수침투는 지하수 개발 시에 지하수의 염도를 증가시켜 지하수를 오염시킬 수 있다(Javadi et al., 2011; Johnson, 2007; Dettoraki et al., 2012; Pye et al., 1983).

지하수 해수침투를 저감하는 방법으로 담수를 대수층에 주입하는 방법이 있다(Bray et al., 2008; Dettoraki et al., 2012; Reichard et al., 2005; Van Dam, 1999; Finney et al., 1992; Johnson, 2007; Masciopinto et al., 2002; Ortuno et al., 2010; Tsani et al., 2001). 담수를 대수층에 주입하면 국부적으로 지하수위가 상승하며 인근으로 지하수가 퍼져나가며 주입 지점 인근에 지하수위 상승추가 생긴다. 지하수위 상승추는 해수침투를 상승추의 가장자리로 밀어낸다. 이는 상승추가 해수침투의 내륙쪽 끝에 위치하면 해수침투를 바다 쪽으로 밀어내지만 상승추가 해수침투의 중간부분에 위치할 때에는 해수침투의 일부를 더 내륙으로 침투시키는 부작용이 생길 수 있음을 의미한다. 따라서 최대한의 해수침투 퇴치 효과를 얻기 위해서는 주입 관정의 위치와 주입량 산정에 별도의 지하수 모델링이 필요하다(Alnahhal et al., 2010; Asano et al., 2004; Bear et al., 1964; Bray et al., 2008; Javadi et al., 2011; Pajeeraporn 2010; Reichard et al., 2005; Tsanis et al., 2001).

해수침투 저감 대상 지역이 작거나 대수층의 수리지질 특성이 허용되는 경우에는 하나의 관정으로도 지역에서 요구되는 지하수위 상승분포를 달성할 수 있다. 그런데 대상 지역이 큰 경우에는 다수의 관정에서 담수를 주입해야 하는 경우가 있다. 여러 개의 주입정이 필요한 경우 관정의 개수, 위치, 그리고 주입정별 주입량 등은 지하수 모델링을 통하여 결정될 수 있다. 지하수 모델링에서는 각 관정에 대한 주입량이 주입되는 경우 관정의 지하수위가 산정된다.

다수의 주입정이 있는 경우 관망으로 물이 공급된다. 물 공급지점(배수지 등)의 수위가 낮은 경우 주입펌프를 설치해야 한다. 지하수 모델링을 통하여 도출된 관정별 주입량을 준수하려면 유량 조절 밸브를 조작하여야 한다. 그런데 관정이 다수인 경우 어떤 밸브를 조작하면 관망 전체의 수압이 변화하고, 그로 인하여 다른 관정의 주입량이 변화하게 된다. 따라서 다수의 관정에서 사전에 지정된 관정별 주입량을 준수하기 위해서는 관망 전체 흐름

을 고려하여 모든 밸브의 개도(degree of opening)를 결정해야 한다.

본 연구의 주요 목적은 다수의 주입정을 연결하는 관망에서 관정별로 지정된 주입량과 관정별 지하수위를 충족시킬 수 있는 밸브들의 개도와 펌프가 필요한 경우 최소 소요양정의 산정방법을 제시하는 것이다.

## 2. 연구내용

본 연구에서 대상으로 하는 주입펌프-관망 시스템의 해석은 지하수모델링 등을 통하여 사전에 산정된 주입정의 개수, 위치, 주입량 분포를 바탕으로 한다. 지하수 모델링에서는 주입의 목적(해수침투 저감, 수자원확보를 위한 인공함양 등)을 달성시킬 수 있는 주입정의 조합이 도출되어야 한다. 주입의 목적을 예로 들면 해수침투저감의 경우 목적은 현재 내륙  $x$ km까지 침투한 해수침투를 해안선에서  $y(<x)$ km 이내로 밀어내는 것을 생각할 수 있다. 어떤 경우든 주입의 효과는 주입정과 주변의 지하수위 상승으로 달성하는 것이다. 따라서 주입 관망에서는 관정별로 지하수위(즉, 관망의 하류부 경계조건)를 만족시키며 관정별 주입량을 정확하게 공급하도록 운영되어야 한다. 2개의 주입정이 설치되는 경우에 대한 펌프-관망-주입정 모식도를 Fig. 1에 제시하였다. 여기서  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는 각각의 주입량이며,  $H_1$ 과  $H_2$ 는 주입의 결과로 나타나는 각각의 지하수위이다.

