

추적자를 이용한 산소수 주입 경로 확인 및 산소수에 의한 철·망간 제거 효과

전성천 · 장호준 · 한 찬 · 이종화 · 이명재[‡]

(주)지오그린21

요 약

강변여과수 취수과정에서 고농도 용존 철과 망간은 산소수의 주입-양수 방식으로 대수층에서 침전시켜 제거할 수 있다. 그런데 대용량 간접취수 방식인 방사형 집수정에서는 여러 개의 수평관이 존재하여 산소수의 주입-양수시 지하수 흐름이 복잡하게 형성되고 용존산소 배경농도도 다르므로 산소 농도의 분포만으로는 산소수의 이동경로 및 확산범위를 파악하기 어려우며, 철/망간의 제거 효과도 정량화하기 어렵다. 본 연구에서는 산소수 주입시 비반응성 형광물질인 우라닌을 추적자로 함께 주입하여 산소수의 이동경로 및 확산범위를 평가하였다. 추적자 농도를 통하여 수평관 #8 주위에 설치한 주입정들에서 주입된 산소수가 수평관 #8으로 바로 회수되지 않고 인접한 여러 수평관으로 확산되는 것을 확인하였으며, 추적자가 회수되는 수평관의 지하수에서 철이 먹는물 수질기준인 0.3 mg/L 이하로 제거됨을 확인하였다. 망간의 경우는 일부 저감이 나타나나 철보다 뚜렷한 저감은 나타나지 않았다. 수집일간의 장기양수에도 추적자의 회수율은 약 48.9%로 주입된 절반 이상의 산소수는 외부로 이동하였거나 대수층에 잔존되어 있는 것으로 나타났다. 금번 연구를 통해 방사형 집수정에서도 산소수를 이용한 철/망간 지중제거기술이 효과적으로 활용될 수 있으며, 효율을 높이기 위해서는 대수층 수리지질 특성 및 지하수 흐름을 고려한 산소수 주입정의 배치가 필수적임을 확인할 수 있었다.

주요어: 강변여과수, 현장 철/망간 지중제거, 추적자 시험, 철, 망간

Seong-Chun Jun, Ho-June Jang, Chan Hahn, Jong-Hwa Lee and Myeong-Jae Yi, 2016, Determination of the pathway of injected oxygenated water with tracer and the effect of iron and manganese removal in groundwater. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 259-273

ABSTRACT: During intake process of river bank filtration, high concentration of iron and manganese can be removed by precipitation using oxygenated water injection into the aquifer. In radial collector well, the complex groundwater flow is formed during injection-pumping of oxygenated water, and the background concentrations of dissolved oxygen are also different in laterals. Only using the distribution of the oxygen concentration, it is difficult to grasp the pathway and the dispersion range of the injected water, and this makes that the quantification for iron-manganese removal efficiency is more complicated. In this study, the pathway and the dispersion range of injected water were estimated by non-reactive florescent tracer known as uranine injected along with the oxygenated water. Based on tracer concentrations, It was confirmed that the oxygenated water which was injected through the injection wells around the lateral #8 was not directly recovered to lateral #8 but dispersed into several adjacent laterals. The concentration of iron in groundwater went down to 0.3 mg/L in part of the pathway of the tracer. The removal of manganese seems to be proceeded partly and not conspicuous as iron. Despite long-term pumping in the dozens of days, the recovery ratio of injected tracer was about 48.9% through the laterals and other wells. More than half of oxygenated water moved out and/or stayed in the aquifer. Though this study, it was confirmed that in-situ iron-manganese removal using oxygenated water can be applied in radial collector well. And appropriate distribution of injection wells considering the characteristics of the aquifer is necessary to enhance the efficiency of the system.

Key words: river bank filtration, in-situ iron-manganese removal, tracer test, iron, manganese

(Seong-Chun Jun, Ho-June Jang, Chan Hahn, Jong-Hwa Lee and Myeong-Jae Yi, GeoGreen21 Co. Ltd., Seoul 08376, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-2-6330-2503, E-mail: tankguy@geogreen21.com

1. 서 언

수변지역 지하수의 활용성을 높이기 위한 시도 가운데 강변여과수와 같은 간접취수 방식의 개발은 대표적 사례로서 안정적인 수량 확보, 지표수 수질 사고 시 완충작용, 대체 취수원 확보 등 많은 장점으로 인해 지표수 취수 방식의 대안으로 점차 그에 대한 관심과 연구 및 실질적인 적용이 증가하고 있다. 그러나 종종 수변지역 대수층의 혐기성 환경으로 인해 발생하는 지하수 내 높은 용존 철 및 망간 함량은 강변여과수 보급의 확장에 걸림돌로 작용하기도 한다. 철과 망간은 그 자체로 인체에 직접적인 부정적 영향을 미치지 않지만, 높은 농도로 존재할 때 지하수의 이취미(異臭味)를 유발하거나 관정 스크린, 펌프 및 배관 등의 시설 내에 미생물 군집을 형성하고 침전을 초래할 수 있기 때문에 필요한 용도로 공급하기 위해서는 그에 대한 제거가 필수적이다. 통상적인 처리시설에 의한 방식은 지표처리 방법으로서 산화제의 투입과 모래층을 통한 여과를 통해 이루어지며, 이와 대비를 이루는 방법으로 지중제거 또는 현장(in situ) 처리 기법이 있다. 이는 통상적인 처리법만큼 오래전부터 적용되어 왔고 신뢰성과 경제성이 있는 것으로 증명되었다(Appelo and de Vet., 2003). 주로 유럽을 기반으로 유수의 음용수 공급업체들이 이 방법으로 양수시설을 운영하고 있는데(van Halem *et al.*, 2012), 이 방법은 폐기물을 양산하지 않고 또한 일반적으로 어떠한 화학물질도 필요로 하지 않기 때문에 큰 장점을 지니고 있다. 이 지중처리 기법은 산소수를 지중에 주입하여 산화구간을 형성함으로써 지하수 내의 철과 망간을 이온교환 및 침전, 흡착 등의 과정을 통해 저감시켜 회수하는 기술이다. 주입한 산소수의 양보다 수배에 이르는 저농도 철(망간) 함유 지하수를 반복적으로 회수할 수 있다는 점이 이 기술의 핵심이다.

