

영향반경을 이용한 양수처리법 설계에 대한 연구

김정우 · 이강근*

서울대학교 지구환경과학부

A Study on Pump and Treat Design through Evaluation of Radius of Influence

Jeong-Woo Kim · Kang-Kun Lee*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

It is necessary to decide the pumping rate and pumping well location together with the capture zone in order to determine an appropriate groundwater remediation strategy to manage the contaminated groundwater. The relationship between the capture zone and the drawdown radius of influence (ROI_{cs}) was considered. ROI_{cs} is defined as the distance where the criteria of drawdown is cs meter from pumping well in this paper. A method to decide the required pumping rate for the remediation of contaminated groundwater in order to create appropriate ROI_{cs} is suggested by using the Theis equation (1935) and Cooper-Jacob equation (1946). It was shown in this study that ROI_{cs} is in proportion to the pumping rate and the criteria of drawdown, which decides ROI_{cs} , is inversely proportional to Ti value (transmissivity \times hydraulic gradient). The pumping rate which creates the required ROI_{cs} could be planned through the relationship between the ROI_{cs} and pumping rates (ROI_{cs} -Q curve) of the field sites 1, 2 and 3. If the drawdown is investigated along with Ti value and pumping rate at a specific site where pump and treat remediation is planned, it is expected that the required criteria of drawdown can be evaluated by using the relationship between the cs and Ti (cs-Ti curve).

Key words : Pump and treat, Radius of influence (ROI), Capture zone, Criteria of drawdown (cs)

1. 서 론

양수처리법은 지하수 오염지역에서 발생한 오염지하수를 현장내 처리방법으로 정화하기 위해 일반적으로 많이 적용되는 방법이다. 양수처리법을 현장에서 적용할 때 오염된 지하수를 제어하기 위해서 포획구간(capture zone)을 고려하면서 양수정의 위치와 양수량이 계획되어야 한다. 최근까지 양수정의 포획구간, 지하수유선(pathline), 이동 시간(travel time)을 계산하기 위한 많은 연구가 진행되었다(Javandel et al., 1984; Javandel and Tsang, 1986; Shafer, 1987a; Shafer, 1987b; Newsom and Wilson, 1988; Blandford and Huyakorn, 1989; Pollock, 1989; Strack, 1989; Bonn and Rounds, 1990; Bair et al., 1991; Rumbaugh, 1991; Bair and Roadcap, 1992; Fitts, 1989; Gorelick et al., 1993). 지하수 오염원이 양

수정을 지나치지 않고 모두 양수정에 흘러 들어가야 하기 때문에, 양수처리법의 현장적용시 기본적인 원칙은 모든 오염원이 포획될 수 있도록 양수정의 위치 및 양수량이 결정되어야 한다는 것이다.

포획구간은 양수정으로 지하수가 배출되는 대수층의 영역을 말하며, 시간이 경과함에 따라 상류에 위치한 지하수가 양수정 방향으로 흘러들어가기 때문에 포획구간 영역은 양수정의 좌우 가장 바깥쪽에 위치하는 지하수유선의 폭과 함께 상류방향의 영역까지 포함된다. Javandel and Tsang, 1986은 지하수 흐름이 균일(uniform flow)한 지역에서 단일 관정주변의 포획구간을 평가할 수 있도록 간단한 그래픽 방법을 제시하였다. Fig. 1에 있는 그래픽 방법은 균일 흐름 지역에서 투수계수(T, transmissivity), 양수량(Q, pumping rate), 수두구배(i, hydraulic gradient)들의 관계수식을 통해 지하수 흐름 정체지점(stagnation

*Corresponding author : kkleee@snu.ac.kr

Received : 2013. 2. 6 Reviewed : 2014. 3. 14 Accepted : 2014. 3. 14

Discussion until : 2014. 8. 31

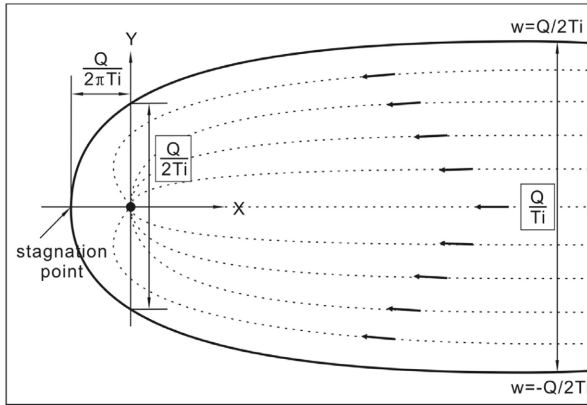


Fig. 1. Illustration of the capture zone of a single pumping well in a uniform regional flow field (Javandel and Tsang, 1986).

point)과 지하수 유선의 분수령 위치를 결정하는 방법이다. 영향반경(radius of influence, 이하 ROI)은 양수정에서 양수했을 때 지하수위 하강이 더 이상 발생하지 않는 지점까지 거리를 의미한다. 포획구간을 추정하는 방법은 모델링과 간략적 그래픽 방법이 있을 수 있지만 현장의 불균질성에 의한 부정확성과 수많은 관측자료의 필요성에 의해 제한적이다. 모델링에 의한 방법의 예를 본다면, 실제 양수시험에서 관측한 수위강하량이 모델링을 통해 예측하는 것보다 더 정확하다고 할 수 있다. 따라서, 현장특성조사시 수리지질학적 특성인자 도출을 위해 기본적으로 수행하는 양수시험 또는 단계양수시험을 통하여 양수에 의해 실제로 발생한 수위강하량 관측 결과를 토대로 보다 더 적용성이 높은 설계방법을 제시하였다.

본 연구에서는 양수에 의한 포획구간과 수위강하량에 따른 ROI의 관계가 비교 검토되었다. 그리고 포획구간을 만족하는 ROI의 기준수위강하량(criteria of drawdown, cs) 개념을 도입하여 기준수위강하량과 Ti의 관계(cs-Ti 관계도)를 도출하고 타현장에 적용하는 방법이 제안되었다. 타현장에 적용할 경우에는 본 연구에서 제시하는 cs-Ti 관계도를 통해 기준수위강하량을 결정하는 것이다. 본 논문에서 ROI_s를 지하수위 강하량이 s m가 발생하는 지점까지 거리로 정의하였다. 예를 들어 양수정을 중심으로 거리가 ROI_{0.5}보다 가까운 영역에서는 양수하기전 지하수위보다 0.5 m 이상 수위 하강이 발생한다는 것을 의미한다. ROI_{cs}는 지하수위 강하량이 기준수위강하량 cs m가 발생하는 지점까지 거리를 나타낸다.

Fig. 2는 본 연구의 목적인 포획구간과 ROI_{cs}의 비교에 대한 개념도를 나타내고 있다. Javandel and Tsang, 1986이 제시한 그래픽 방법은 오염운을 모두 포획할 수 있는 포획구간이 형성되도록 양수량을 결정하는 방법이다.

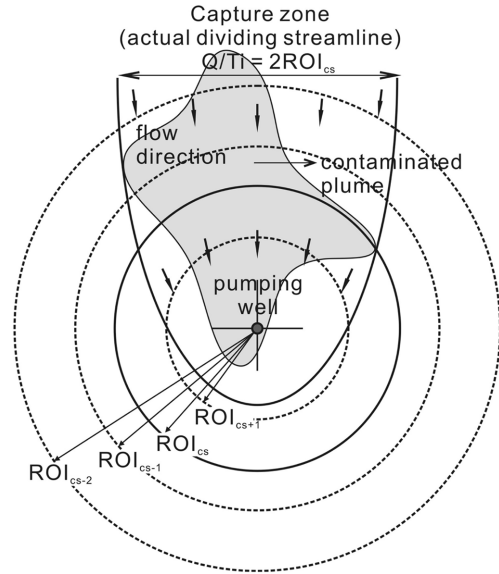


Fig. 2. Conceptual sketch of the research object for ROI_{cs} design.

이번 연구에서는 이 포획구간의 폭과 일치하는 ROI_{cs}의 양수량을 결정하는 방법을 제시하였다. 이때 cs는 기준수위강하량으로 명명하고, 이것은 현장마다 수리지질특성에 따라 변동하는 인자일 것이다. 현장마다 필요한 cs 값을 추정할 수 있으면 오염분포 크기에 따라 요구되는 ROI_{cs}의 양수량을 도출할 수 있게 된다.