관망 해석을 위하여 관망을 요소(element)와 절점(node)로 구분하는 것이 편리하다. 여기서 요소는 수두 변화를 발생시키는 관망 부속물로 관로, 밸브, 펌프 등이 있으며 요소에는 에너지 방정식이 적용된다. 절점이란 특성이 서로 다른 두 개 또는 그 이상 개수의 요소를 연결하는 가상의 접합점 또는 저수지나 관말/수요처 등을 의미한다. 절점에서는 수두 변화가 발생하지 않으므로 연속방정식이 적용된다. 본 연구에서는 관정들이 분기형 관망으로 연결된 경우를 대상으로 한다. 분기형 관망의 경우 관로별 유량이 즉시 결정되므로 흐름 해석이 간편하다.

$n$ 개의 관정에 물을 공급하기 위한 분기형 관망 시스템은 Figs. 2 and 3과 같다. 관망은 본관(Fig. 2)과 지관(Fig. 3)으로 구분하였다. 본관은 배수지에서 모든 관정을 연결하는 주 관로, 지관은 본관에서 분리되는 지점부터 주입관말까지를 포함한다. 통상 지하수 모델링에서 제시되는 관정의 지하수위는 관정 인근 대수층의 평균 지하수위이다. 그런데 실제 현장에서는 우물손실이라 불리는 관정 스크린에서 기타손실(또는 소손실)이 발생한다.

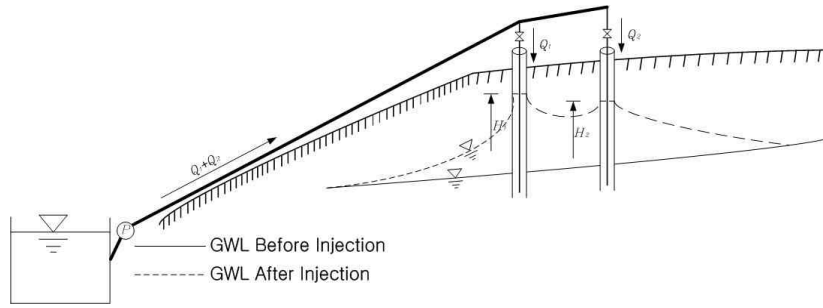


Fig. 1. Schematic of Two Injection Wells, Connecting Pipelines and a Pump

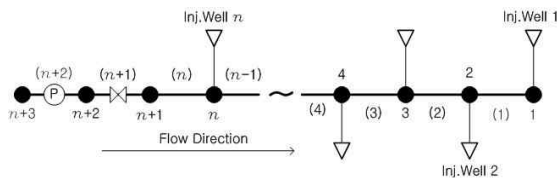


Fig. 2. Mains Pipeline with  $n$  Injection Wells

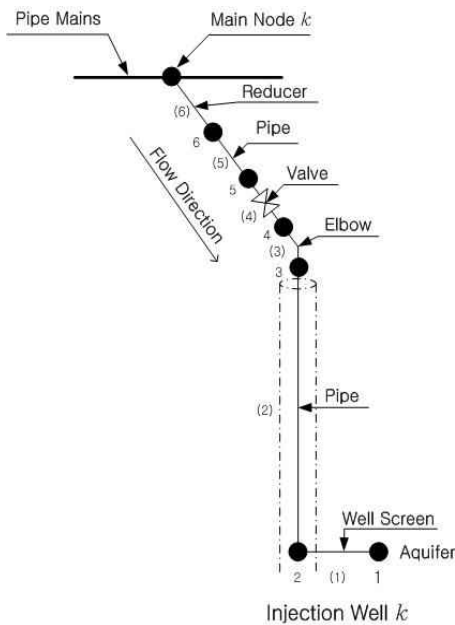


Fig. 3. Pipeline Sub System Connecting Mains Pipeline and the Aquifer

본관의 절점과 요소 번호는 최하류 지점으로부터 상류 방향으로 순차적으로 증가하도록 배정하였다. 인접한 관정들을 위한 지관이 분기되는 관로 구간은 유량이 일정하므로 관경 등의 특성이 균일하게 유지된다고 가정하였다. 배수지 하류에는 펌프와 유량 조절 밸브가 위치하는 것으로 가정하였다. 그러면 관정이  $n$ 개인 경우 본관시스템은  $n+3$ 개의 절점과  $n+2$ 개의 요소로 구성된다. 절점번호는 숫자로, 요소번호는 괄호안에 표기하였다. 요소 (1)은 주

입정 1과 2의 분기점을 연결하는 관로, 요소( $n-1$ )은 주입정  $n-1$ 과  $n$ 의 분기점 사이의 관로, 요소( $n$ )은 밸브 하류의 관로, 요소( $n+1$ )은 밸브, 요소( $n+2$ )는 펌프를 나타낸다. 절점 1~ $n$ 은 주입지관의 분기점,  $n+1$ 은 밸브 하류,  $n+2$ 는 펌프 하류,  $n+3$ 은 최상류의 배수지를 나타낸다.