주입 및 양수는 동일한 우물에서 진행할 수도 있고, 단일 양수정 주변에 다수의 주입정을 배치하는 방식으로 이루어질 수도 있다. 후자의 경우, 유럽을 비롯한 여러 지역에서 성공적으로 적용되고 있다(van der Laan, 2008; van Halem *et al.*, 2012). 이 방식은 산화 구간을 넓혀 양수정 인근에서 철의 침전을 최소화할 수 있는 등의 장점이 있으므로 단일 우물 주입-양수 방식보다 진일보한 것이라 할 수 있

다. 그러나 보다 정교한 주입정의 운영이 필요하며 대수층의 불균질성 등에 의해 주입으로 형성된 산화 구간이 부분적이거나 불규칙한 경우 양수 시의 유입 구간과 일치하지 않을 수 있어 높은 철/망간 농도의 배경 지하수가 여과 없이 저감되지 않은 상태로 유입될 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 해당 대수층에 대한 면밀한 수리지질 특성화와 주입 및 양수 시 유동체계에 대한 예측 및 이해가 필수적이라 할 수 있다.

국내에서는 하천변 대수층에서 방사형집수정 형태로 간접취수 방식의 집약적 대용량 개발을 꾀하려는 시도가 증가하고 있다. 이는 수평적 선배출원(line sink)의 특성을 갖고 있고 수평집수관의 하천하부 설치 등으로 인해 수직정 방식에 비해 매우 복잡한 지하수 유동 체계를 형성한다. 철/망간과 관련한 수질적인 측면에서는 하천수의 유입 증가로 희석의 효과를 기대할 수 있지만 이는 배경지하수의 철/망간 농도 및 하천수와 지하수의 혼합비율 등 인위적 조절에 한계가 있는 조건들에 의해 근원적인 해결책이 되기 힘들다. 따라서 이러한 시스템을 대상으로 철/망간 지중저감 기법을 적용하는 것은 새로운 과제라 할 수 있다. 이에 대한 연구는 지중저감 기법의 본 고장인 유럽에서도 사례를 찾기 힘들다(Rott and Meyerhoff, 1994).

국내에서도 강변여과수의 확산과 보급 증가에 따라 현장 철/망간 제거 기술에 대한 연구와 개발이 비교적 최근 들어 진행되고 그 실질적 적용의 전망을 넓혀 왔다. Kim *et al.* (2009)은 우물개량에 의한 산소와의 접촉 증가에 따른 철/망간 저감효과에 대해 연구한 바 있으며, Lee *et al.* (2012)은 산소수의 주입기술 및 효과에 대해, Kim and Lee (2013)는 산소수 주입정의 최적 설계에 대해 연구한 바 있다. 이들 연구는 주로 고농도 산소수의 생성과 대수층 주입 기술, 그리고 이에 따른 철/망간의 저감 효과에 초점이 맞춰져 있었다. 산소수의 반복적인 주입-양수에 의한 지중 철/망간 제거기법의 본격적인 현장 실험은 Yi *et al.* (2015) 및 Yi (2016)에 보고된 바 있으며, 이는 철/망간 제거기법의 현장 적용을 실증하기 위한 것으로 국내에서는 처음 시도된 것이다. 이 실험은 단일우물 주입-양수 방식으로 진행한 것으로 지속적이고 성공적인 철 제거 효과를 현장 규모에서 확인할 수 있었다. 이후 동일한 대수층 내에 설치된

방사형 집수정을 대상으로 산소수 반복 주입에 의한 철/망간 제거 실험이 진행되었으며 이에 수반된 과정과 결과를 본 연구에서 다루었다. 방사형 집수정에서 산소수 주입에 의한 산화존의 형성 범위 및 영향 반경은 수직 취수정에 비하여 그 규모가 크며, 대수층에서의 불균질하고 복잡한 지하수 흐름에 의해 산화환경 형성과 지중 철·망간 저감효과가 영향을 받을 수 있다.

