

## 지하수내 철망간 지중 처리를 위한 산소수 주입정 최적 설계

김규범<sup>1</sup> · 이명재<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>K-water연구원

<sup>2</sup>(주)지오그린21

### 요 약

강변여과수 개발시 용존 철과 망간은 수처리 비용을 증가시키고 시설물의 수명을 단축시키는 요인으로 작용하고 있어 국내에서 지중 처리 기술에 대한 관심이 증가되고 있다. 본 연구에서는 경상남도 창원군 길곡면 중산리 낙동강변의 연구지역 대수층 조건에서는 양수정 지하수의 용존 산소 목표 농도인 25 mg/L를 달성하기 위해 용존산소 농도 30 mg/L로 포화시킨 후 양수량의 30%로 산소수를 주입하는 것이 최적 주입량이 된다는 기존의 연구 결과를 활용하였으며, 수치 모델을 활용하여 주입정의 최적 갯수와 배치를 결정하였다. 양수정 주변에 3개 이하의 주입정이 있는 경우에는 양수정에서의 용존산소 목표 농도의 달성이 불가능하였으나 4개 이상인 경우에는 농도가 25 mg/L를 초과하는 것으로 해석되어 4개의 주입정이 적절한 것으로 평가되었다. 또한, 4개 주입정의 배치 형태별로 모사한 결과, 양수정을 중심으로 정방향의 분포가 적절한 것으로 평가되었다.

**주요어:** 강변여과수, 지중 철·망간 제거 기술, 주입정, 수치 모델

**Gyoo-Bum Kim and Myeong-Jae Yi, 2013, Optimum design of oxygenized water injection wells for an in-situ removal of iron and manganese in groundwater. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 5, p. 579-586**

**ABSTRACT:** There is a growing interest in an in-situ treatment technology of  $Fe^{2+}$  and  $Mn^{2+}$  because their high concentrations in groundwater at the river bank filtration site can cause the high cost for water treatment and the reduction of facilities lifetime. Under the aquifer condition of the study area, which is Jeungsan-ri, Gilgok-myeon, Changnyeong-gun, Kyeongsangbukdo province, it has been revealed at the previous research that the oxygenized water injection rate with a dissolved-oxygen saturation degree of 30 mg/L should be 30% of groundwater pumping rate in order to achieve the target saturation degree of dissolved oxygen, 25 mg/L, at the pumping well. The purpose of this study is to determine the optimum number and location of the injection wells using a numerical model under the above injection condition. It is predicted that it is impossible to achieve the target saturation degree of dissolved oxygen in cases of one, two or three injection wells, but more than four injection wells can satisfy the target concentration and therefore four wells are enough for an optimum injection effect. Additionally, it is analyzed that the square allocation of four wells around a pumping well can produce the best reduction effect.

**Key words:** River bank filtration, In-situ iron-manganese removal, Injection well, Numerical model

(Gyoo-Bum Kim, K-Water Institute, Daejeon 305-730, Republic of Korea; Myeong-Jae Yi, GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 152-719, Republic of Korea)

### 1. 서 언

최근 들어 낙동강을 중심으로 강변여과 방식의 수원 확보 기술이 보급되고 있고, 지표수에 비하여 수처리가 단순하고 안정적인 수량 및 수질 확보가

가능하다는 장점이 있으나, 철과 망간의 함량이 수질 기준을 초과하여 수처리에 어려움을 겪기도 한다. 고농도의 철과 망간은 수처리 문제 뿐 아니라 관정 스크린 및 펌프에 침전되어 막히거나 냄새와 맛에 차이를 가져오는 등 다양한 문제를 야기한다.

\* Corresponding author: +82-2-6330-2503, E-mail: tankguy@empal.com

지하수내 철과 망간을 처리하기 위한 지중처리 기술로서 산소수를 지중에 주입하여 산화대를 형성함으로써 침전시키는 기술이 일부 유럽 지역에서 수십 년간 사용되고 있다(그림 1). 대표적인 사례인 에게도르프(Eggersdorf) 정수장의 경우, 1984년부터 3,000 m<sup>3</sup>/day의 산소를 지중에 주입하여 용존 철은 0.048 mg/L, 용존 망간은 0.005 mg/L의 농도까지 저하시키면서 18,000 m<sup>3</sup>/day의 대규모 취수가 이루어지고 있다(Kim, H.S. *et al.*, 2007; Kim G.B. *et al.*, 2011). 지중에 산소를 주입하는 방법에 대한 학술적 접근으로서 현장 실험에 의한 검증, 모델에 의한 효과 평가, 장기 운영에 의한 침전 상태 평가 등이 수행되었으며, 실제 현장에서 적용할 수 있는 기술로 자리잡고 있다(Hallberg and Martinell, 1976; Fan, 1988; Appelo *et al.*, 1999; Mettler *et al.*, 2001; Sharma *et al.*, 2001; Houben, 2004; El-Araby *et al.*, 2009; van Halem *et al.*, 2011, 2012). 국내에서는 Kim *et*