각 관경별로 주입수를 송수하는 주입 지관은 7개의 절점과 6개의 요소로 구성하였다. 요소 (1)은 관정의 스크린, (2)는 관정내 관로, (3)은 지관과 관정내 관로의 연결관(엘보우 및 관경 축소), (4)는 밸브, (5)는 본관으로부터 관정내 관로까지의 연결 관로, (6)은 본관과 지관의 분기관로를 나타낸다. 절점 1은 관정 스크린 외부의 대수층, 2는 지관의 관말, 3은 연결관 엘보우 하류, 4는 엘보우와 밸브의 연결부, 5는 밸브 상류, 6은 분기관로의 하류, 7은 본관의 분기점을 나타낸다.

다수의 주입정 관망 수리해석을 통하여 펌프의 소요 양정과 유량 밸브 개도를 산정하는 방법은 다음과 같이 크게 다섯 단계로 구분될 수 있다.

- A. **관로 요소의 손실수두 계산:** 본관과 지관에 속한 요소들에서 발생하는 수두손실을 구한다. 단 펌프 양정과 주입정별 유량조절 밸브의 수두손실은 미지수이므로 제외한다. 주입정별 주입량이 사전 지정되어 있고 분기형 관망이므로 모든 관로의 유량은 쉽게 파악되므로 마찰계수와 손실계수가 산정되면 수두손실은 간단하게 구할 수 있다.
- B. **본관 절점수두 계산:** 배수지 수위를 기준으로 본관에서 발생하는 손실을 고려하여 본관의 절점 1(최하류)부터  $n+2$ 까지에 대한 수두를 계산한다. 여기서도 펌프의 양정은 "0"으로 가정한다.

$$H_k = H_{k+1} - h_{(k)}, \quad k = 1 \dots n+2 \quad (1)$$

여기서,  $H$ 는 절점의 수두, 아래 첨자는 본관의 절점 번호, 그리고 절점  $n+3$ 은 배수지를 나타낸다.  $h_{(k)}$ 는 본관의 요소( $k$ )에서 발생하는 손실수두이다. 본 연구에서 마찰손실은 보편적으로 사용되는 Darcy-

Weisbach식으로, 손실은 손실계수로 산정하였다.

C. **지관 절점수두 계산:**  $n$ 개의 주입정에 물을 공급하는 지관의 절점 수두를 계산한다. 각 관정에서 대수층의 지하수위가 사전에 수행된 지하수 모델링에서 지정되어 있으므로 지관의 절점 수두를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$H_{k,j+1} = H_{k,j} + h_{k,(j)}, \quad j = 1 \dots 6, \quad k = 1 \dots n \quad (2)$$

여기서, 두 번째 아래 첨자는 지관의 절점번호,  $h_{k,(j)}$ 는 주입정  $k$ 에 연결된 지관의 요소( $j$ )에서 발생한 수두손실이다. 이때 유량조절 밸브(지관 요소 (4))의 손실은 "0"으로 가정한다.

D. **지관의 유량조절 밸브 개도 계산:** 주입정  $k$ 의 지관 절점 7은 본관의 절점  $k$ 와 동일한 지점이다. 그러나 지관 손실을 고려하여 계산된 지관 절점 7의 수두는 본관 손실을 고려하여 계산된 절점  $k$ 의 수두는 같지 않다. 따라서 두 수두가 동일해지기 위해서는 지관의 유량조절밸브에서 다음의 수두손실을 발생시켜야 한다.

$$h_{k,(4)} = H_k - H_{k,7}, \quad k = 1 \dots n \quad (3)$$

총  $n$ 개의 지관 밸브 손실 중에서 최소값( $h_{k,(4)}^{\min}$ )을 찾는다.