지하수 오염운은 포획구간 폭에 포함되어야 하고 그 포획구간 폭과 일치하게 만드는 ROI_{cs}가 존재한다(Fig. 2). 포획구간 폭을 만족하기 위해서 실제 발생하는 ROI_{cs}의 cs 값보다 더 작은 cs-1 값으로 설계된다면 양수량이 축소될 것이다. 다시 말하면 cs 값보다 작은 cs-1로 설계된다면 작은 양수량으로도 필요한 포획구간을 만족할 수 있는 조건이 되므로 오염물질을 완전히 제거하지 못하는 결과를 초래할 수 있다. 이 cs 값을 과학적으로 설정해서 양수량을 설계하는 방법을 검토하고자 한다. 즉, ROI_{cs}가 포획구간 폭을 만족하는 기준수위강하량 cs 값과 수리지질학적 인자들간의 관계성을 도출하는 것이다.

본 연구에서 제시하는 설계방법은 정화현장에서 요구되는 기준수위강하량 cs의 결정이 중요한 인자이다. Fig. 3은 동일한 현장에서 설계하는 기준수위강하량 cs의 차이로 정화전략에 미치는 영향을 나타내고 있다. 기준수위강하량 cs에 따라 설계해서 예측한 designed ROI_{cs}와 실제 현장에서 발생한 actual ROI_{cs}를 비교하여 설명하였다. Fig. 3 Case(a), Case(b), Case(c) 모두 오염운을 포함하도록 designed ROI_{cs}는 동일하게 설계되었다. 하지만, designed ROI_{cs}가 발생하는데 필요한 기준수위강하량 cs가

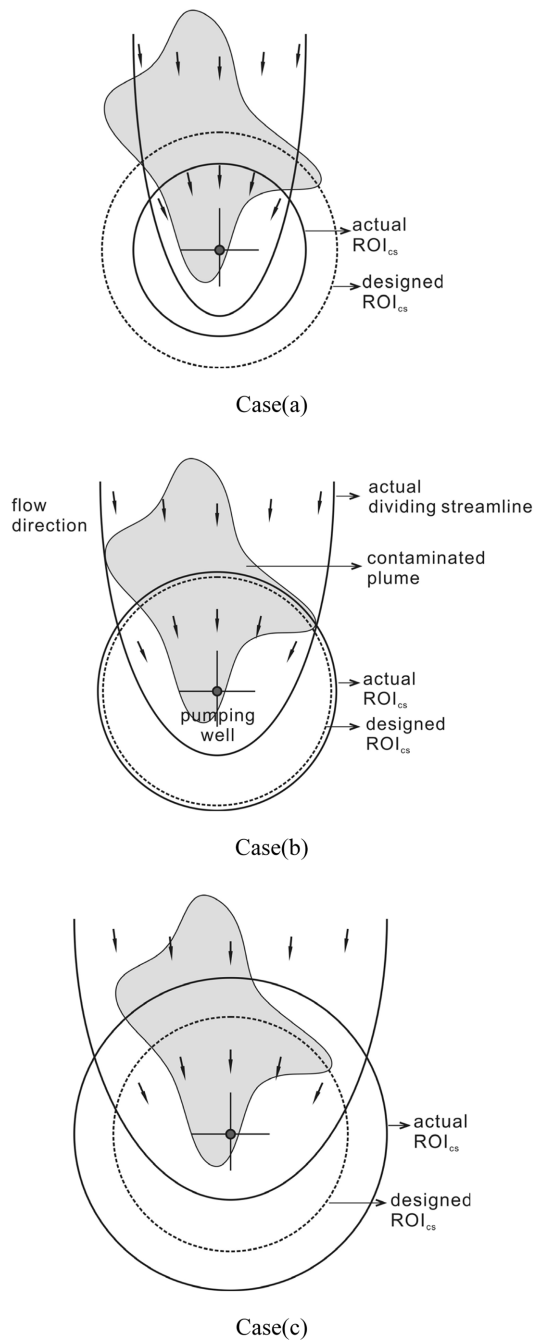


Fig. 3. Conceptual sketch on strategy of pump and treat using ROI_{cs} design.

각 Case별로 다르다. Case(a)는 오염운을 모두 포함하는데 필요한 기준수위강하량 cs 가 작은 경우이고, Case(c)로 갈수록 기준수위강하량 cs 가 크게 설계되었다. 다만, 각 Case별로 실제 발생하는 actual ROI_{cs} 가 다른 경우이다. Fig. 3의 Case(b)는 포획구간 폭과 거의 일치하는 ROI_{cs} 로 기준수위강하량 cs 를 설계한 경우로서 오염물질 제거

측면에서 효과적이다. Fig. 3 Case(a)는 실제 필요한 기준수위강하량 cs 를 작게 설계한 결과이다. 결국 실제 현장에서 발생하는 actual ROI_{cs} 보다 designed ROI_{cs} 가 크게 설계되었다. 이렇게 되면 계획한 양수량의 designed ROI_{cs} 가 오염물질에 제거에 필요한 actual ROI_{cs} 보다 과대평가되었기 때문에 오염운을 모두 제거하는데 한계가 있다. Case(a)에서 designed ROI_{cs} 가 과대평가되었다는 것은 작은 기준수위강하량 cs 만으로도 오염운을 모두 제거가 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 실제 필요한 양수량보다 작은 양수량으로도 기준수위강하량 cs 를 확보할 수 있다고 설계하므로 지하수 오염정화 목표 도달에 어려움이 발생할 것이다. Fig. 3 Case(c)는 Case(a)와 반대인 경우로서 기준수위강하량 cs 를 크게 설계하였기 때문에 designed ROI_{cs} 가 과소평가되었다. 결국, designed ROI_{cs} 와 actual ROI_{cs} 의 차이만큼 양수량을 증가시키는 결과를 초래한다. Case(c) 경우 설계한 양수량으로 오염운의 제거는 가능하지만 운영 및 수처리 부분에서 비용이 더 소요된다.

Fig. 1에서와 같이 Javandel and Tsang, 1986이 제시한 포획구간의 폭은 투수량계수(T), 수두구배(i)에 따라 변화한다. Javandel and Tsang, 1986이 제시한 방법에서 사용한 인자를 활용하여 오염을 제거하는데 필요한 ROI_{cs} 를 찾는 방법을 연구하였다. 시범적으로 ROI_{cs} 를 찾고 그때 기준수위강하량 cs 와 Ti 의 관계(cs - Ti 관계도)를 도출하였다. 타현장에 적용시 본 연구에서 제시하는 cs - Ti 관계도를 활용하여 기준수위강하량 cs 를 경험적으로 적용하고자 한다. 이러한 양수량 및 투수량계수, 수두구배에 따른 기준수위강하량 cs 의 관계를 찾기 위해서 3개 오염현장에서 연구되었다.

2. 연구 방법

2.1. 연구방법의 개요

지하수 및 토양 정화가 계획된 오염부지 Site 1, Site 2, Site 3을 대상으로 단계양수시험이 수행되었다. 3개 지역에 대한 기준수위강하량 cs 를 모르기 때문에 다양한 cs 값에 대한 ROI_{cs} 를 양수량에 따라 도출하였다. 그리고 여러 가지 ROI_{cs} 중에서 어느 것이 포획구간 폭을 만족하는지를 비교하는 것이 필요하다. 따라서 3개 지역의 지하수 위분포, 수리지질학적 특성인자 등 현장조사 결과를 반영하여 입자추적방법(particle-tracking)의 지하수 모델링을 수행하였다. 지하수 모델링에서 현장시험과 동일한 양수량으로 모의했을 때 발생하는 포획구간 폭을 만족하는 ROI_{cs} 를 찾았다. 그리고 그 ROI_{cs} 의 기준수위강하량 cs 가

투수량계수, 수두구배와 가지는 관계성을 확인한 다음 타 현장에서 적용할 수 있는 설계방법을 정리하였다. 아래에는 본 연구에서 적용한 ROI_{cs} 를 산출방법과 각 현장의 특성들을 정리하였다.

2.2. ROI_{cs} 산출방법

투수량계수 및 저류계수 등 수리지질특성 인자는 Theis equation(1935) 및 Cooper-Jacob equation(1946) 해석해를 사용하였다. 대수층 수리지질 특성인자를 결정하 다음, 그 해석해를 다시 이용해서 특정 수위강하가 발생하는 ROI_s 를 계산할 수 있다. Cooper-Jacob equation(1946) 해석해를 사용하여 ROI_s 를 계산하는 방법은 새로운 지점의 수위강하량을 계산하는 방법으로서 Kasenow(1999)가 소개한 관계식을 통해 산출하였다. Theis equation(1935) 해석해를 사용하여 ROI_s 를 계산하는 방법은 지하수위 보전을 위해 Buscher and Cobb(1990)이 소개한 방법으로 활용하였다. 아래에 각 해석해를 활용해서 ROI_{cs} 를 계산하는 방법을 정리하였다.