*al.* (2009)이 낙동강변 충적층에서 우물 개량을 위하여 서지 블록(Surge block) 및 에어 서징(Air surging) 기술을 적용하는 과정에 지상의 산소가 지중에 유입되면서 지하수내 용존 철은 약 5~9배, 용존 망간은 약 10배 저감되는 것을 밝힌 바 있으며, Lee *et al.* (2012)는 일정량의 산소수를 관정내로 장기적으로 주입하였을 경우와 단계적으로 주입량을 증가하였을 경우 등 다양한 조건하에서의 용존 철과 용존 망간의 저감 효과를 현장 실험을 통하여 실증한 바 있다.

본 연구의 목적은 강변여과수 개발시 용존 철과 망간의 처리를 위하여 산소수를 지중에 주입할 경우에 주입의 효과를 극대화하고 시공 비용 등을 줄이기 위해서 수치 모델을 활용한 주입정의 최적화 기법을 검토하는데 있다.

2. 연구 지역

연구지역은 행정구역상으로 경상남도 창원군 길곡면 증산리에 해당되며, 낙동강을 경계로 남측에 창원시와 함안군이 위치한다(그림 2). 낙동강의 자연제방을 기준으로 제외지의 퇴적층은 약 80 m 폭으로 형성되어 있으며 배후의 제내지에는 논과 밭이 분포한다. 본 지역 충적층은 상부로부터 약 23 m 구간에 실트질 모래층이 존재하고 그 하부에는 약 10 m 두께의 모래 자갈층이 분포한다. 모래 자갈층은 원마도가 불량한 직경 수십 cm의 거력질 암편이 포함되어기도 하며, 자갈층의 하부에는 풍화대가 존재한

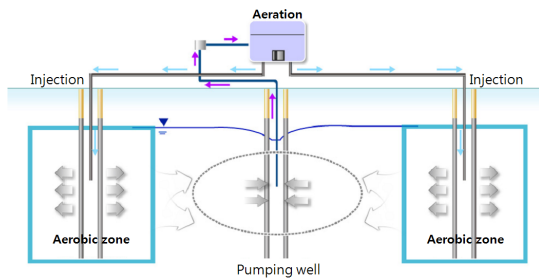


Fig. 1. General concept of in situ iron/manganese removal system (Lee *et al.*, 2012).

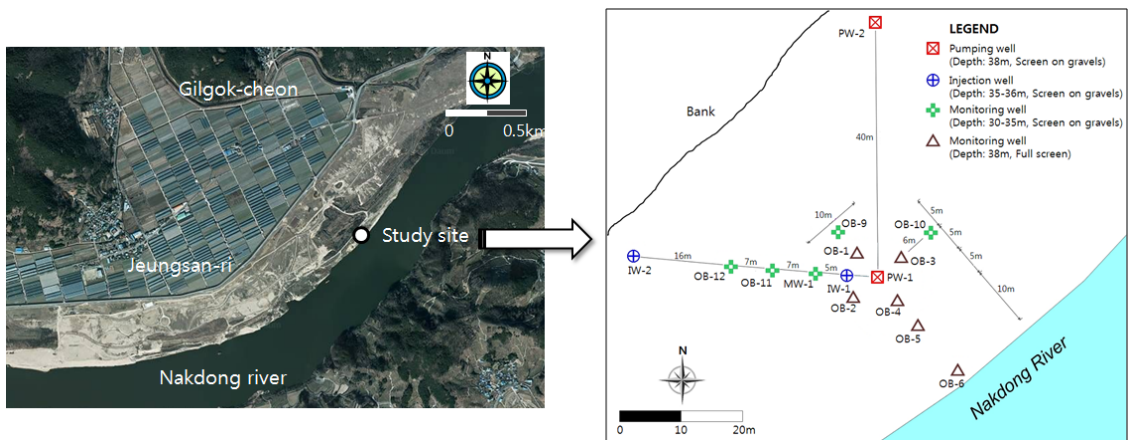


Fig. 2. Location of the study area and distribution of pumping and observation wells.

다(Kim and Kim, 2009).

연구를 위하여 현장에는 주입정 2개소(IW-1, IW-2), 양수정 2개소(PW-1, PW-2), 관측정 11개소(MW-1, OB1~OB6, OB9~OB12)이 설치되었다(그림 2, 표 1). 양수정을 중심으로 하천에 직각 또는 대각선 방향으로 주입정과 관측정을 배치하였는데 관측정간의 거리는 약 5~10 m 정도 유지하였다.