D.1 만약  $h_{k,(4)}^{\min} < 0$ 인 경우에는 본관의 수두가 충분하지 않으므로 본관 절점들의 수두는 상승되어야 한다. 이는 관망 상류에 펌프가 필요함을 나타낸다. 반대로  $h_{k,(4)}^{\min} > 0$ 인 경우에는 본관 최상류의 배수지 수위가 너무 높은 경우가 해당된다. 이 경우 주입정별 유량 조절밸브에서 기 산정된 수두손실을 발생시켜 수리 조건을 만족시킬 수 있다. 다만 이는 본관과 지관에서 전반적으로 높은 수압이 유지되므로 바람직하지 않다. 따라서 여기서는 본관 상류의 밸브에서 여분의 수두 손실( $h_{k,(4)}^{\min}$ )을 발생시키는 방안을 택하였다. 펌프가 필요하든 밸브손실이 필요하든 본관의 절점 수두는 모두 조절이 되어야한다. 즉,

$$H_k^{(revised)} = H_k - h_{k,(4)}^{\min}, \quad k = 1 \dots n + 2 \quad (4)$$

마찬가지로 지관의 절점 5~7의 수두와 지관의 유량조절 밸브손실이 조정되어야 한다. 예를 들면 밸브손실의 경우

$$h_{k,(4)}^{(revised)} = h_{k,(4)} - h_{k,(4)}^{\min}, \quad k = 1 \dots n \quad (5)$$

위의 절차를 거치면 최소한 한 개의 주입정의 유량조절밸브 손실은 0(완전개방)으로 나타난다. 이는 주입관망에 펌프가 필요한 경우 펌프가 공급해야하는 양정이 최소임을 의미한다. 대부분의 밸브는 완전 개방 상태에서도 약간의 수두손실이 발생하지만 여기서는 무시하였다.

D.2 각 지관의 밸브손실수두가 계산되면 각 밸브의 개도를 다음과 같이 결정한다. 먼저 각 밸브의 손실계수는 손실수두를 속도수두로 나누어 계산할 수 있다. 손실계수와 개도 사이의 관계는 밸브 제작사에서 제공하는 개도-손실계수 곡선으로부터 산정될 수 있다.

E. **펌프 최소 소요양정 계산:** 이 단계는  $h_{k,(4)}^{\min} < 0$ 인 경우에만 해당된다. 이 경우 본관의 상류에 위치한 펌프에서 담당해야할 최소 소요양정( $H_p$ )는 다음과 같이 계산된다.

$$H_p = H_{n+2} - H_{n+3} \quad (6)$$

### 3. 적용예제

여기서는 본 연구자들이 가정한 8개의 주입정으로 총 3,150 m<sup>3</sup>/d의 물이 주입되는 가상의 상황에 대하여 전술된 해석 방법의 적용방법을 제시하였다. 8개 관정은 분기식 관망으로 연결되어 물이 공급된다(Fig. 2에서  $n=8$ 인 경우). 본관에 속한 요소들의 특성은 Table 1에 제시되었다. 별도의 지하수 모델링에서 결정되는 관정의 위치, 주입량 그리고 지하수위는 Table 2에 제시된 값으로 가정하

Table 1. Characteristics of mains elements

Element No.	Type	Length (m)	Loss Coefficient
(1)	Pipe	300	-
(2)	Pipe	200	-
(3)	Pipe	100	-
(4)	Pipe	200	-
(5)	Pipe	300	-
(6)	Pipe	200	-
(7)	Pipe	100	-
(8)	Pipe	300	-
(9)	Valve	-	10.1
(10)	Pump	-	-

**Table 2. Injection Wells and Characteristics of Sub Systems**

Well No.	Element No.	Type	Length (m)	Loss Coefficient	Inj.Rate (m <sup>3</sup> /day)	GW Level (m)
1	(1)	Screen	-	10.0	400	20
	(2)	Pipe in the well	20.5	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	-		
	(5)	Pipe	55	TBD		
	(6)	Tee junction	-	2.2		
2	(1)	Screen	-	10.0	350	19.5
	(2)	Pipe in the well	22.5	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	TBD		
	(5)	Pipe	60	-		
	(6)	Tee junction	-	2.2		
3	(1)	Screen	-	10.0	420	18.5
	(2)	Pipe in the well	27.6	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	TBD		
	(5)	Pipe	40	-		
	(6)	Tee junction	-	2.2		
4	(1)	Screen	-	10.0	300	16.4
	(2)	Pipe in the well	26.09	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	TBD		
	(5)	Pipe	70	-		
	(6)	Tee junction	-	2.2		
5	(1)	Screen	-	10.0	500	17.2
	(2)	Pipe in the well	27.42	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	TBD		
	(5)	Pipe	80	-		
	(6)	Tee junction	-	2.2		
6	(1)	Screen	-	10.0	460	12.5
	(2)	Pipe in the well	20.60	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	TBD		
	(5)	Pipe	70	-		
	(6)	Tee junction	-	2.2		
7	(1)	Screen	-	10.0	340	14.6
	(2)	Pipe in the well	26.50	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	TBD		
	(5)	Pipe	40	-		
	(6)	Tee junction	-	2.2		
8	(1)	Screen	-	10.0	390	10.5
	(2)	Pipe in the well	21.09	-		
	(3)	Elbow	-	2.2		
	(4)	Valve	-	TBD		
	(5)	Pipe	50	-		
	(6)	Tee junction	-	2.2		