2.2.1. Cooper-Jacob equation(1946) 해석해를 통한 ROI_{cs} 계산

Table 1에서와 같이 시간-수위강하, 거리-수위강하 그래프 사이에 유일한 관계가 존재한다면 거리에 따른 수위변화량(Δs_d)은 시간에 따른 수위변화량(Δs_t)의 2배에 해당된다는 사실이 소개되었다(Driscoll, 1986; Kasenow, 1997; Kasenow, 1999). 이것을 정리하여 새로운 지하수위 강하량(s_2)이 발생하는 지점의 거리(r_2)를 계산하는 방법은 다음과 같다(Table 1).

$$\log(r_2) = \frac{s_1 - s_2}{2\Delta s_t} + \log(r_1) \quad (1)$$

Table 1. Relationship between time-drawdown slope and distance-drawdown slope on semilog graph (Kasenow, 1999)

Time-drawdown	Distance-drawdown
$\Delta s_t = \frac{s_2 - s_1}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$	$\Delta s_d = \frac{s_2 - s_1}{\log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$
$T = \frac{2.303Q}{4\pi\Delta s_t}$	$T = \frac{2.303Q}{2\pi\Delta s_d}$
$\frac{2.303Q}{4\pi\Delta s_t} = \frac{2.303Q}{2\pi\Delta s_d}, \Delta s_d = 2\Delta s_t$	

s = drawdown, t = time of drawdown, r = observation well distance, Δs_t = slope on a time-drawdown semilog graph, Δs_d = slope on a distance-drawdown semilog graph.

ROI 의 정의대로 수위강하량(s_2)이 0인 지점까지 거리이므로 다음과 같다.

$$\log(ROI) = \frac{s_1}{2\Delta s_t} + \log(r_1) \quad (2)$$

그리고, 기준수위강하량 cs 가 발생하는 ROI_{cs} 는 다음과 같다.

$$\log(ROI_{cs}) = \frac{s_1 - s}{2\Delta s_t} + \log(r_1) \quad (3)$$

2.2.2. Theis equation(1935) 해석해를 통한 ROI_{cs} 계산
Buscher and Cobb(1990)가 Theis equation(1935)을 이용한 ROI 계산방법을 다음과 같이 소개하였다. 특정 이격거리(r)의 관측점에서 수위강하량(s)과 시간(t)-수위강하 자료는 우물함수 $W(u)$ 의 Theis 타입커브와 함께 중첩해서 도시하고 Theis 타입커브와 일치하는 우물함수 값을 통해 투수량계수(T) 및 저류계수(Storativity, S^*)가 도출된다. 여기서 관계식은 다음과 같다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (4)$$

$$u = \frac{r^2 S^*}{4Tt} \quad (5)$$

Theis equation(1935) 해석해를 통해 수리지질 특성인자를 도출한 다음, ROI 를 위한 기준수위강하량 cs 를 결정하면 식 (4)의 우물함수를 통해 u 값을 찾을 수 있다. 여기서 다시 식 (5)를 변형한 식 (6)을 활용하여 ROI_{cs} 계산이 가능하다.

$$ROI_{cs} = 2 \sqrt{\frac{uTt}{S^*}} \quad (6)$$

2.3. 대상지역 현장 특성

3개 시험 지역은 한국에서 수십년 동안 유류저장소로 사용되었고, 현재는 폐쇄되었다. 시험 지역에서 지하수 및 토양 오염평가를 위해 다수의 지하수 관측정이 설치되었고 토양시료를 채취하였다. 지하수위 관측자료와 지질 자료는 지하수 관측정과 토양시료채취 굴착공에서 획득하였으며, 이 자료들을 통해 지질단면도를 작성하였다. 주요 현장조사 결과는 Table 2와 Fig. 4에 정리하였다. 시험 지역에서 지하수 오염이 확인된 깊이의 심도에서 지질특성은 공통적으로 표토층(surface soil), 충적층(alluvial layer), 풍화대층(weathered rock layer) 순서로 구분되었다. 일부 지점에서는 충적층 아래 풍화대층이 없이 기반

Table 2. Brief description of the test sites

Test Site	Stratigraphy (below ground surface, m)			Groundwater Level		Contamination
	Surface layer	Alluvial Layer	Weathered rock	Elevation (m)	Depth to Water (m)	
Site1	0~0.3	0.3~7	> 7	90.0~96.0	1.2~2.2	Max. Toluene Conc. 695 mg/L. Toluene detected at two wells.
Site2	0~0.5	0.5~6.1	weathered rock or bedrock > 6.1	8.0~14.0	2.5~3.2	Max. Toluene Conc. 59 mg/L. Toluene detected at three wells.
Site3	0~0.15	0.15~8.8	Bedrock > 8.8	3.0~5.5	0.9~1.2	Max. Xylene Conc. 12 mg/L. Xylene detected at one well.

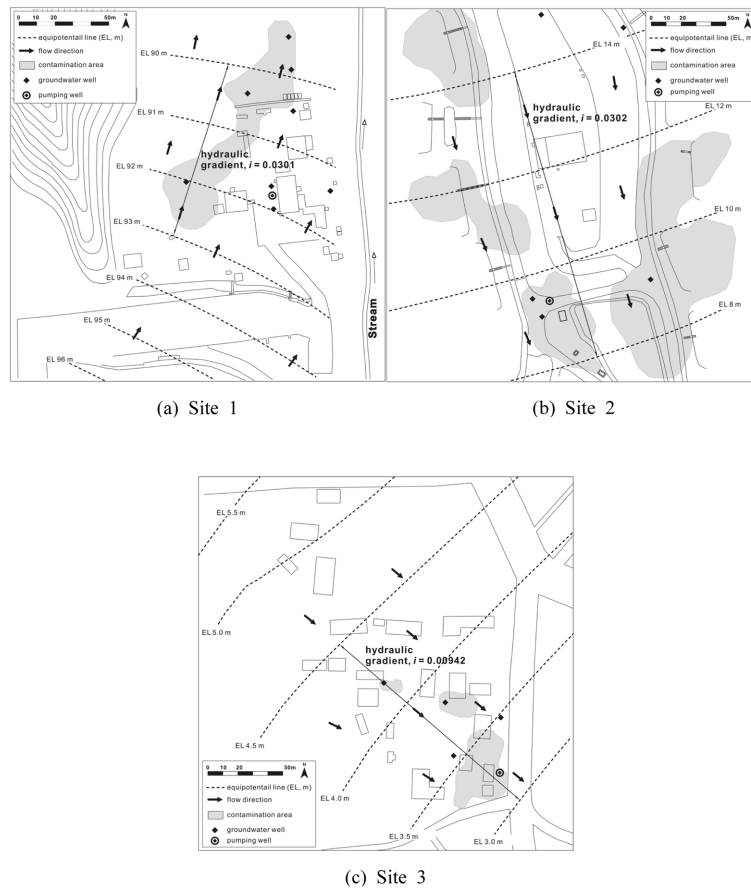


Fig. 4. Illustration of groundwater flow and contamination at each sites.

암이 존재하였다. 지하수위는 관측정 및 수위관측이 가능한 토양시료 굴착공 등 모든 지점에서 시료채취시 수동으로 측정하였다(Fig. 4). 지하수위는 모두 충적층에 위치하고, 불투수층이 없기 때문에 지하수 오염이 관측된 대수층은 비피압대수층(unconfined aquifer)이다. 충적층 토양이 지상 저장탱크 또는 연결관을 통해 누출된 유류로 오염되었고, 오염물질이 하부로 흘러 내려가면서 지하수까지 BTEX로 오염되었다. Fig. 4에서 도시된 지하수 오염범위는 BTEX의 지하수생활용수 기준을 초과한 지역으로서 지

하수 정화가 필요한 구역이다.

오염 토양은 굴착해서 토양경작과 열탈착 공법을 적용하여 정화계획에 있다. 오염지하수는 양수처리법으로 정화되되, 지상에서 오염지하수를 air stripping과 활성탄 흡착을 통해 정화하도록 설계하였다. 현장시험을 위한 양수정은 풍화대층 심도까지 완전 관통하였다. Site 3은 해안과 가깝게 위치하고 있어 충적층 토양이 굵은 모래와 자갈로 구성되어 있으며, 투수량계수가 다른 지역보다 큰 것이 특징이다.