추적자 시험은 흔히 대수층 내에서 용질의 확산 특성이나 이동방향을 파악하거나 지점간의 수리적 연결성을 파악하기 위해 수행된다(Lee *et al.*, 2003). 국내에서는 오염물질의 거동특성을 평가하기 위해 비반응성 음이온이나 형광추적자를 이용한 추적자 시험이 주로 이루어졌으며(Lee *et al.*, 2001, 2003; Kang *et al.*, 2006, 2008; Yi *et al.*, 2007), 최근에는 유류 오염물질량을 평가하기 위한 분배추적자시험에 대한 연구가 수행되기도 하였다(Kim *et al.*, 2014). 강변여과수와 관련하여 대상지인 고투수성 충적층에서 추적자 시험을 수행한 사례는 존재하나(Kang *et al.*, 2007), 강변여과수 취수시설에서 추적자를 이용한 연구 사례는 아직 보고된 바 없다.

본 연구에서는 방사형 집수정에서 산소수 주입을 통한 철·망간 지중저감 기술 적용 시 주입 산소수의 영향 반경 및 이동 거리 등을 파악하기 위하여 산소

수를 주입할 때 추적자를 함께 주입하여 주입 산소수의 영향 범위와 대수층 내 철·망간의 지중저감 효과를 평가하였다.

2. 연구지역 및 방법

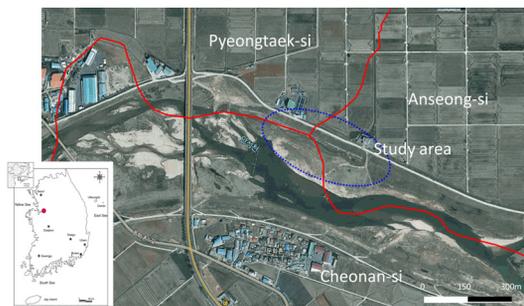
2.1 연구지역

연구지역은 행정구역상 경기도 평택시 유천동과 안성시 공도읍 중북리의 경계지점으로 안성천 내 둔치에 위치하고 있으며, 남쪽으로 충청남도 천안시 서북구 신가리와 인접하여 있다. 연구지역 지형 특성은 하천 충적층에 의한 평야지대가 발달하여 있으며 수계발달은 현암천, 한천, 청룡천, 입장천 등 소지류가 합류한 안성천이 동쪽에서 서쪽으로 흘러 도일천, 진위천과 만나 아산만으로 유입되는 복잡한 수지상 수계를 나타낸다. 지질은 선캠브리아기 변성암류인 평택편마암, 주라기 대보화강암류, 백악기 불국사관입암류 및 퇴적암류, 그리고 제4기 충적층이 분포하고 있다(Kim *et al.*, 1980; 그림 1).

시추조사 결과에 의하면, 충적층은 지표 하 약 6.0~9.9 m의 두께로 분포하고 있으며, 상부로부터 점토질 실트, 실트질 모래, 모래질 자갈, 풍화토로 구성된다. 지하수를 부존하고 있는 주 대수층인 자갈질 모래층에 방사형집수정의 수평관이 설치되었다(Kim *et al.*,

Table 1. Background quality of groundwater and surface water.

	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	DO (mg/L)	Eh (mV)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Fe^{2+} (mg/L)	Mn^{2+} (mg/L)
Groundwater	5.6~6.9	236~504	1.2~3.7	161~359	13.0~16.2	0.6~6.2	0.3~4.9
Anseong River	7.0	475	9.4	307	6.5	0.6	0.4



(a) Location



(b) Geologic map

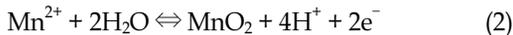
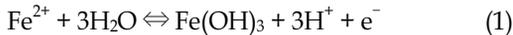
Fig. 1. Location and geologic map of the study area. (a) Location, (b) Geologic map.

2015). 실규모 양수시험에 의해 분석된 층적층의 평균 수리전도도는 약 7×10^{-3} cm/sec이다(Yi *et al.*, 2015).

방사형 집수정이 설치되기 전인 2013년 11월말에 조사된 지표수와 지하수의 배경수질은 표 1과 같다. 지하수의 수소이온농도(pH)는 5.6~6.9이며, 전기전도도(EC)는 236~504 μ S/cm의 값을 갖는다. 용존산소(DO)와 산화환원전위(Eh)는 각각 1.2~3.7 mg/L, 161~359 mV의 범위를 보인다. 또한, 지하수의 Fe^{2+} 와 Mn^{2+} 농도는 각각 0.6~6.2, 0.3~4.9 mg/L의 값을 나타내었다. 하천수의 경우 pH, EC 및 DO는 각각 7.0, 475 μ S/cm, 9.4 mg/L의 값을 갖는다. 하천수의 Fe^{2+} 와 Mn^{2+} 농도는 각각 0.6, 0.4 mg/L로 지하수와 차이를 나타내었다.

2.2 이론적 배경

자연상태에서 철은 Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 의 두가지 상태로, 망간은 Mn^{2+} 과 Mn^{4+} 을 비롯하여 다양한 상태로 존재하며, 지하수 내 산화환원조건에 따라 전자를 교환하여 변환된다. 일반적으로 환원조건에서는 2가 상태인 Fe^{2+} 와 Mn^{2+} 의 용존상태로 존재하나, 산화조건에서는 수산화이온 또는 산소와 결합하여 수산화물 및 산화물로 침전된다(Hallberg and Martinell, 1976; Silveira, 1988).