### 3. 연구 방법

연구지역에 대한 지하수내 철과 망간 농도의 저감을 위하여 지중처리에 필요한 산소수의 주입량을 결정하는 실험이 다양한 방법으로 현장에서 수행된 바 있다(Lee *et al.*, 2012). 6가지 유형에 대한 현장 실험이 실시되었는데, 산소발생기를 거친 산소수를 주입정에 주입할 경우 주입정, 양수정 및 관측정 등에서 용존산소가 증가하는 현상을 밝혔으며, 주 대수층인 자갈층에 산화존이 형성되는 경우가 전체 대수층에 산화존이 형성되는 경우보다 용존 철과 망간의 농도 저감 효과가 큰 것으로 평가되었다. 또한, 산소수 주입이 일정 수준을 넘는 경우 용존 철과 망간의 농도 저감 효과는 크게 증가하지 않고 비교적 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험을 통

하여 최종적으로 도출된 결과는 양수정(IW-1)에서 350 m<sup>3</sup>/day로 취수된 물에 산소를 주입하여 산소농도 30 mg/L로 포화시킨 후 주입정(MW-1)으로 양수량의 30%에 해당하는 105 m<sup>3</sup>/day를 주입하는 것이 가장 효과가 좋은 것으로 해석된 바 있다.

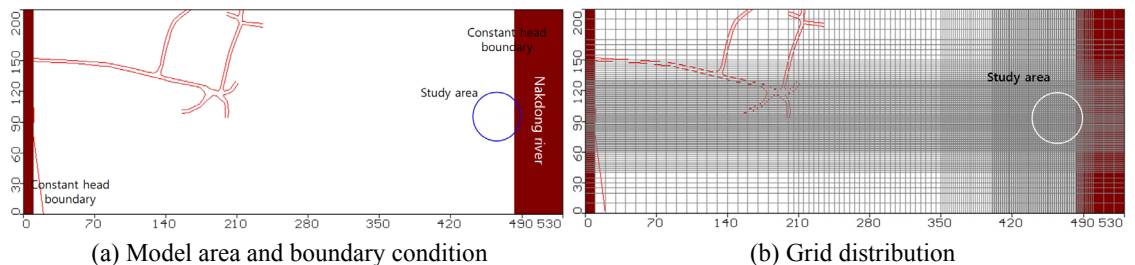
본 연구에서는 본 지점 대수층에서 실제 양수 가능한 최대량에 해당하는 약 1,000 m<sup>3</sup>/day의 규모로 양수가 이루어질 경우 용존 철과 망간 저감을 극대화하기 위하여 필요한 주입정의 배치와 개수를 평가하고자 수치 모델링 기법을 활용하였다. 수치모델은 3차원 유한차분 지하수 유동 모형인 MODFLOW와 3차원 용질이동 모형인 MT3D를 사용하였으며, 이를 이용하여 용존산소의 이동을 모의하였다. 용존산소는 철, 망간, 유기물 등과의 산화-환원 반응의 주요 인자로, 본 연구에서는 이러한 반응을 고려하지 않고 보존성 용질로 다루어 용존산소의 이동을 모의하여 설계에 반영하였다.

### 4. 모델의 구성

강변여과수 내 용존산소의 농도 변화를 모의하기 위해 연구지역을 대상으로 개념 모델을 구축하였다. 모의 영역은 효율적인 모의를 위해 연구지역을 약

**Table 1.** Design of the pumping, injection, and monitoring wells (Lee *et al.*, 2012).

Content	IW-1	IW-2	PW-1	PW-2	MW-1	OB-1~OB-6	OB-9~OB-12
Purpose	Injection	Pumping	Pumping	Pumping	Monitoring	Monitoring	Monitoring
Depth (m)	36	35	38	38	36	38	35
Diameter (Inch)	6	6	10	6	2	2	2
Screen (m, depth)	29-36 (Gravel)	26-35 (Gravel)	28.5-36.5 (Gravel)	25-35 (Gravel)	29-36 (Gravel)	Full screen	24-35 (Gravel)
Distance to pumping well (m)	5	40	-	40	10	10~24	10~24



**Fig. 3.** Boundary condition and grid composition of a numerical model.

48° 회전하여 낙동강을 동측 경계로 설정하였으며 530 m × 200 m의 크기로 모델을 형성하였다(그림 3). 모의 영역의 격자망은 10 m × 10 m로 조밀하게 설정하였으며 연구지역 주변 지역은 1 m × 1 m로 더욱 세분화하였다. 낙동강과 연구지역에서 약 500 m 이격된 지점을 일정수두 경계로 설정하였다.