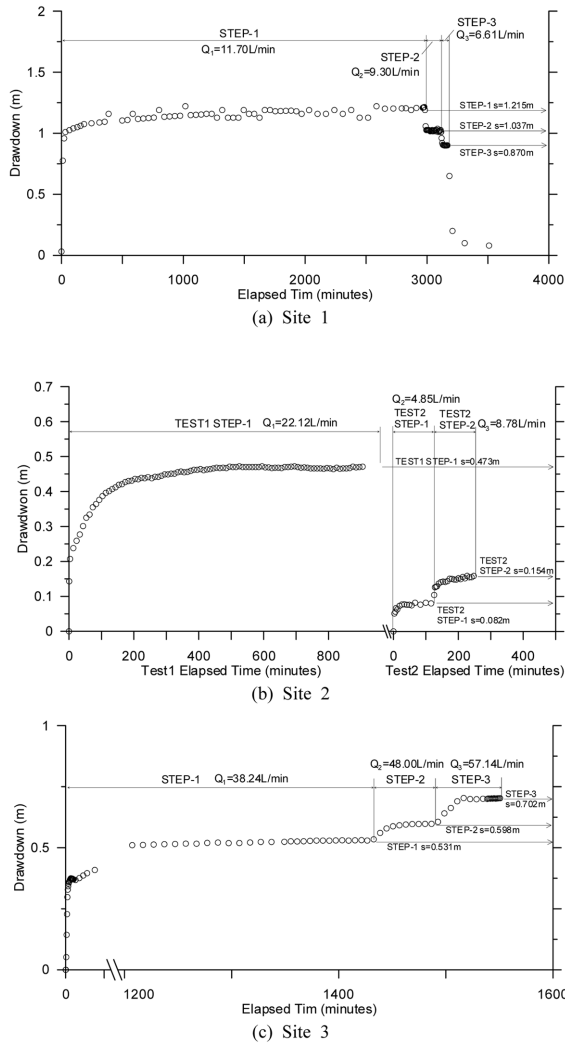


Fig. 5. Results of the pumping test: drawdowns monitored at the observation well.

Table 3. Results of pumping tests

Test Site	Test	Pumping rate (L/min)	Pumping period (min)	Maximum drawdown (m)	Theis (1935)		Cooper-Jacob (1946)		Pumping well depth (m)	Initial DTW at the observation well (m)	Aquifer thickness (m)
					T (cm^2/sec)	S	T (cm^2/sec)	S			
Site1	Step-1	11.7	0~2982	1.215							
	Step-2	9.3	2982~3115	1.037	1.23×10^0	2.63×10^{-3}	1.30×10^0	1.79×10^{-3}	6.86	1.28	4.72
	Step-3	6.61	3115~3177	0.870							
Site2	TEST1 Step-1	22.12	0~1140	0.473	7.06×10^0	4.10×10^{-3}	3.77×10^0	1.15×10^{-2}			
	TEST2 Step-1	4.85	0~125	0.082	7.22×10^0	2.90×10^{-4}	7.98×10^0	1.13×10^{-4}	7.43	2.96	4.74
	TEST2 Step-2	8.78	125~250	0.154							
	TEST2 Step-2										
Site3	Step-1	38.24	0~1430	0.531							
	Step-2	48	1430~1490	0.598	1.16×10^1	7.08×10^{-4}	1.20×10^1	2.90×10^{-4}	5.13	0.77	4.17
	Step-3	57.14	1490~1550	0.702							

DTW = depth to water.

3. 연구결과

3.1. 양수시험 결과 및 영향반경 검토

양수량에 따른 영향반경을 도출하기 위해서 단계 양수 시험이 각 현장별로 수행되었다. Site 2에서는 일정 양수량 시험을 마친 다음에 지하수위가 초기수위로 회복한 후, 더 낮은 양수량으로 2단계 양수시험이 수행되었다. 양수 시험 동안 관측점에서 관측된 지하수위 변화는 Fig. 5에 도시하였다. 관측점의 지하수위는 각 단계별로 양수 시작 직후 바로 급격히 변화하였고 지하수위는 약 100분 이내 정상상태에 접근하는 형태를 나타내고 있다. 단계양수시험의 시험조건들과 양수시험 해석 결과들을 Table 3에 정리하였다.

해석 결과, 투수량계수는 비교적 크게 나타나므로 오염물의 확산이 빠르게 발생한다. 특히 Site 3에서 투수량계수가 다른 현장보다 10배 정도 높다. 앞서 기술한 Fig. 1의 그래픽 방법과 같이 지하수 흐름방향에 수직인 포획구간의 폭은 Q/T 이다(Javandel and Tsang, 1986). 따라서 높은 투수량계수(T)를 가진 Site 3에서는 그렇지 않은 현장보다 상대적으로 좁은 포획구간 폭을 가지게 된다.

앞서 기술한 Theis equation(1935)과 Cooper-Jacob equation(1946)을 이용하여 각 Site별 다양한 기준수위강하량 cs에 따른 ROI_{cs} 는 Table 4, Table 5, Table 6에 나타내었다. 각 Site마다 적절한 기준수위강하량 cs가 결정되지 않았기 때문에 다양한 기준수위강하량 cs 값으로 계산하여 포획구간의 폭을 포함할 수 있는 ROI_{cs} 를 지하수 모델링 결과와 비교하여 결정하였다. Site 1, Site 2, Site 3의 기준수위강하량 cs 예상값은 각각 0.1 ~ 1.0 m,

Table 4. ROI_{cs} along cs (the criteria of drawdown) at Site 1

(a) ROI _{cs} by Cooper-Jacob equation (1946)													
Q (L/min)	ΔS_i	s_1 (m)	r_1 (m)	ROI _{cs} when cs (m) =									
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
11.70	0.64	1.215	1.89	14.05	11.73	9.80	8.19	6.84	5.71	4.77	3.99	3.33	2.78
9.30	0.64	1.037	1.89	10.20	8.52	7.12	5.94	4.97	4.15	3.47	2.89	2.42	2.02
6.61	0.64	0.870	1.89	7.55	6.31	5.27	4.40	3.68	3.07	2.57	2.14	1.79	1.50

(b-1) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 11.70 L/min													
Q = 11.70	cs (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
L/min	t (sec)	45	90	180	324	420	480	540	780	1020	1920		
T = 1.23	W (u)	0.792648	1.585296	2.377944	3.170592	3.963240	4.755888	5.548536	6.341184	7.133832	7.926480		
cm ² /sec	u	3.5079×10 ⁻¹	1.3054×10 ⁻¹	5.4973×10 ⁻²	2.4142×10 ⁻²	1.0776×10 ⁻²	4.8520×10 ⁻³	2.1910×10 ⁻³	9.9040×10 ⁻⁴	4.4810×10 ⁻⁴	2.0280×10 ⁻⁴		
S =													
2.23×10 ⁻³	ROI _{cs} (m)	13.31	11.48	10.54	9.37	7.13	5.11	3.64	2.94	2.26	2.09		

(b-2) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 9.30 L/min													
Q = 9.30	cs (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
L/min	t (sec)	24	60	114	156	192	240	300	384	510	1800		
T = 1.23	W (u)	0.997202	1.994405	2.991607	3.988809	4.986012	5.983214	6.980416	7.977619	8.974821	9.972023		
cm ² /sec	u	2.6571×10 ⁻¹	8.2875×10 ⁻²	2.9013×10 ⁻²	1.0509×10 ⁻²	3.8510×10 ⁻³	1.4170×10 ⁻³	5.2240×10 ⁻⁴	1.9260×10 ⁻⁴	7.1060×10 ⁻⁵	2.6210×10 ⁻⁵		
S =													
2.23×10 ⁻³	ROI _{cs} (m)	8.46	7.47	6.09	4.29	2.88	1.95	1.33	0.91	0.64	0.73		

(b-3) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 6.61 L/min													
Q = 6.61	cs (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
L/min	t (sec)	30	60	96	156	192	252	384	510	570	—		
T = 1.23	W (u)	1.403023	2.806046	4.209069	5.612092	7.015115	8.418138	9.821160	11.224183	12.627206	—		
cm ² /sec	u	1.6117×10 ⁻¹	3.5140×10 ⁻²	8.4140×10 ⁻³	2.0540×10 ⁻³	5.0450×10 ⁻⁴	1.2400×10 ⁻⁴	3.0490×10 ⁻⁵	7.4940×10 ⁻⁶	1.8430×10 ⁻⁶	—		
S =													
2.23×10 ⁻³	ROI _{cs} (m)	7.37	4.86	3.01	1.90	1.04	0.59	0.36	0.21	0.11	—		

0.105 ~ 0.150 m, 0.1 ~ 0.28 m으로 설정하였다. Site 2의 ROI_{cs} 계산 결과를 나타내는 Table 5에서 Theis equation (1935)을 적용할 경우 낮은 양수량에서는 모든 ROI_{cs}가 계산되지 않았다. 이것은 낮은 양수량에서 수위강하가 예상한 기준수위강하량 cs만큼 발생하지 않았기 때문이다. Theis equation(1935)과 Cooper-Jacob equation(1946)를 이용하여 ROI_{cs} 계산 결과, Cooper-Jacob equation(1946)을 이용한 ROI_{cs} 계산 결과가 Theis equation(1935)을 이용한 계산 결과보다 상대적으로 더 크게 나타났다.