TBD: To be determined

었다. 주입수가 제공되는 배수지의 수위는 0m로 설정하였다. 지하수위가 배수지의 수위보다 높으므로 본 예제에서는 펌프가 필요하다.

관경별 주입량은 최소 300 m<sup>3</sup>/d에서 최대 500 m<sup>3</sup>/d의 범위로, 지정된 유량이 주입될 때 각 관경의 지하수위는 10~20m의 범위에서 형성되는 것으로 가정하였다. 8개의 주입정에 물을 공급하는 본관의 길이는 100~300m, 본관과 관경을 연결하는 지관의 길이는 40~80m의 범위로 설정하였다. 관경의 스크린 손실계수는 10.0, 본관의 T형 분기관의 손실계수는 2.2, 곡관(elbow) 손실계수는 2.2로 가정 하였다.

수리해석을 통한 밸브 조절의 중요성을 강조하기 위하여 총 4가지 경우의 예를 고려하였다. 각 경우마다 관로들의 관경을 달리하였다. 본관의 관로의 경우 8개 요소를 개별적으로, 지관의 2개 관로 요소((2)와 (5))의 경우 동일한 관경을 적용하였다(Table 3). 경우 1에서 경우 4로 진행되면서 본관과 지관의 직경은 공통적으로 감소하도록 설정 하였다.

4가지 경우에 대한 수리해석 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 그림의 종축은 수두를, 횡축은 배수지로부터 측정된 관로 연장이다. 굵은 실선은 본관의 수두 분포를, 심볼과 함께 도시된 점선은 각 지관의 수두 분포를 나타낸다. 총 8개의 지관 수두 분포 곡선은 본관의 최상류 지점에 연결

된 주입정(8)부터 최하류 지점에 연결된 주입정(1)까지 역순으로 제시되었다. 본관 수두 분포 중 0m 지점의 수두변화는 펌프 양정과 펌프하류에 설치된 본관 밸브 수두 손실을 나타낸다.

본관 마찰손실은 Fig. 4의 본관 에너지 선에서 볼 수 있듯이 관경의 감소에 따라 경사가 급격히 증가하는 것으로 나타난다. 이는 Darcy-Weisbach식에서 볼 수 있듯이 마찰계수에 미치는 영향을 무시하면 마찰손실은 관경의 5승에 반비례하기 때문이다. 본관 마찰손실 관점에서는 손실이 가장 작은 경우1이 바람직하지만 낮은 유속으로 인한 수질문제 측면을 고려할 때 가장 불리할 수도 있다. 이는 전형적인 trade-off 문제의 하나이다.

지관의 수두 분포에서 경사 선은 관로 마찰손실, 연결 선은 밸브 손실 수두를 나타낸다. 지관의 마찰 손실의 크기 역시 관경으로 결정된다. 지관에 가장 작은 관경(0.05 m)이 사용된 경우 3의 4번과 7번 주입정 지관의 경우 가장 큰 마찰 손실을 나타낸다. 이로 인하여 본관에서 큰 수두(즉, 큰 펌프 양정)를 제공해야하며 나머지 지관에서는 큰 수두손실을 일으켜야하는 비효율적 관망 구성의 예를 경우 3이 보여준다.