산소수 주입에 의한 철·망간 지중처리는 환원상태의 대수층에 관정을 통하여 산소를 공급함으로써 산소수 공급 구역 내에 산화조건 영역을 형성시키고 이로 인해 2가의 용존상태로 존재하는 철·망간의 산화를 유도한 후 수산화물이나 산화물로 침전시켜 지하수 내에서 제거하는 방법이다(Deutsch *et al.*, 2005).

철·망간 지중처리 방법을 강변여과수에 적용함에 있어 우선적으로 고려되어야 할 것은 주입 산소수의 확산 및 영향범위이다. 그런데 관정을 이용하여 대수층 내에 산소수를 주입하면 이동 확산과정에서 산소는 지하수 및 대수층 매질과 화학적 반응을 이루어 주입수의 이동 전단(front)에 비해 지연되므로 단순히 산소 용존농도에 의존하여 확산 및 영향범위를 판단하기는 어렵다. 이때 유용하게 이용될 수 있는 것이 추적자인데, 산소수에 비반응성 추적자를 용해

시켜 함께 주입하면 추적자의 농도 분포를 통해 주입수의 확산 및 영향범위를 추정할 수 있다.

2.3 연구방법

추적자를 이용하여 산소수 주입 경로를 확인하고 산소수에 의한 철·망간 제거 효과를 평가하기 위한 현장시험은 산소수 수직 주입정, 양수정인 방사형 집수정 수평관, 지상의 수직 관측정으로 구성되어 수행하였다(그림 2). 산소수 주입 현장시험의 시험 시설 배치를 위해 핵심적으로 고려해야 하는 요소는 방사형 집수정의 수평관 배치이다. 수평관은 총 7개로(#1 ~ #8, #2 부재) 12시 방향을 기준으로 각 45°씩 시계방향으로 회전하면서 설치되어 있으며, 설치심도는 EL.-2.0 m이다. 수평관의 길이는 퇴적층 분포에 따라 차이가 있는데, #4 수평관은 30 m, #6 수평관은 70 m이며, 나머지 수평관은 50 m이다. 수평관 스크린의 직경은 200 mm이며, #6 수평관에 대해서는 150 mm의 스크린을 적용하였다. 산소수 주입을 위한 수직 주입정은 #8 수평관에서 좌우로 6~10 m 가량 이격되어 10개소(HIW-1 ~ HIW-10)가 설치되었으며, 구경은 내경 150 mm, 외경 300 mm로 하였다. 수직 주입정의 심도는 지표 고도에 따라 7~12 m로 각기 다르나 최종 심도는 모두 EL.-4.0 m가 되도록 하였다. 모든 수직 주입정의 스크린 구간은 수평 집수관의 심도를 고려하여 EL.-4.0 m ~ EL.0 m에

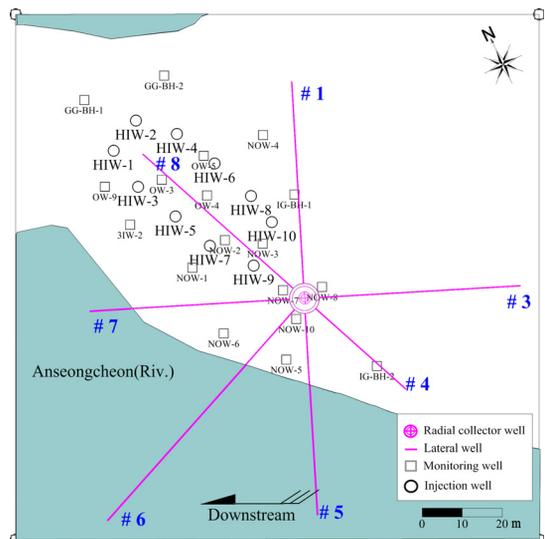


Fig. 2. Location of the radial collector well, laterals, injection wells and monitoring wells.

Table 2. Injection rate, injection volume and dissolved tracer concentrations of injection water.

	Injection rate (m ³ /day)	Injection volume (m ³)	Uranine concentration (mg/L)
Oxygenated water	1,100	550	0
Tracer water	35	17.5	101.14
Total	1,135	567.5	(3.12)*

*The average tracer concentration of mixed water in injection well.

설치되었다. 양수정으로는 방사형 집수정의 7개의 모든 수평관을 개방하여 이용하였다. 관측정은 방사형 집수정 수평관과 수직 주입정의 위치를 고려하여 기존의 조사공 및 신규 설치 관정 등 17개소를 선정하여 이용하였는데, 다수의 관측정은 #8 수평관 주변에 위치한다.

산소수 주입시험에 이용될 수 있는 추적자는 비반응성(또는 보존성)물질이어야 하며, 대표적으로 음이온(브롬, 염소 등)과 형광물질(Rhodamine WT, fluorescein sodium 등)이 고려될 수 있다. 그런데 음이온 추적자는 나트륨, 칼륨 등의 양이온이 염형태로 함께 포함되어 산소수 주입에 의한 철·망간 지중체 제거 과정에 간섭을 일으킬 수 있으므로, 낮은 농도로 이용가능한 형광물질을 추적자로 사용하는 것이 적합하다. 본 연구에서는 형광물질 중에서 흡착에 의한 영향이 적은 것으로 알려진 플루오레세인나트륨(Fluorescein sodium, 통칭 우라닌(uranine))을 추적자로 사용하였다. 우라닌은 녹색의 형광물질로 직접적인 광분해성은 큰 편이나 직사광선의 영향이 없는 지하수 추적자 시험에는 문제가 없으며(Houben, 2004), 염료 중 생물학적으로 안전한 물질이고 흡착 및 반응성이 낮아 하천변 충적층에서의 사용에 적합하다(Lee *et al.*, 2007).