현장에서 수행된 기존의 양수시험 결과(Kim and Kim, 2009; Kim *et al.*, 2012)에서 제시된 수리전도도를 토대로 모델의 반복 과정을 거쳐 상부 실트 모래층은  $9.3 \times 10^{-4}$  cm/sec, 하부의 모래 자갈층은  $1.7 \times 10^{-3}$  cm/sec를 적용하였으며, 맨 하부의 풍화토층은  $1.1 \times 10^{-5}$  cm/sec로 설정하였다(표 2). 공극률은 기존 문헌 자료를 토대로 모델 보정과정에서 일부 수정하여 적용하였다.

본 연구지역에 대한 최적 주입수량을 양수량의 10%, 20%, 30% 및 40%로 설정하여 실제 주입한 결과, 30%로 주입하였을 때 양수정의 용존산소가 25 mg/L 이상으로 지속되어 안정화되었으며 이 때 양수정에서의 용존 철은 0.1 mg/L, 용존 망간은 0.21 mg/L까지 낮아져 최적 주입수량으로 결정된 바 있다(Lee *et al.*, 2012). 이와 같은 최적 주입량 조건을 모델에 적용하여 정류 모사를 실시하였다. 양수정(IW-1)에서 350 m<sup>3</sup>/day로 취수된 물에 산소를 주입하여 산소농도 30

mg/L로 포화시킨 후 주입정(MW-1)으로 양수량의 30%에 해당하는 105 m<sup>3</sup>/day를 주입하는 산소수 주입 시험을 5일간 수행하는 것으로 모사하였다.

모형의 보정은 현장 시험에서 측정된 지하수위와 모델의 지하수위를 비교하는 방법을 사용하였으며, 주입 후 양수시 실제 용존산소의 반응 시간과 양수정의 용존산소 농도 변화 역시 모델 결과와 비슷할 수 있도록 보정하였다. 지하수위에 대한 보정은 5일간의 주입 양수 시험이 완료되는 시점에서의 모델의 안정수위와 현장 산소주입 시험시 측정 수위를 비교하여 수행하였다(그림 4(a)). 모델 보정을 위하여 RMS (Root Mean Square)와 Normalized RMS가 가능한 최소가 되도록 모델을 반복 수행하였다.

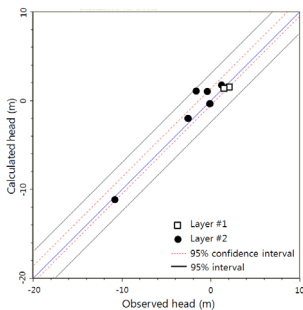
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{cal} - X_{obs})^2}$$

$$Normalized\ RMS = \frac{RMS}{(X_{obs})_{max} - (X_{cal})_{min}}$$

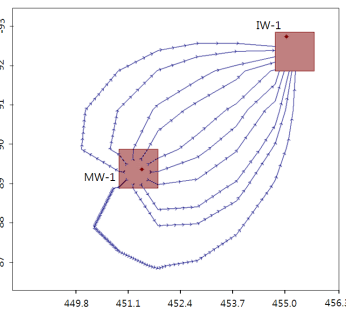
여기에서,  $X_{obs}$  = 현장 측정 수두값,  $X_{cal}$  = 모의 결과 수두값이다. RMS와 Normalized RMS는 각각 1.15 m, 8.95%가 되도록 모형 보정을 수행하였는데, Normalized RMS 값이 10% 이내로서 연구지역 지

**Table 2.** Parameters used for a numerical model.

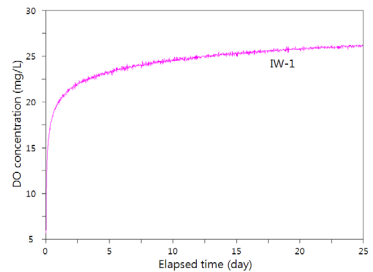
Layer	Components	Hydraulic conductivity (cm/sec)	Specific storativity (m <sup>-1</sup> )	Porosity
Zone 1	Sand and silt	$9.3 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	0.2
Zone 2	Sand and gravel	$1.7 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$	0.3
Zone 3	Weathered	$1.1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	0.1



(a) Observed and calculated heads



(b) Particle tracking result (gradation unit: 0.01day)