전술한 바와 같이 본관의 관경 뿐 아니라 지관의 관경도 주입 관망 시스템의 수두 분포 및 펌프 양정에 큰 영향을 미친다. 전술한 바와 같이 주입관망 시스템에서 흐름

**Table 3. Trial Diameters (m) for Mains Pipe Elements and Subsystem Elements (2) and (5) for each Injection Well**

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Mains Element	(1)	0.5	0.2	0.15	0.15
	(2)	0.5	0.2	0.15	0.15
	(3)	0.5	0.2	0.15	0.15
	(4)	0.5	0.2	0.2	0.15
	(5)	0.5	0.2	0.2	0.15
	(6)	0.5	0.2	0.2	0.15
	(7)	0.5	0.2	0.2	0.15
	(8)	0.5	0.2	0.2	0.15
Sub System (Inj. Well)	1	0.2	0.1	0.12	0.09
	2	0.12	0.1	0.09	0.09
	3	0.12	0.1	0.12	0.09
	4	0.09	0.1	0.05	0.09
	5	0.1	0.1	0.15	0.09
	6	0.09	0.1	0.15	0.09
	7	0.09	0.1	0.05	0.09
	8	0.09	0.1	0.09	0.09

의 ‘병목’에서는 다른 수두손실이 크기 때문에 밸브 손실을 최소화해야 한다, 즉 밸브손실이 ‘0’이 되어야한다. 경우 1, 2, 그리고 4에서는 주입정 1이, 경우 3에서는 주입정 4가 ‘병목’으로 나타난다(Fig. 4, Table 4).

주입정 별 주입량 및 지관 말에서 지하수위를 준수할 수 있는 주입 관망의 운영을 위한 펌프 최소 소요 양정은

최소 20.1m에서 최대 58.2m의 큰 범위로 나타났다. 최소 소요 양정은 유량이 큰 본관의 상류부에 소구경 관로가 적용된 경우 4에서, 최소 소요 양정은 대구경 관로가 적용된 경우 1에서 도출되었다. 그러나 펌프 최소 소요 양정은 본관에 의해서만 결정되는 것이 아니다. 경우 3에서는 지관 4의 마찰손실이 펌프 소요 양정을 대폭 증가시켰다(Fig. 4).

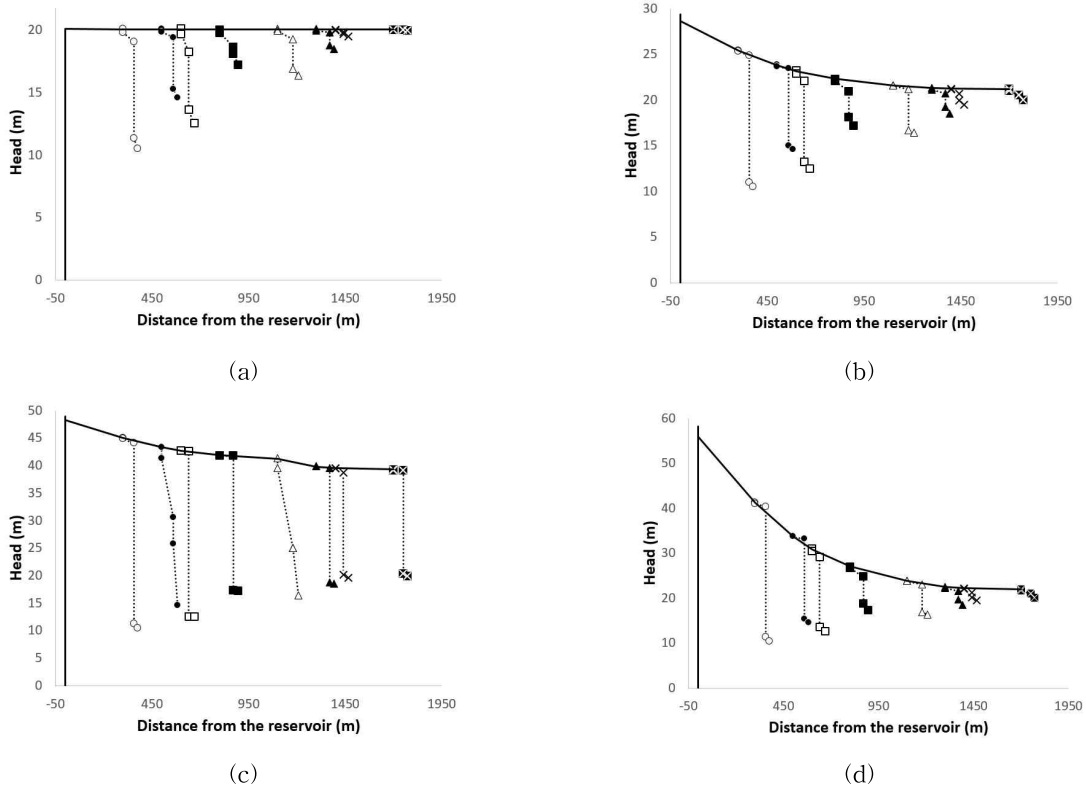


Fig. 4. Head Profiles (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3; (d) Case 4