연구 지역에서는 추적자를 이용한 금번 현장 철·망간 저감시험 이전에도 방사형 집수정 주변 지하수의 철·망간 제거를 위하여 산소수 주입시험을 수행하였으며, 저감 효과를 고려해 주입단계(injection step), 정지단계(rest step), 양수단계(extraction step)를 한 회차(cycle)로 구성하여 반복 수행한 바 있다. 금번 추적자를 이용한 산소수 주입시험에서도 이전 시험과 동일하게 주입-정지-양수의 3단계로 현장시험을 수행하였다. 이전과 차이점은 추적자 및 주입 산소수의 확산 범위를 파악하기 위하여 양수단계를 장시간 진행하면서 양수정(수평관) 및 관측정에서 추적자와 지하수질 변화를 모니터링하였다. 추적자를 이용한 산소수 주입시험은 12시간의 산소수 및 추적자 주입단

계, 6시간의 정지단계, 이후 약 수십일간의 양수단계로 2016년 3월 23일에서 5월 12일까지 50일간 수행되었다. 우선 주입단계에서 산소수 및 추적자의 주입은 방사형 집수정에서 양수가 없는 조건에서 #8 수평관 주변의 10개 수직주입정(HIW-1 ~ HIW-10)을 이용하여 수행되었다. 산소수는 10개 주입정에서 지표면 수준의 자연압으로 12시간 동안 전체 550m³을 주입하였다. 주입 산소수는 안성천 상류방향 300 m지점에 있는 동일한 대수층에 설치된 관정에서 양수한 물을 이용하여 제조하였는데, Fe²⁺와 Mn²⁺ 이온의 배경농도는 각각 0.1 mg/L, 1.0 mg/L이며, 산소용해기를 이용하여 제조된 주입수의 DO는 26 ~ 28 mg/L이다. 추적자 용액은 산소수와 별도로 제조하여 10개 수직주입정에 산소수를 주입할 때 함께 주입하여 희석시키는 방식으로 주입하였다. 12시간동안 주입된 추적자용액의 부피는 17.5 m³, 추적자인 우라닌의 총량은 1.77 kg으로 추적자용액의 농도는 약 101 mg/L이며, 주입 산소수에 희석된 우라닌 추적자의 농도는 3,120 µg/L이다(표 2). 정지단계는 주입단계 종료 시점부터 양수단계 시작 전까지 인위적인 지하수 흐름을 발생시키지 않고 6시간 동안 진행되었다. 이 단계를 통하여 주입 산소수는 대수층 내에서 느리게 확산되면서 철·망간 이온과 화학적 반응이 이루어진다. 양수단계의 양수는 방사형 집수정 내 펌프를 이용하여 집수정 수위를 자연수위에서 5 m 가량 하강된 EL. -1.0 m의 안정수위로 유지하면서 수행되었다. 양수단계에서 방사형 집수정을 이용한 전체 양수율은 약 6,000 m³/day이다. 이때 개별 수평관에 집수정으로 배출되는 지하수량의 비율은 일정하지 않으나 안성천 방향으로 길이가 가장 긴 #6 수평관이 약 34%로 최대이며, 수직주입정이 위치한 #8 수평관은 약 12%를 차지한다.

산소수와 우라닌 추적자 주입에 의한 철·망간의 저감 효과와 추적자의 확산을 관측하기 위하여 시험초기인 주입단계부터 17개 관측정에서 지하수 시료를 채취하여 수질을 측정하였으며, 방사형 집수정 수평

관 8개소(개별 수평관 7개, 혼합수)에서는 양수단계에서 지하수 시료를 채취하여 수질을 측정하였다. 지하수 수질 측정은 주입단계부터 양수단계 초기까지는 지점에 따라 1~6시간 간격으로 수행하였으며, 양수시작 3일 이후는 시간 경과에 따라 측정 간격을 늘리고, 관측점 지점을 줄여 수행하였다. 수질 측정을 위한 지하수 시료는 정량이송펌프(peristaltic pump)를 이용하여 채취하였으며, 채취 즉시 현장에서 현장수질 매개변수, 용해상 철·망간 이온농도, 우라닌 농도를 측정하였다. 현장수질 매개변수인 수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(ORP), 용존산소량(DO)은 휴대용 측정기(D-74&75, Horiba사)를 이용하여 측정하였으며, 용존 상태의 Fe^{2+} 와 Mn^{2+} 는 휴대용분광광도계(DR-2800, Hach사), 형광추적자인 우라닌은 현장형광계(10-AU-005-CE Field Fluorometer, Turner Designs사)를 이용하여 측정하였다.