Theis equation(1935)과 Cooper-Jacob equation(1946)을 이용하기 위해 사용되는 자료(ex. Δs_i , t)들을 도출하는 과정에서 오차가 발생하기 때문에 계산된 ROI_{cs}는 정확한 결과가 아니다. Cooper-Jacob equation(1946)을 이용한 계산방법에서 오차를 유발하는 주요인자는 시간-수위강하량의 기울기 Δs_i 이다. 본 연구에서는 오차로 인해 발생할 수 있는 Fig. 3의 Case(a)를 회피하기 위해서 기준수위강하량 cs를 0.1 m보다 크게 설정하여 계산하였다. Theis equation(1935)을 이용한 계산방법에서는 시간(t)이 오차를

유발하는 주요인자이다. 해석에 필요한 시간 t는 관측점에서 기준수위강하량 cs만큼 수위변화가 발생하는 시간을 찾아야 하기 때문에 양수직후에는 수위가 급격히 변화하므로 기준수위강하량 cs 발생 시간은 부정확하게 평가된다. 뿐만 아니라 기준수위강하량 cs가 발생하는 시간이 정상상태에 근접한다면, 부정류 상태를 기반으로 해석하는 Theis equation(1935) 계산방법은 맞지 않다. 본 연구결과에 따르면 Theis equation(1935)을 이용한 방법으로 양수직후와 정상상태에 근접하는 ROI_{cs} 계산은 적합하지 않다. Theis equation(1935)을 이용한 방법으로 해석하기 위해서는 양수이후 지하수위가 급변하는 부정류상태를 지나서 정상상태에 도달하기전 준정상상태 구간에서 해석하는 것이 맞는 것으로 판단된다. 적용하기 적합한 준정상상태의 기준을 제시하기 위해서는 더 많은 연구사례가 필요하다. Table 4와 Table 5에서 Site 1의 3단계, Site 2의 2, 3단계의 Theis equation(1935) 계산방법에 의한 결과는 포함되지 않았다.

Table 5. ROI_{cs} along cs (the criteria of drawdown) at Site2

(a) ROI _{cs} by Cooper-Jacob equation (1946)													
Q (L/min)	ΔS_r	s_1 (m)	r_1 (m)	ROI _{cs} when cs (m) =									
				0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150
22.12	0.1960	0.473	2.00	17.37	16.87	16.38	15.91	15.44	15.00	14.56	14.14	13.73	13.34
8.78	0.1960	0.154	2.00	2.67	2.59	2.51	2.44	2.37	2.30	2.24	2.17	2.11	2.05
4.85	0.1960	0.082	2.00	1.75	1.70	1.65	1.60	1.55	1.51	1.46	1.42	1.38	1.34
(b-1) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 22.12 L/min													
Q = 22.12 L/min	cs (m)	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150		
	t (sec)	25.2	27.6	30	32.4	34.8	37.2	39.6	42	44.4	46.8		
T = 7.06 cm ² /sec	W (u)	2.526795	2.647118	2.767442	2.887766	3.008089	3.128413	3.248736	3.369060	3.489383	3.609707		
S =	u	4.7003×10 ⁻²	4.1449×10 ⁻²	3.6575×10 ⁻²	3.2292×10 ⁻²	2.8525×10 ⁻²	2.5209×10 ⁻²	2.2287×10 ⁻²	1.9709×10 ⁻²	1.7439×10 ⁻²	1.5428×10 ⁻²		
4.10×10 ⁻³	ROI _{cs} (m)	7.00	6.88	6.73	6.58	6.40	6.23	6.04	5.85	5.66	5.46		
(b-2) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 8.78 L/min													
Q = 8.78 L/min	cs (m)	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150		
	t (sec)	48	60	78	96	120	—	—	—	—	—		
T = 7.22 cm ² /sec	W (u)	6.510181	6.820190	7.130199	7.440207	7.750216	—	—	—	—	—		
S =	u	8.3630×10 ⁻⁴	6.1330×10 ⁻⁴	4.4970×10 ⁻⁴	3.2980×10 ⁻⁴	2.4180×10 ⁻⁴	—	—	—	—	—		
2.90×10 ⁻⁴	ROI _{cs} (m)	4.90	4.69	4.58	4.35	4.16	—	—	—	—	—		

Table 6. ROI_{cs} along cs (the criteria of drawdown) at Site3

(a) ROI _{cs} by Cooper-Jacob equation (1946)													
Q (L/min)	Δ <i>S</i> _{<i>i</i>}	<i>s</i> ₁ (m)	<i>r</i> ₁ (m)	ROI _{cs} when cs (m) =									
				0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28
38.24	0.1467	0.531	2.24	65.95	56.37	48.18	41.18	35.20	30.09	25.72	21.98	18.79	16.06
48.00	0.1467	0.598	2.24	111.58	95.37	81.52	69.68	59.56	50.90	43.51	37.19	31.79	27.17
57.14	0.1467	0.702	2.24	252.38	215.72	184.38	157.60	134.71	115.14	98.41	84.12	71.90	61.46
(b-1) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 38.24 L/min													
Q = 38.24 L/min T = 1.16×10 ¹ cm ² /sec S = 7.08×10 ⁻⁴	cs (m) t (sec) W (u) u ROI _{cs} (m)	0.1 131 2.287185 6.0522×10 ⁻² 55.79	0.12 143 2.744622 3.7451×10 ⁻² 45.86	0.14 155 3.202058 2.3377×10 ⁻² 37.72	0.16 169 3.659495 1.4669×10 ⁻² 31.19	0.18 181 4.116932 9.2330×10 ⁻³ 25.65	0.2 194 4.574369 5.8240×10 ⁻³ 21.10	0.22 210 5.031806 3.6780×10 ⁻³ 17.43	0.24 227 5.489243 2.3250×10 ⁻³ 14.40	0.26 246 5.946680 1.4700×10 ⁻³ 11.92	0.28 258 6.404117 9.2990×10 ⁻⁴ 9.71		
(b-2) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 48.00 L/min													
Q = 48.00 L/min T = 1.16×10 ¹ cm ² /sec S = 7.08×10 ⁻⁴	cs (m) t (sec) W (u) u ROI _{cs} (m)	0.1 98 1.822124 1.0090×10 ⁻¹ 62.48	0.12 101 2.186548 6.7374×10 ⁻² 51.83	0.14 104 2.550973 4.5828×10 ⁻² 43.37	0.16 107 2.915398 3.1384×10 ⁻² 36.41	0.18 110 3.279823 2.1589×10 ⁻² 30.61	0.2 114 3.644247 1.4897×10 ⁻² 25.84	0.22 117 4.008672 1.0300×10 ⁻² 21.77	0.24 120 4.373097 7.1320×10 ⁻³ 18.34	0.26 123 4.737522 4.9430×10 ⁻³ 15.46	0.28 126 5.101946 3.4280×10 ⁻³ 13.03		
(b-3) ROI _{cs} by Theis equation (1935) Q = 57.14 L/min													
Q = 57.14 L/min T = 1.16×10 ¹ cm ² /sec S = 7.08×10 ⁻⁴	cs (m) t (sec) W (u) u ROI _{cs} (m)	0.1 98 1.530660 1.3896×10 ⁻¹ 73.33	0.12 101 1.836793 9.8482×10 ⁻² 62.48	0.14 103 2.142925 7.0598×10 ⁻² 53.52	0.16 106 2.449057 5.1002×10 ⁻² 46.02	0.18 108 2.755189 3.7042×10 ⁻² 39.66	0.2 110 3.061321 2.7001×10 ⁻² 34.24	0.22 113 3.367453 1.9742×10 ⁻² 29.59	0.24 115 3.673585 1.4460×10 ⁻² 25.59	0.26 118 3.979717 1.0606×10 ⁻² 22.15	0.28 120 4.285849 7.7870×10 ⁻³ 19.17		