(c) DO concentration at IW-1

**Fig. 4.** Three approaches used for a model calibration.

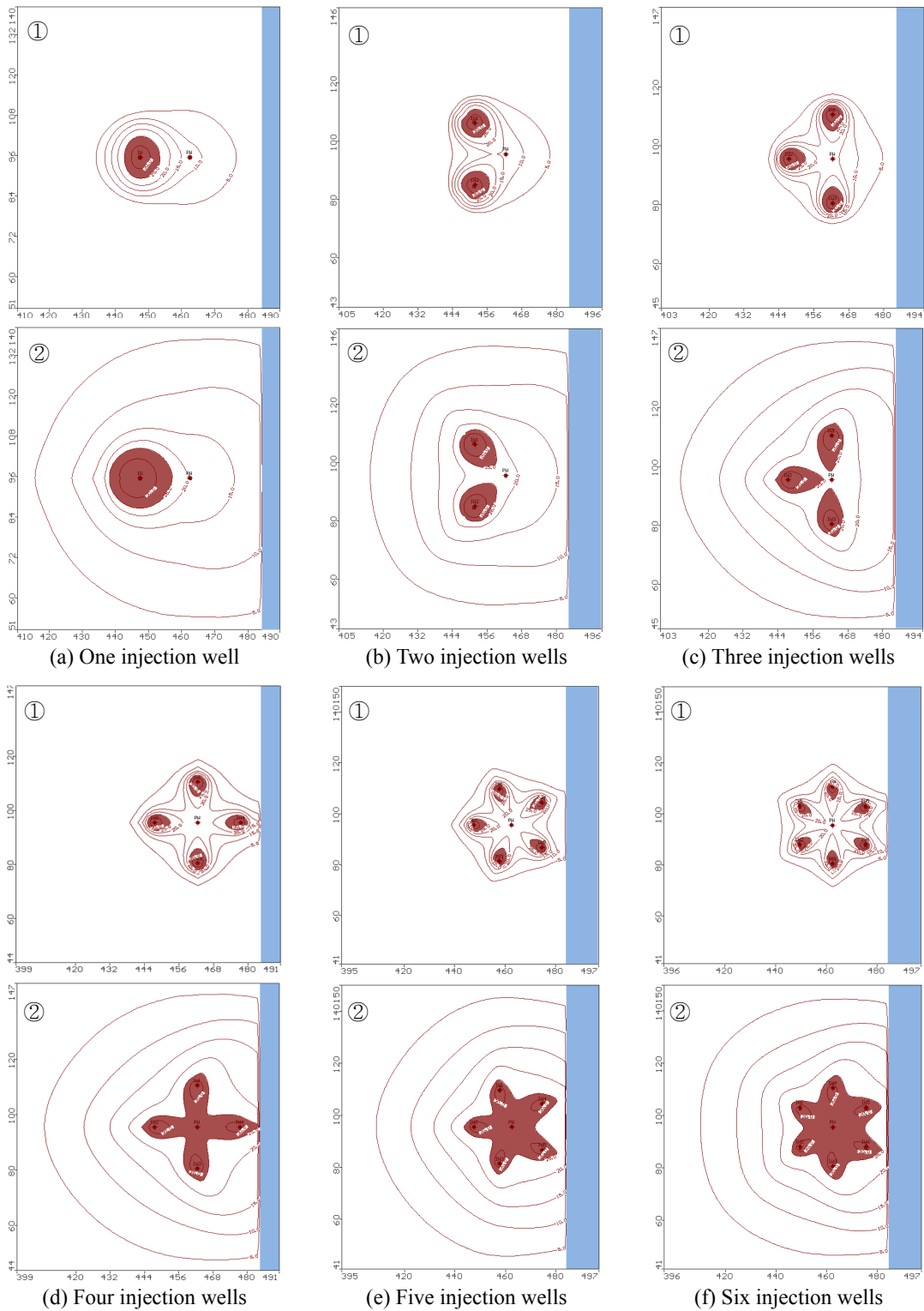


Fig. 5. Simulation of DO changes for each injection case using MT3D (①: after 1 day, ②: after 20 days, dark color boundary: 25 mg/L).

하수계를 비교적 잘 반영한다 하겠다. 그러나, 이와 같은 오차 발생은 모델의 설정 과정에서 현장의 다양하고 복잡한 지층 및 수리특성 정보가 단순화되어 반영되었기 때문으로 보인다.

현장 실험시 주입정(MW-1)에서 산소수를 주입한 후 양수정(IW-1)에서 인지되는 용존산소의 초기 반응시간은 약 2시간으로 나타났는데, 모델의 정확성을 파악하기 위하여 MODPATH의 입자 추적법을 이용하여 입자가 도달하는 시간이 약 2시간(약 0.085일)이 되도록 모델을 구성하였다(그림 4(b)). 또한, 실제 현장에서 측정된 양수정에서의 용존산소 농도인 25 mg/L가 모델상에서 유지되도록 모형 보정을 수행하였는데, 그림 4(c)에서 보는 바와 같이 초기에는 용존산소 농도가 급격히 증가하다가 약 5일이 경과하면서 완만하게 일정한 수준으로 변화됨을 보여준다. 이러한 결과는 용존산소를 보존성 용질로 다루어 예측한 결과로 실제 현장에서 관측한 반응 후 저감된 용존 농도와 차이가 있다. 추후 정교한 연구를 위해서는 반응성 용질이동 모사에 대한 접근이 필요하다.