3. 산소수 및 추적자 주입시험 결과

3.1 공간적 농도분포 변화

산소수 주입에 의한 철·망간 이온의 지중 저감 시험에서 중요한 요소는 대수층에 주입한 산소수에 의한 산화 영역(zone) 형성이며, 형성된 산화 영역의 크기는 철·망간의 지중 저감 규모와 직접적으로 관련될 수 있다. 그러나 대수층에 주입된 산소수는 확산과정에서 지하수와 반응을 겪어 영향 범위를 정확하게 파악하기 어려우므로 비반응성 추적자인 우라닌을 함께 주입하여 산소수 주입수의 확산 범위 및 변동경향을 파악하였다. 그림 3~6은 관측점에서의 용존산소(DO), 추적자(우라닌), Fe^{2+} , Mn^{2+} 의 농도분포 및 시간에 따른 변화를 나타낸 것이며, 각 그림에서는 시험전(a), 주입단계(b), 양수시작 1시간(c), 양수 30시간 경과(d), 양수 5일 경과(e), 양수 50일 경과(f)를 순차적으로 나타내었다. 농도분포 작성시

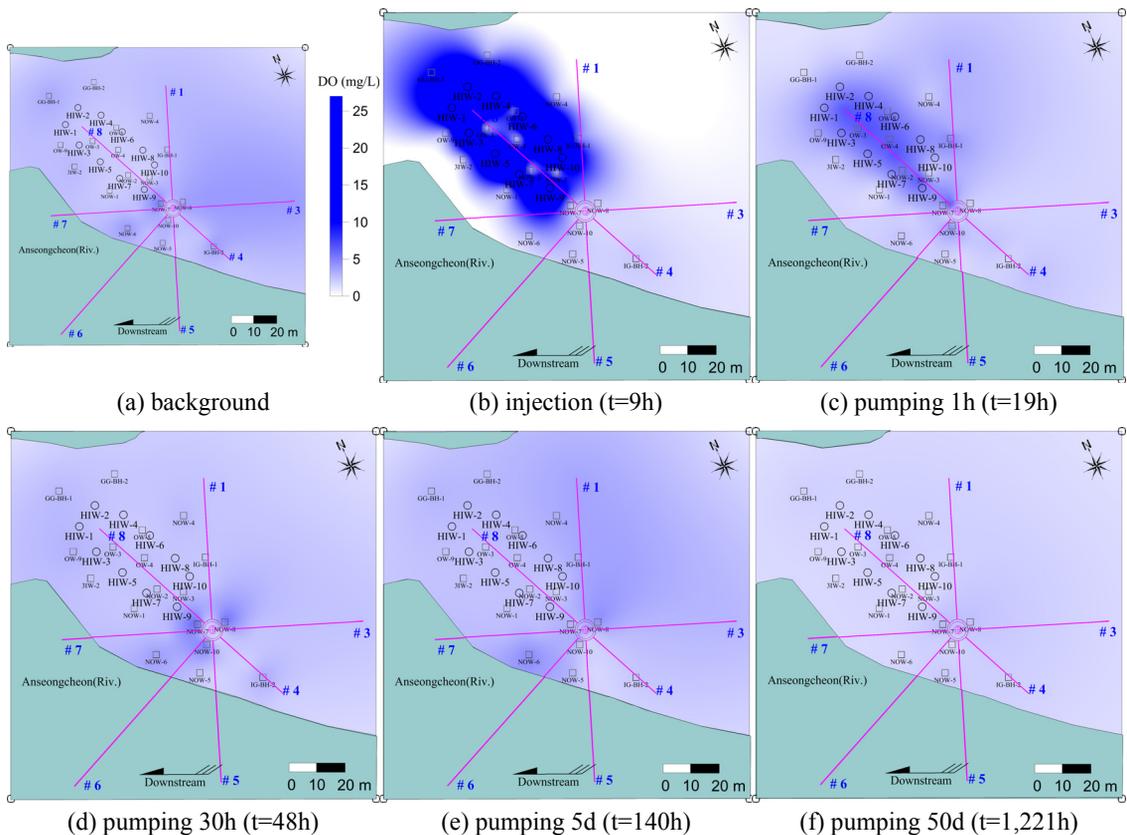


Fig. 3. Distribution of DO concentration during the injection test of oxygenated water. (a) background, (b) injection (t=9h), (c) pumping 1h (t=19h), (d) pumping 30h (t=48h), (e) pumping 5d (t=140h), (f) pumping 50d (t=1,221h).

수평집수관에서 측정된 농도를 함께 이용하였으며, 주입단계에서는 주입정의 농도를 함께 이용하여 도시하였다. 그림 3은 DO 농도분포를 도시한 것인데, 주입시(b)와 양수초기(c)에는 산소수 주입에 의한 산화영역의 형성이 잘 나타나지만, 양수 30시간 경과시(d)부터는 배경상태와 차이가 잘 나타나지 않는다. 그림 4는 추적자인 우라닌의 농도 분포를 도시한 것인데, 양수 초기(c)에는 양수에 의해 북쪽으로 확산이 나타나며, 양수 5일 경과시(e)에는 양수에 의해 북쪽 농도가 낮아지고 서쪽 안성천으로의 확산이 확인된다. 또한 양수 50일 경과시(f)에도 주입정 부근에 낮은 농도로 잔존이 확인된다. 용존산소의 농도 분포(그림 3)는 배경농도 및 대수층 내의 반응 등으로 확산 범이나 변동경향의 확인이 어려우나 우라닌의 농도분포(그림 4)는 주입 산소수에 의한 영향 범위를 잘 나타내 준다. 그림 5는 Fe^{2+} 의 농도분포를 도시한 것인데, 주입시(b)에는 주입수의 영향으로