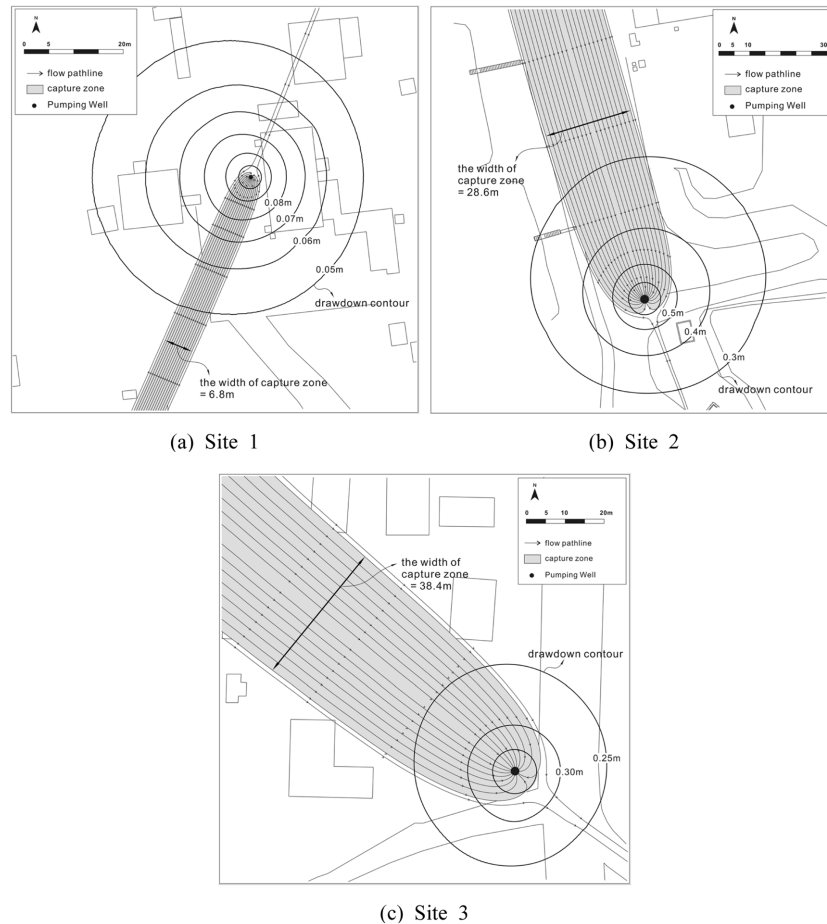


Fig. 6. Results of particle-tracking analyses.

3.2. MODPATH 포획구간 평가

수치해석 모델은 복잡한 수리지질 구조의 지하수 유동을 모사하기 위해 일반적으로 널리 사용된다(McDonald and Harbaugh, 1988). 양수처리법이 계획된 현장에서 지하수 유선 평가와 포획구간 평가를 위해 입자추적방법 (particle-tracking)이 가능한 MODPATH가 이용된다(Pollock, 1989). 본 연구에서는 입자추적방식을 통해 양수정 주변에 형성되는 지하수 유동을 이해하고 포획구간을 평가한 다음 Table 4, Table 5, Table 6의 포획구간 폭과 일치하는 ROI_{cs}를 찾아보았다.

입자추적방식 해석 이전에 각 3개 현장마다 MODFLOW를 통해 지하수 유동 모의가 우선 진행되었다. 모델링을 효과적으로 진행하기 위해, 모델의 불필요한 외곽부분은 불활성격자로 설정하였다. 모델영역은 전체적으로 20 × 20 m 격자로 설정하고 특히 양수정 주변은 1 × 1 m 격자로 세분화하였다. 지하수 유동 모델은 모델링 결과가 관측 정 수위로 보정하였고, 보정 완료후 양수정을 오염지역에

설정한 다음, Site 1에서 11.7 L/min, Site 2에서 22.12 L/min, Site 3에서 38.24 L/min의 양수량으로 2년간 양수하는 것으로 모의하였다. 입자추적의 해석 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6과 같이 양수정 상류의 지하수 흐름유선은 양수정으로 모이는 형태로 형성되었고, 양수정 하류방향으로 형성되지 않았다. Site 1에서 양수량이 11.7 L/min일 때 포획구간 폭은 6.8 m, Site 2에서 양수량이 22.12 L/min일 때 포획구간의 폭은 28.6 m, Site 3에서 양수량이 38.24 L/min일 때 포획구간의 폭은 38.4 m이다.

3.3. 현장별 기준수위강하량 및 양수량 결정

각 Site마다 Table 4, Table 5, Table 6에 있는 기준수위강하량 cs에 따른 ROI_{cs}와 입자추적분석 결과를 비교해서 포획구간의 폭을 만족하는 기준수위강하량 cs를 검토하였다.

3.3.1. Site 1

Site 1에서 양수량이 11.7 L/min일 때 입자추적에 의한 포획구간의 폭은 6.8 m이다. 포획구간 폭의 절반인 3.4 m는 Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법을 이용한 결과 중 $ROI_{0.9}$ 와 $ROI_{0.8}$ 사이 범위에 해당하는 값이고, Theis equation(1935) 계산방법을 이용한 결과 중 $ROI_{0.8}$ 와 $ROI_{0.7}$ 사이 범위에 해당한다(Table 4). 따라서 기준수위강하량 cs는 Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법, Theis equation(1935) 계산방법에서 각각 0.8 ~ 0.9 m, 0.7 ~ 0.8 m인 것으로 평가된다.

지하수 오염물질을 모두 포획할 수 있는 ROI_{cs} 를 설계하기 위해서 안전율을 고려한다면 Fig. 3 Case(a)와 같은 경우는 회피하도록 설계하는 것이 바람직하다. 따라서 보다 큰 기준수위강하량 cs가 선택되어야 한다. Site 1에서 양수량이 11.7 L/min에 대한 합리적인 기준수위강하량 cs는 Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법, Theis equation(1935) 계산방법에서 각각 0.9 m, 0.8 m인 것으로 평가된다.

지하수 오염운을 포함하는 포획구간의 폭의 1/2과 일치

하는 ROI_{cs} 가 있다면 ROI_{cs} 와 Javandel and Tsang, 1986이 제시한 포획구간의 폭의 1/2 크기를 식 (7)과 같이 연결시키면 ROI_{cs} 는 양수량(Q)에 비례 관계를 가짐을 알 수가 있다.

$$ROI_{cs} \doteq \frac{\text{포획구간 폭}}{2} = \frac{Q/Ti}{2} \rightarrow ROI_{cs} \propto Q \quad (7)$$

따라서, Site 1에서 계산된 기준수위강하량 cs를 기준으로 양수량(Q)의 변화에 따른 $ROI_{0.8 \sim 0.9}$ (Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법), $ROI_{0.7 \sim 0.8}$ (Theis equation(1935) 계산방법)의 변화(ROI_{cs} -Q 관계도)를 Fig. 7a에 도시하였다. Fig. 7a와 같이 완전한 선형적 비례관계에 있지 않지만 비교적 선형관계를 가지고 있다. 현장시험과정에서 발생하는 시험오차와 현장의 불균질성에 의해 발생한 오차로 인해 Fig. 7의 그래프가 비선형으로 나타날 수 있다. Fig. 7a를 활용하여 Site 1에서 조사된 지하수 오염운의 크기에 따라 양수처리법에서 요구되는 양수량을 추정할 수가 있게 된다.

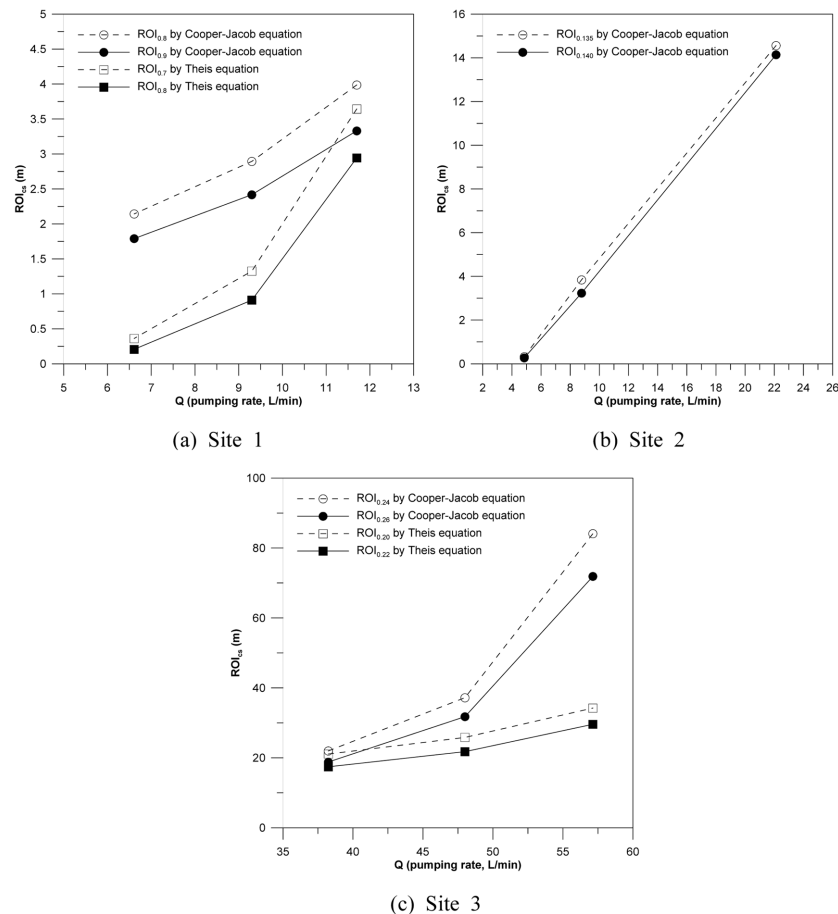


Fig. 7. The Relation curve between ROI_{cs} and pumping rate (ROI_{cs} -Q curve).