5. 최적 주입정 분석

현장에서 실제 최적 주입량(용존산소 30 mg/L로 양수량의 30% 주입)의 조건으로 산소수를 지중 주입한 결과, 주입종료 후 용존 철/망간의 농도가 감소하거나 꾸준히 낮은 농도로 유지되는 시간은 약 43시간 이후로 나타났다(Lee et al., 2012). 따라서 주입정으로 주입된 물이 양수정까지 도달하는 동안 충분한 산화반응이 일어나야 용존 철/망간의 저감효율이 높게 나타는 것으로 판단된다. 이와 같은 현장 시험 자료를 토대로 위에서 구축한 정류 모델을 토대로 연구지역의 실제 적정 양수량인 1,000 m<sup>3</sup>/day의 강변여과수를 개발한다고 가정할 경우 주입정의 최적 설계를 위한 수치모델을 수행하였다. 현장에서 확인된 산화 반응 유지시간(43시간)을 모델링에 적용한 결과, 주입정과 양수정의 거리는 약 15 m인 경우에 유사한 효과가 발생하는 것으로 나타났으며, 이 거리 조건을 고려하여 양수정에서 1,000 m<sup>3</sup>/day로 양수할 때 양수량의 30%인 300 m<sup>3</sup>/day를 몇 공에서 주입하는 것이 최적의 효율을 나타내는지에 대해 모의를 수행하였다(그림 5).

1개의 주입정을 양수정에서 15 m 떨어진 지점에 설치하여 300 m<sup>3</sup>/day이 양을 주입할 경우에는, 그림 5(a)의 그림에서 보는 바와 같이 20일이 경과하여도 양수정에서의 용존산소 농도가 25 mg/L를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 2개의 주입정에서 각각 150 m<sup>3</sup>/day 및 3개의 주입정에서 각각 100 m<sup>3</sup>/day을 주입한 경우에도, 20일이 경과하여도 양수정에서의 용존산소 농도가 25 mg/L를 초과하지 않는 것으로 나타났다(그림 5(b), 5(c)). 반면에, 4개의 주입정에서 각각 75 m<sup>3</sup>/day, 5개의 주입정에서 각각 60 m<sup>3</sup>/day 및 6개의 주입정에서 각각 50 m<sup>3</sup>/day 등 4개 이상의 주입정인 경우에는 10일이 경과하면서 용존산소 농도가 25 mg/L를 초과하는 것으로 예측되었다(그림 5(d) ~ 그림 5(f), 그림 6). 또한, 그림 6에서 보는 바와 같이 주입정이 3개 이하인 경우에는 30일이 경과하여도 양수정에서의 목표 농도 25 mg/L 이상을 보이지 않고 있으며, 주입정이 4개인 경우에는 10일이 경과하면서 목표 농도를 초과하기 시작하고 있다. 또한, 주입정이 4개 이상이 되면 양수정에서의 용존산소 농도 증가가 둔화되어 변곡점을 보이는데, 이는 곧 주입정을 5개 이상 설치하더라도 용존산소 농도 증가가 뚜렷해 지지 않는 것을 의미하며, 이는 곧 4개의 주입정을 배치하는 것이 용존 철과 망간의 저감 효과를 유지하면서 시공 비용을 절감할 수 있는 적정 수준으로 평가할 수 있음을 보여준다.

한편, 연구지역은 하천과 인접한 지역으로서 지하수에서 하천으로의 흐름에 의하여 산소수 주입의 효과에 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 위에서 적정 갯수로 결정된 4개의 주입정을 그림 7과 같이 3가지 유형으로 배치할 경우의 각각의 주입 효과에 대한 모의를 수행하였다. 첫 번째는 양수정을 중심으로 하천과

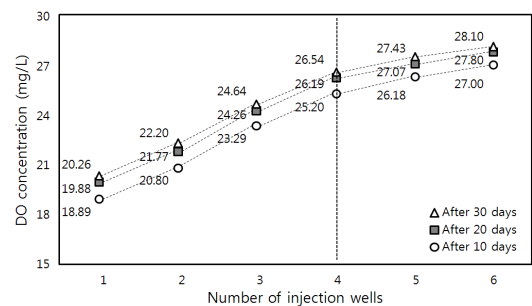


Fig. 6. Graphs for DO concentration at a pumping well after oxygenized water injection.