농도가 낮아지나, 양수초기(c, d)에는 배경(a)과 유사한 농도를 나타내다가, 양수 5일 경과시(e)에 주입정 주변으로 넓게 Fe^{2+} 농도의 저감이 확인되며, 이후 초기와 유사하게 회복된다. 그림 6은 Mn^{2+} 의 농도분포를 도시한 것으로 Fe^{2+} 와는 달리 산소수 주입 및 양수에 따라 농도분포가 불규칙하게 감소 또는 증가하는 변동을 나타낸다. 그런데 주입정 주변으로 넓게 Fe^{2+} 농도의 저감이 확인된 양수 5일 경과시(e)에는 북쪽에서 Mn^{2+} 농도의 저감이 확인된다.

3.2 시간에 따른 농도 변화

그림 7은 전체 시험기간 동안 지하수 시료를 채취하여 농도를 측정한 관측정 중에서 추적자인 우라닌의 농도가 비교적 높게 나타난 주요 관측정의 DO, 우라닌, Fe^{2+} 과 Mn^{2+} 의 농도변화를 도시한 것이다. OW-3과 NOW-2 관측정은 방사형 집수정 수평관 #8에 인접하여 위치하며, NOW-8 관측정은 전체 산

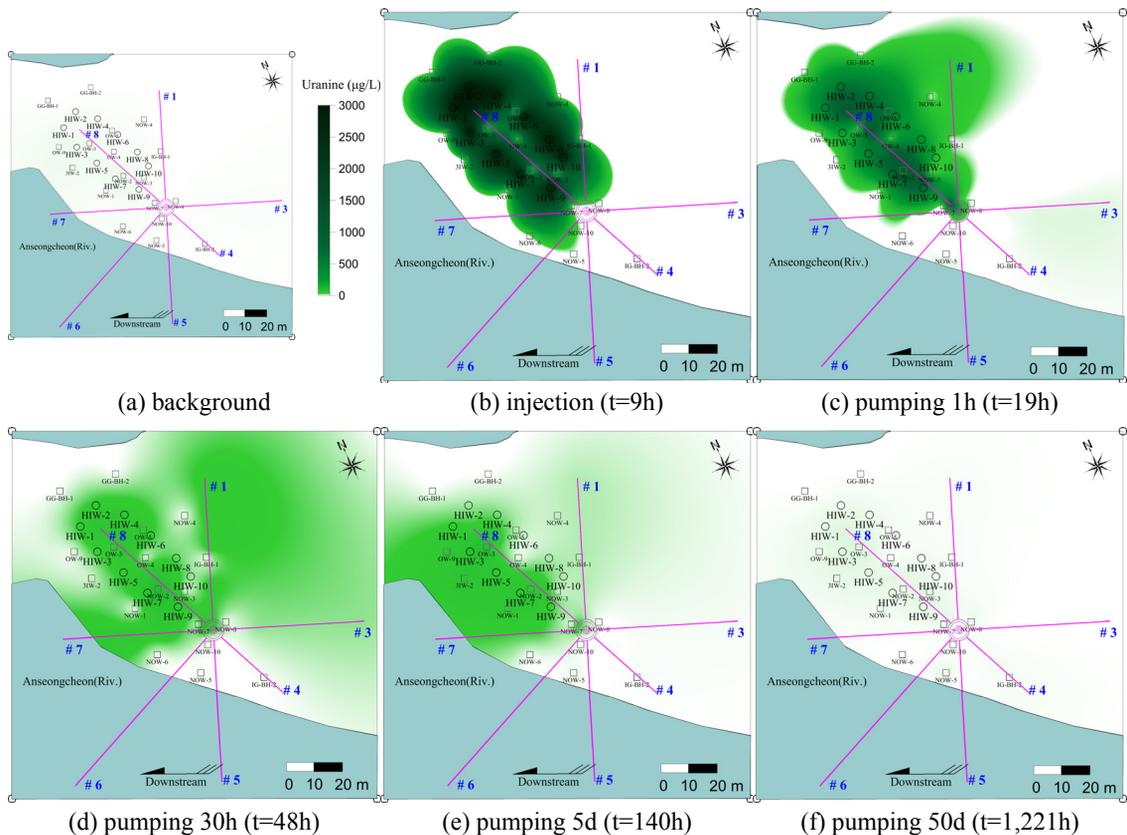


Fig. 4. Distribution of uranine concentration during the injection test of oxygenated water. (a) background, (b) injection (t=9h), (c) pumping 1h (t=19h), (d) pumping 30h (t=48h), (e) pumping 5d (t=140h), (f) pumping 50d (t=1,221h).