Table 7. Summary of criteria c_s and T_i

Site	ROI_{cs} (m)	Hydraulic gradient (i, -)	Criteria (c_s , m)	Cooper-Jacob equation (1946)		Theis equation (1935)		Javandel and Tsang graphic method (1986)	
				T_i (cm ² /sec)	Q (L/min)	T_i (cm ² /sec)	Q (L/min)	T_i (cm ² /sec)	Q (L/min)
Site1	1.5	0.0301	0.9	0.0392	5.36	0.0371	10.00	0.0381	0.69
	2	0.0301	0.9	0.0392	7.51	0.0371	10.59	0.0381	0.91
	2.5	0.0301	0.9	0.0392	9.51	0.0371	11.18	0.0381	1.14
	3	0.0301	0.9	0.0392	10.83	0.0371	11.77	0.0381	1.37
	3.5	0.0301	0.9	0.0392	12.14	0.0371	12.36	0.0381	1.60
Site2	0.5	0.0302	0.14	0.177	5.15			0.197	1.18
	3	0.0302	0.14	0.177	8.47			0.197	7.08
	5	0.0302	0.14	0.177	10.94			0.197	11.80
	10	0.0302	0.14	0.177	17.05			0.197	23.59
	15	0.0302	0.14	0.177	23.17			0.197	35.39
Site3	15	0.00942	0.26	0.113	35.40	0.109	32.78	0.111	20.01
	20	0.00942	0.26	0.113	39.15	0.109	44.02	0.111	26.68
	30	0.00942	0.26	0.113	47.59	0.109	57.62	0.111	40.01
	40	0.00942	0.26	0.113	49.87	0.109	69.30	0.111	53.35
	50	0.00942	0.26	0.113	52.15	0.109	80.98	0.111	66.69

양수처리 계획은 정화기간, 오염원 위치, 오염원 크기 및 기타 현장특성에 따라 양수정의 배치를 다르게 결정할 수 있다. 그리고 그 양수정의 배치에 따라 각 양수정의 양수량이 변하게 된다. Table 7에 기준수위강하량 등 Site 1에서 도출된 주요 결과들을 정리하였다. 그리고 Table 7에 본 연구결과인 ROI_{cs} -Q 관계도(Fig. 7a)를 토대로 Site 1에서 계획하는 가상의 ROI_{cs} (또는 포획구간)에 따라 요구되는 양수량과 Javandel and Tsang, 1986 그래픽 방법에 의한 양수량 결과와 함께 정리하였다. Cooper-Jacob equation(1946)과 Theis equation(1935)을 이용한 계산결과가 기존 방법 계산결과보다 더 많은 양수량을 요구한다. Javandel and Tsang, 1986 그래픽 방법에 의해 설계를 한다면 작은 양수량으로도 포획구간을 만족한다는 것이기 때문에 오염원을 모두 포획하지 못하는 경우(Fig. 3 Case(a))를 초래할 수 있다. 기존의 방법은 지하수 흐름이 균일(uniform flow)한 지역에서 적용하는 방법으로서 계산에 반영되는 투수량계수나 수두구배가 실제 현장에서는 불균질하기 때문에 오차가 더 많이 발생할 것으로 판단된다. 반면에, 본 연구는 대상지역에서 실제 양수시 발생하는 수위강하량을 직접 관측한 결과를 토대로 계산하였기 때문에 비교적 더 현장 적용성이 높은 것으로 판단된다.

3.3.2. Site 2

Site 2에서 양수량이 22.12 L/min일 때 입지추적에 의한 포획구간의 폭은 28.6 m이다. 포획구간 폭의 절반인

14.30 m는 Cooper-Jacob equation(1946)을 이용한 결과 중 $ROI_{0.140} \sim ROI_{0.135}$ 에 해당한다(Table 5). 따라서 Site 2에서 기준수위강하량 c_s 는 Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법에서 0.140 m인 것으로 평가된다.

앞서 Site 1에서 검토한 것과 같이 Site 2에서 기준수위강하량 $c_s = 0.140$ m를 기준으로 양수량(Q)의 변화에 따른 $ROI_{0.140} \sim 0.135$ (Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법)의 변화(ROI_{cs} -Q 관계도)를 Fig. 7b에 도시하였다. Fig. 7b에서와 같이 Site 2에서 양수량에 대한 ROI_{cs} 는 Site 1보다 더 선형적 추세를 가진다. 그리고 이 추세를 통해서 또 다른 양수량에 대한 ROI_{cs} 를 추정할 수 있다.

Table 7에 기준수위강하량 등 Site 2에서 도출된 주요 결과들을 정리하였다. 그리고 Site 1과 같이, 여러 가지 ROI_{cs} (또는 포획구간)에 따른 양수량을 Javandel and Tsang, 1986 그래픽 방법에 의한 결과와 함께 정리하였다. 두 결과가 거의 비슷한 값을 나타내고 있지만 ROI_{cs} 가 작은 범위에서 기존의 방법이 작은 양수량으로도 그것을 만족한다는 것을 나타내고 있다. 본 연구가 대상지역에서 양수해서 발생하는 수위강하량을 직접 관측한 결과를 토대로 계산하였고, 모델링을 통해 확인하였기 때문에 비교적 더 현장 적용성이 높은 것으로 판단된다.

3.3.3. Site 3

Site 3에서 양수량이 38.24 L/min일 때 입지추적에 의한 포획구간의 폭은 38.4 m이다. 포획구간 폭의 절반인

19.2 m는 Cooper-Jacob equation(1946)을 이용한 결과 중 $ROI_{0.26} \sim ROI_{0.24}$ 에 해당하고, Theis equation(1935)을 이용한 결과 중 $ROI_{0.22} \sim ROI_{0.20}$ 에 해당한다(Table 6). 따라서 Site 3에서 기준수위강하량 cs 는 Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법, Theis equation(1935) 계산방법에서 각각 0.26 m, 0.22 m인 것으로 평가된다.

앞선 Site 1 및 Site 2에서 검토한 것과 Site 3에서도 기준수위강하량 cs 를 기준으로 양수량(Q)의 변화에 따른 $ROI_{0.26 \sim 0.24}$ (Cooper-Jacob equation(1946) 계산방법), $ROI_{0.22 \sim 0.20}$ (Theis equation(1935) 계산방법)의 변화(ROI_{cs} - Q 관계도)를 Fig. 7c에 도시하였다. Fig. 7c에서와 같이 Site 3에서도 양수량에 대한 ROI_{cs} 는 비교적 선형적 추세를 가진다고 볼 수 있고, 이 추세를 통해서 또 다른 양수량에 대한 ROI_{cs} 추정이 가능하다. Table 7에 여러 가지 ROI_{cs} (또는 포획구간)에 따른 요구되는 양수량을 정리하였다. 그 결과는 Site 2와 같이, 기존의 방법이 작은 양수량으로도 ROI_{cs} (또는 포획구간)를 만족한다는 것을 나타내고 있다.

4. 고 찰

ROI_{cs} 를 통해 양수량을 계산하기 위해서는 기준수위강하량 cs 를 결정하는 과정이 필요하다. 본 연구현장의 기준수위강하량 cs 는 수식으로 계산한 결과와 지하수모델링을 비교하는 과정을 통해서 도출하였다. 양수처리법이 계획된 모든 현장에서 지하수 모델링이 수행된다면 모델링 결과만으로 다양한 양수정 배치와 양수량 등을 평가할 수 있다. 그러나 지하수 정화현장에서 그렇게 정밀한 모델링 수행할 수 있는 여건이 반영되지 않는 것이 현실이다. 그리고 모델링이 수행된다 하여도 그 결과 또한 현장과 다른 오차를 가질 수 있다. 따라서 실제 양수해서 나타나는 수위강하량을 관측해서 설계하는 방법이 적용성이 더 높을 것으로 판단된다.