대각선 방향으로 주입정이 배치되는 다이아몬드 형태로 배치할 경우를 모사한 것으로서, 20일이 경과하게 되면 양수정내에서의 용존 산소 목표 농도인 25 mg/L를 초과하는데 양수정을 중심으로 등분포를 보이는 것으로 예측되었다(그림 7(a)). 두 번째는 주입정이 하천과 평행한 정사각형 형태로 배치된 경우로서 위의 경우와 마찬가지로 용존 산소의 목표 농도가 달성되며 양수정을 중심으로 비교적 등분포를 보이는 것으로 예측되었다(그림 7(b)). 세 번째는 제내지에서 하천 방향으로 지하수가 흐르는 점을 고려하여 양수정을 중심으로 하천 반대편에 주입정을 배치시킨 경우로서, 양수정내에서의 용존 산소 농도는 20일이 경과한 후 목표 수준을 달성하고 있어 위의 두 경우와 유사한 효과를 보이고 있으나, 양수정 주변의

농도가 등분포를 보이지 않고 하천 측에서의 효과가 훨씬 낮은 것으로 나타났다(그림 7(c)). 세 번째의 경우에는 하천쪽의 농도 변화가 거의 발생하지 않는데 이는 주입정의 배치 특성상 주입수가 유입되는 것이 아니라 하천수의 유입이 영향을 미치는 것으로 보인다. 이와 같이 주입정의 배치가 양수정을 중심으로 방사상 및 등거리 분포를 하지 않는 경우에는 산소수의 주입 시기와 주기를 결정할 때 지하수 흐름 방향과 속도, 하천수의 유입 등이 함께 고려되어야 함을 보여준다. 또한, 대부분의 국내 강변여과수 개발 지역의 층적층 분포는 점토와 실트 등이 렌즈상으로 협재되어 있어 이방성을 갖는 경우가 많다. 이와 같은 이방성이 존재하는 경우에는 수리적 연결성이 양호하지 않고 방향에 따라 특성이 다를 수 있으므로 이를

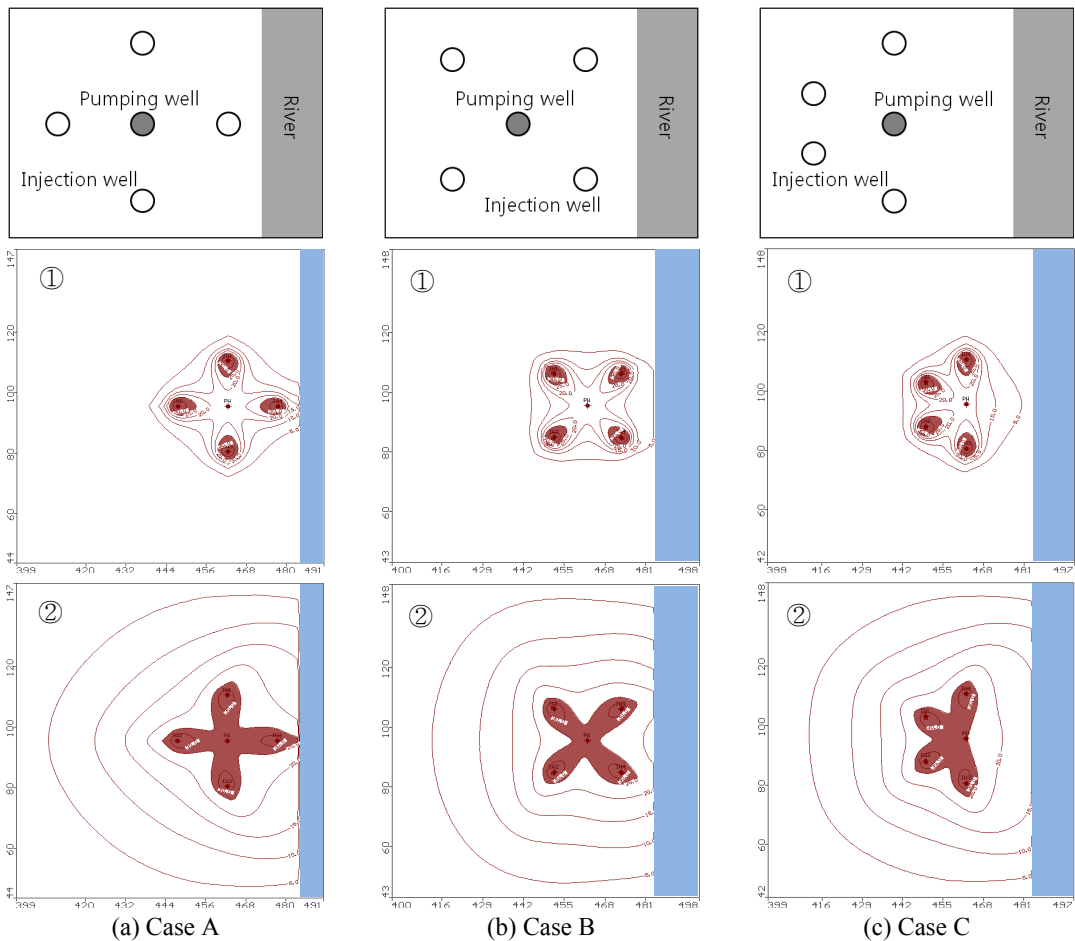


Fig. 7. Simulation of DO changes for each allocation case of injection wells using MT3D (①: after 1 day, ②: after 20 days, dark color boundary: 25 mg/L).