Table 4. Head Losses (m), Loss Coefficients, and Openings (%) for Valves; and the Required Minimum Pump Head (m)

Inj. Well #	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	Head Loss	Loss Coeff.	Opening	Head Loss	Loss Coeff.	Opening	Head Loss	Loss Coeff.	Opening	Head Loss	Loss Coeff.	Opening
1	0	0	90	0	0	90	18.81	2201	5	0	0	90
2	0.14	22	30	0.79	58	20	18.46	893	6	1.13	55	20
3	1.02	108	14	1.57	81	17	20.83	2210	5	1.96	66	19
4	2.35	155	12	4.44	446	8	0	0	90	6.18	406	8
5	0.55	20	30	2.82	102	14	24.38	4459	5	6.02	143	12
6	4.64	130	13	8.90	380	8	29.99	6480	5	15.48	433	8
7	4.14	212	11	8.39	655	7	4.84	24	29	17.87	916	6
8	7.76	302	9	13.84	822	6	32.71	1274	5	29.01	1130	5
sum	21.6	-	-	42.75	-	-	153.02	-	-	81.65	-	-
$H_p$	20.13			29.35			48.94			58.21		

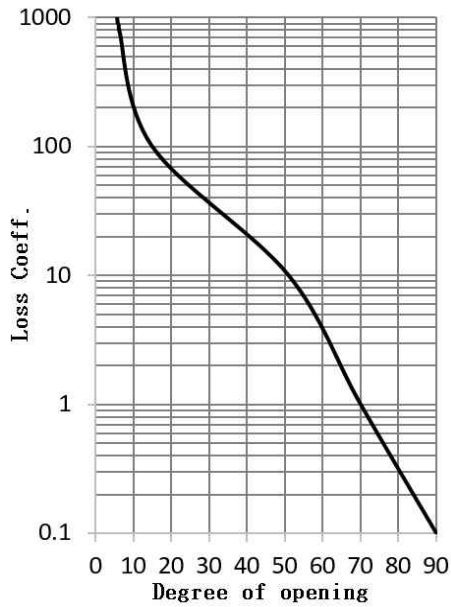


Fig. 5. Hypothetical Relationship between Valve Loss Coefficient and Degree of Opening (%)

경우 1, 2, 그리고 4에서는 지관에 적당한 관경이 채택 되었으므로 지하수위가 가장 높은 주입정 1이 시스템 전체의 거동을 좌지우지 한다(즉, 1번 주입정의 밸브 손실이 0). 그러나 경우 3에서는 소구경 지관이 사용된 주입정 4 (그리고 7)의 마찰 손실이 시스템 거동을 결정하였다(즉, 주입정 4의 밸브손실이 0).

경우별 밸브 손실로부터 손실계수를 산정한 후 밸브 개도는 Fig. 5의 가상의 밸브곡선으로부터 산정하였다. 고려된 밸브 곡선은 완전 개방 상태에서 개도가 90%에 머무르므로 Table 4에서 최고 개도는 90%로 제시하였다. 버터플라이 밸브나 볼 밸브 등에서 이러한 특성을 보인다.

#### 4. 결 론

해수침투 방지나 대수층 인공함양을 위하여 다수의 관정을 통하여 대수층으로 물을 주입하는 경우가 있다. 이러한 경우 소기의 목적을 달성하기 위해서는 관정의 위치와 주입량 등이 별도의 지하수 모델링을 통하여 결정된다. 지하수 모델링에서는 지정된 유량으로 물이 주입되는 경우 관정의 지하수위도 함께 산출된다. 주입정을 연결하는 주입관망에게는 관정의 지하수위가 관말의 경계조건으로 작용한다. 따라서 주입관망은 관로별 유량분포와 관말의 지하수위를 준수할 수 있도록 운영되어야 한다. 관망에는 관정별 주입량을 조절하기 위한 밸브가 설치된다. 따라서 지정된 유량을 해당 관정에 주입하기 위해서는 밸브

브의 개도를 적절히 조절해야한다. 펌프의 소요양정과 유량 밸브 개도를 산정하기 위한 관망 수리해석 방법 및 순서는 다음과 같다. 본관 및 지관의 관로 요소에 따른 손실 수두를 계산해가며 하류 절점의 수두를 결정하고 본관과 지관의 합류부 절점 수두를 같게 만드는 밸브의 수두손실을 계산하게 된다. 산정된 밸브의 수두손실을 속도수두로 나누어 손실계수를 도출하게 되며, 마지막으로 이때에 필요한 펌프 소요양정을 산정하게 된다. 도출된 밸브의 손실계수는 해당 밸브 제조사의 밸브곡선에 따라 확인하여 조절할 수 있다.