양수처리가 계획된 타현장에서 기준수위강하량 cs 만 결정된다면 ROI_{cs} 를 토대로 양수량을 계획할 수 있다. 기준수위강하량 cs 는 식 (8)과 같이 다양한 현장 특성인자와 복잡한 관계함수를 가질 것으로 추정된다. 그러나 식 (7)처럼 ROI_{cs} 가 $Q/Ti/2$ 와 같기 때문에 기준수위강하량의 관계함수 인자를 투수량계수(T), 수두구배(i)로 단순화하여 식 (9)처럼 나타내면 기준수위강하량 cs 와 Ti 가 반비례관계에 있을 것으로 예상된다. 따라서 Site 1, Site 2, Site 3의 결과를 활용하여 그 관계 여부를 판단하였다.

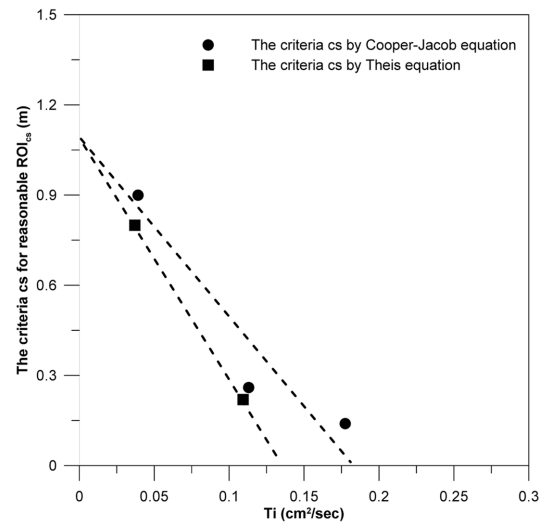


Fig. 8. The Relation curve between cs and Ti (cs - Ti curve). T = transmissivity, i = hydraulic gradient.

$$cs = f(T, i, n_1, n_2, n_3, n_4, \dots) \quad (8)$$

$$cs \propto f(T, i) \rightarrow cs \propto 1/Ti \quad (T: \text{투수량계수}, i: \text{수두구배}) \quad (9)$$

Table 7에 있는 각 Site별 기준수위강하량과 Ti 의 관계(cs - Ti 관계도)를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8과 같이 기준수위강하량은 Ti 에 거의 선형적으로 반비례하는 것으로 나타났다. 타현장에서 투수량계수(T), 수두구배(i) 등 현장 특성인자를 도출하면 그 지역에서 필요한 기준수위강하량 cs 는 cs - Ti 관계도(Fig. 8)를 통해 추정이 가능하다. 물론, 기준수위강하량 cs 는 다양한 현장조건들에 의해서 복잡한 관계를 가질 것이고 부정확할 수 있다. 그러나, 기존의 그래픽 방법이나 모델링에 의한 평가 방법은 현장의 불균질성에 의한 부정확성과 수많은 관측자료의 필요성에 의해 모든 현장에 적용하는 것이 제한적일 수 있다. 본 연구에서 도출한 결과를 통해 기준수위강하량을 예측하고 ROI_{cs} 를 계산방법으로 설계하는 것이 더 효율적일 것으로 판단된다. 여기서 ROI_{cs} 계산할 때 Theis equation(1935) 및 Cooper-Jacob equation(1946)을 이용한 방법이 소개되었지만 Cooper-Jacob equation(1946) 계산 방법이 적용성이 더 높은 것으로 판단된다. 왜냐하면 Theis equation(1935)은 부정류상태의 지하수 흐름을 해석하는 방법으로, 정류상태에 근접하는 지하수위 강하량에 대한 영향반경 평가에 부적합하기 때문이다. 그리고, 양수작후 발생한 수위강하에 대한 시간의 오차가 너무 크게 나타날 수 있다. 그 결과 ROI_{cs} - Q 관계도(Fig. 7)도 선형이 뚜렷하지 않다. 뿐만 아니라 기존 Javandel and Tsang, 1986 그래픽 방

법과 비교한 결과에서도 큰 차이가 있는 것으로 보아 오차가 큰 것으로 평가된다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 기준수위강하량 cs 값을 기반으로 ROI_{cs} 를 이용하여 양수량을 결정하는 방법에 대해 수행되었다. 3개 정화 현장에서 단계양수시험 및 기타 현장조사, 지하수 모델링을 수행하였다. 그 결과를 토대로 여기서 소개하는 양수량 설계방법을 아래와 같이 정리하였다.

양수처리법을 적용하기 위해서 기본적으로 현장특성화(site characterization)가 수행되어야 한다. 그 중에서도 오염원의 크기, 분포, 지하수 흐름방향, 투수량계수, 수두구배는 필수 요소이다. 그리고 단계양수시험 등 다양한 양수량에 따른 지하수위 강하량을 평가하여야 한다. 이때 시험에 적용하는 양수량은 작은 것에서부터 최대 적정양수량까지 적용하는 것이 설계시 오차를 줄일 수 있다. 양수시험을 통해서 양수량에 따른 수위강하량 자료도 획득하지만 투수량계수가 산출된다.

이렇게 현장특성화가 완료되면, 본 연구결과인 cs - Ti 관계도를 활용하여 기준수위강하량 cs 를 결정하게 된다. 그리고 양수시험에서 적용한 양수량에 대한 ROI_{cs} 를 계산하게 되고, 대상지역의 ROI_{cs} - Q 관계도를 도출할 수 있다.

마지막으로 오염원의 크기 및 위치, 현장에서 허용되는 조건 등을 검토하여 포획구간 폭을 결정하게 되고, 그 포획구간을 만족하는 ROI_{cs} 에 대한 양수량을 ROI_{cs} - Q 관계도를 통해 결정하게 된다.

본 연구에서 제시하는 cs - Ti 관계도는 타현장에서 기준수위강하량을 추정할 수 있지만, 아직까지 이 방법이 적합한지 확인되지 않았다. 따라서 앞으로 더 많은 현장자료를 통해 본 연구에서 도출한 결과를 보다 정확하고 과학적으로 보완할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화'연구단의 일부 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Bair, E.S., Springer, A.E., and Roadcap, G.S., 1991, Delineation

of travel time-related capture areas of wells using analytical flow models and particle-tracking analysis, *Ground Water*, **29**(3), 387-397.

Bair, E.S. and Roadcap, G.S., 1992, Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: 1. Leaky-confined fractured-carbonate aquifer, *Ground Water*, **30**(2), 199-211.

Blandford, T.N. and Huyakorn, P.S., 1989, WHPA: A modular semi-analytical model for delineation of Wellhead Protection Areas, USEPA, Office of Ground-Water Protection, Washington, D.C.

Bonn, B.A. and Rounds, S.A., 1990, DREAM - Analytical Ground Water Flow Programs, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, p. 109.

Buscher, W.E. and Cobb, R.P., 1990, Maximum Setback Zone Workbook. Illinois Environmental Protection Agency, p. 62.

Cooper, H.H. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Transaction of the American Geophysical Union*, **27**, 526-534.

Driscoll, F.G., 1986, Groundwater and Wells. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, p. 232.

Fitts, C.R., 1989, Simple analytic functions for modeling three-dimensional flow in layered aquifers, *Water Resour. Res.*, **25**(5), 943-948.

Gorelick, S.M., Freeze, R.A., Donohue, D., and Keely, J.F., 1993, Groundwater Contamination: Optimal Capture and Containment, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, p. 385.

Javandel, I., Doughty, C., and Tsang, C.F., 1984, Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models, American Geophysical Union Water Resources Monograph No. 10, Washington, D.C., p. 228.

Javandel, I. and Tsang, C.F., 1986, Capture-zone type curves: A tool for aquifer cleanup, *Ground Water*, **24**, 616-625.

Kasenow, M.C., 1997, Introduction to Aquifer Analysis. 4th edition (with Aquifer Test Performance (ATP) computer program). Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.

Kasenow, M.C., 1999, Developing a Distance-Drawdown Graph from a Time-Drawdown Graph, *The Professional GEOLOGIST*, **36**(8), 3-7.

McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, USGS Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, USGS, Reston, VA, p. 586.

Newsom, J.M. and Wilson, J.L., 1988, Flow of ground water to a well near a stream - Effect of ambient ground-water flow direction, *Ground Water*, **26**(6), 703-711.

Pollock, D.W., 1989, Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the USGS Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model, USGS Open File Report 89-381, p. 188.

Rumbaugh, J.O., 1991, Quick Flow: Analytical ground-water flow model, Version 1.0, Geraghty & Miller, Plainview, NY.

Shafer, J.M., 1987a, Reverse pathline calculation of time-related capture zones in nonuniform flow, *Ground Water*, **25**(3), 283-289.

Shafer, J.M., 1987b, GWPATh: Interactive groundwater flow path analysis, Illinois State Water Survey Bulletin 69.

Strack, O.D.L., 1989, Groundwater Mechanics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, p. 732.

Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground storage, *Transaction of the American Geophysical Union*, **16**, 519-524.