고려한 주입정 배치가 고려되어야 한다.

## 6. 결 언

강변여과수의 수질 문제중 대표적인 것인 용존 철과 망간이 지하수내에 용출된다는 점으로서 정수 처리 비용의 증가를 초래하고 관로의 노후화에 악영향을 주게 된다. 본 연구에서는 유럽 등에서 1960년대부터 시행해 오던 용존 철과 망간의 지중 산화 처리 기술의 적용성을 실제 현장에서 파악하고 현장 실측 자료를 토대로 산소수 주입에 필요한 주입정의 최적 갯수 및 배치를 결정하기 위한 모델 적용을 통한 효과를 평가하고자 하였다.

본 연구지역의 경우 최적의 산소수 주입량은 산소 농도 30 mg/L로 포화시킨 후 양수량의 약 30%에 해당하는 양을 15 m 떨어진 주입정에서 주입하는 것이 효과적인 것으로 알려져 있어 이를 토대로 주입정의 최적 갯수와 배치를 결정해 보았다. 모델에 의한 예측 결과, 4개 이상의 주입정이면 양수정내 용존 산소 증가 효과가 크게 증가하지 않으므로 4개의 주입정 배치가 경제성을 고려하여 적정한 것으로 제시되었으며, 주입정의 배치 형태는 양수정을 중심으로 등분포하는 정방형의 분포가 적절한 것으로 평가되었다. 국내 용존 철과 망간의 지중 처리 기술은 초보 단계로서, 본 연구에서는 현장 파일럿 규모로 실험이 이루어졌으나 향후 실증 규모의 다양한 현장 실험과 정밀 분석이 필요하며, 이를 토대로 실제 강변여과수 집수정 주변에서의 지중 처리 시설이 구축 상용화되길 기대해 본다.

## REFERENCES

Appelo, C.A.J., Drijver, B., Hekkenberg, R. and de Jonge, M., 1999, Modeling in situ iron removal from ground water. *Ground Water*, 37(6), 811-817.

El-Araby, R., Hawash, S. and El-Diwani, G., 2009, Treatment of iron and manganese in simulated groundwater via ozone technology. *Desalination*, 249(3), 1345-1349.

Fan, M., 1988, The application of vyredox method regarding iron removal from ground water in China. *Ground Water*, 26(5), 647-648.

Hallberg, R.O. and Martinell, R., 1976, Vyredox - in situ purification of ground water. *Ground Water*, 14(2),

88-93.

Houben, G., 2004, Modeling the buildup of iron oxide encrustations in wells. *Ground Water*, 42(1), 78-82.

Kim, B.W. and Kim, G.B., 2009, Effect of a monitoring well design on estimated hydraulic parameters in pumping test for unconsolidated sediments. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(6), 787-797 (in Korean).

Kim, B.W., Kim, G.B. and Kim, G.Y., 2012, Change of hydraulic characteristics due to well drilling and well development in an unconsolidated aquifer. *The Journal of Engineering Geology*, 22(1), 27-37 (in Korean).

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*, 19(3), 385-396 (in Korean).

Kim, G.B. *et al.*, 2011, Construction and Practical Use of Sustainable Groundwater Development System. Ministry of Education, Science and Technology, 21st Century Frontier R&D Program, Sustainable Water Resources Research Center, 1054 p (in Korean).

Kim, H.S. *et al.*, 2007, Development of Water Service System Using Aquifer. Ministry of Science and Technology, 21st Century Frontier R&D Program, Sustainable Water Resources Research Center, 1373 p (in Korean).

Lee, M.J., Park, J.H. and Kim, G.B., 2012, In situ iron-manganese removal by the oxygenized water injection at the river bank filtration site. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48(6), 503-519 (in Korean).

Mettler, S., Abdelmoula, M., Hoehn, E., Schoenenberger, R., Weidler, P. and von Gunten, U., 2001, Characterization of iron and manganese precipitates from an in situ groundwater treatment plant. *Ground Water*, 39(6), 921-930.

Sharma, S.K., Kappelhof, J., Groenendijk, M. and Schippers, J.C., 2001, Comparison of physicochemical iron removal mechanisms in filters. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 50(4), 187-198.

van Halem, D., de Vet, W., Verberk, J., Amy, G. and van Dijk, H., 2011, Characterization of accumulated precipitates during subsurface iron removal. *Applied Geochemistry*, 26(1), 116-124.

van Halem, D., Moed, H.D., Verberk, J.Q.J.C., Amy, G.L. and van Dijk, J.C., 2012, Cation exchange during subsurface iron removal. *Water Research*, 46(2), 307-315.

---

투 고 일 : 2013년 8월 13일  
 심 사 일 : 2013년 8월 16일  
 심사완료일 : 2013년 10월 31일