예제 적용결과 전체 주입관망에서 가장 큰 손실을 야기하는 ‘병목’ 지관에서는 추가적인 수두손실을 방지하기 위하여 밸브가 완전개방 되어야하는 것으로 나타났다. 펌프 최소 소요양정은 주입관로의 손실특성과 지하수위 경계조건으로부터 산정된다. 예제에서는 관경분포에 따라 펌프 최소 소요양정이 20.1 m에서 58m까지 큰 범위로 산출되었다. 이는 관경의 적절한 선정이 중요함을 잘 보여준다. 따라서 본 기술을 적용하면 복수의 주입정의 정밀한 운영 뿐 아니라 주입 펌프의 동력 사용을 최소화시킬 수 있다. 본 연구를 바탕으로 주입관망의 최적설계 기술 개발 등이 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 해수면 상승에 따른 지하수 염분 침투 및 농경지 염류화 평가, 세부과제번호: PJ010475022015)의 지원에 의해 작성되었습니다.

#### Reference

- Alnahhal, S., Afifi, S., Qahman, K., Dentoni, M., and Lecca, G. (2010). A simulation/optimization approach to manage groundwater resources in the Gaza aquifer (Palestine), XVIII International Conference on Water Resources, Barcelona.
- Asano, T., and Cotruvo, J.A. (2004). “Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations.” *Water Research*, Vol. 38, Issue 8, pp. 1941-1951.
- Bear, J. and Dagan, G. (1964). Moving interface in coastal aquifers, Proc. A.S.C.E. Vol. 90 No. 4, pp. 193-215.
- Bray, B.S., and Yeh, W.W.-G. (2008). “Improving seawater



- barrier operation with simulation optimization in southern California.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 134, No. 2, pp. 171–180.
- Detloraki, M.D., Dokou, Z., Varouchakis, E.A., and Karatzas, G.P. (2012). Optimal pumping scenarios for the estimation of the saltwater intrusion front in the coastal aquifer of Tympaki, Crete–Greece, EGU General Assembly, April, 2012 in Vienna, Austria., p.3178.
- Finney, B., Samsuhadi A., and Willis, R. (1992). “Quasi-3-dimensional optimization model of Jakarta Basin.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 118, No. 1, pp. 18–31.
- Javadi, A.A., Abd-Elhamid, H.F., and Farmani, R. (2011). A simulation-optimization model to control seawater intrusion in coastal aquifers using abstraction/recharge wells, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Published online
- Johnson, T. (2007). “Battling seawater intrusion in the central & west coast basins.” *Water Replenishment District Technical Bulletin*, Vol. 13.
- Masciopinto, C., and Carrieri, C. (2002). “Assessment of water quality after 10 years of reclaimed water injection: the Nardo fractured aquifer (Southern Italy).” *Ground Water Monitoring Remediation*, Vol. 22, pp. 88–97.
- Ortuno, F., Molinero, J., Custodio, E., Juarez, I., Garrido, T., and Fraile, J. (2010). Seawater intrusion barrier in the deltaic Llobregat aquifer (Barcelona, Spain): performance and pilot phase results, 21st Salt Water Intrusion Meeting, University of Azores, Portugal.
- Pajeeraporn, W. (2010). Study of seawater intrusion and controlling methods using physical model simulations, Master Thesis, Suranaree University of Technology
- Pye, V.L., and Patrick, R. (1983). “Ground water contamination in the United States.” *Science*, Vol. 221, No. 4612, pp. 713–718.
- Reichard, E.G., and Johnson, T.A. (2005). “Assessment of regional management strategies for controlling seawater intrusion.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 4, pp. 280–291.
- Tsanis, I.K., and Song, L.F. (2001). “Remediation of sea water intrusion: A case study.” *Groundwater Monitoring and Remediation*, Vol. 21, No. 6, pp. 152–161.
- Van Dam, J.C. (1999). Chapter 4: Exploitation, restoration and management, *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers—Concepts, Methods and Practices*, by Bear, J., et al. Eds., Kluwer Academic, pp. 73–125.

paper number : 15-075

Received : 16 September 2015

Revised : 30 September 2015 / 1 October 2015

Accepted : 1 October 2015