소수 주입정의 동남쪽인 방사형 집수정 인근에 위치한다. 우라닌과 DO 농도변화에서 특징적인 것인 우라닌 농도 최고점이 먼저 나타나고 DO 농도의 최고점이 지연되어 나타나는 것이다. 산소수 주입정에서 거리가 먼 NOW-8 관측정에서는 지연현상이 보다 뚜렷하게 확인된다. 우라닌 농도는 최고농도를 나타낸 후 급격하게 하강하는 반면, DO 농도의 하강은 다소 느린 것처럼 나타나는 데, 이는 DO의 배경농도의 영향으로 추정된다. 한편 수평관 #8에 인접한 OW-3과 NOW-2 관측정의 Fe²⁺ 농도는 우라닌과 DO의 농도가 최고점을 나타낸 후 수십 시간 이상 경과 후에 저감된 농도를 나타내었다. NOW-8 관측정은 Fe²⁺ 농도의 배경값이 낮아 오히려 상승과 이후 하강이 반복되는 형태를 나타내었다. Mn²⁺의 농도는 관측정 OW-3에서 장기적으로 상승후 하강의 추세를 나타내었는데, 산소수 주입의 영향 여부를 판단하기 어렵다. 산소수 주입을 통한 철·망간의 지중 저감기술은

방사형 집수정에서 채취되는 강변여과수 원수의 수질을 개선하기 위한 것이므로 양수되는 지하수의 Fe²⁺과 Mn²⁺의 농도저감이 무엇보다 중요하다. 그림 8은 양수단계에서 방사형 집수정의 개별 수평관에서 채취한 지하수 시료의 DO, 우라닌, Fe²⁺과 Mn²⁺의 농도변화를 나타낸 것이다. 먼저 추적자인 우라닌의 농도변화를 살펴보면, 수평관 #8은 10개 주입정 중간에 위치하여 최고농도가 1,000 µg/L 이상으로 매우 높게 나타나는 반면, 수평관 #6은 안성천 방향으로 설치되어 최고농도가 2 µg/L 미만으로 낮게 나타났다. 그런데 흥미로운 점은 절대농도의 큰 차이에도 불구하고 양수초기에 최고농도를 나타내고 급격한 하강을 나타내는 양상은 동일하다. DO 농도의 주입정 인근의 수평관 #8과 #1에서 비교적 뚜렷하게 나타났는데, 최고농도의 시점은 우라닌과 동일하거나 약간 늦게 나타났다. Fe²⁺ 농도는 우라닌과 DO의 최고농도가 도달한 후 수십시간 뒤에 나타나서 10일이

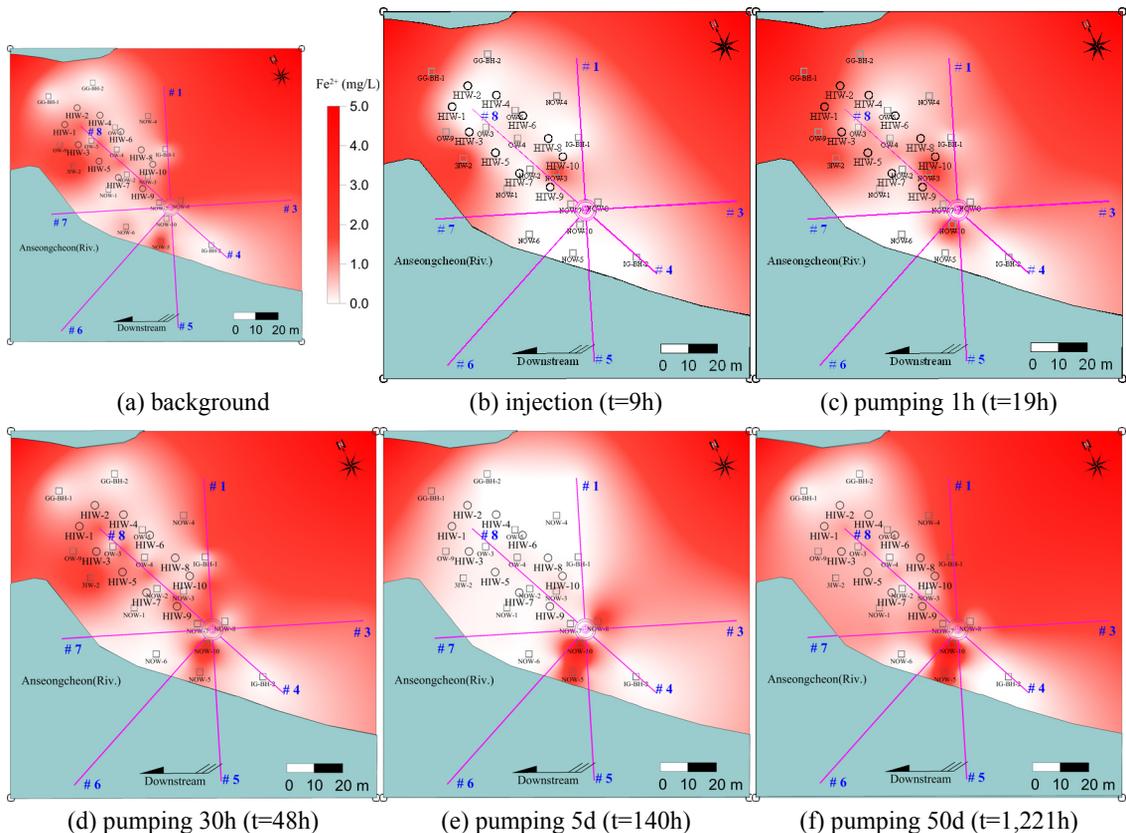


Fig. 5. Distribution of Fe²⁺ concentration during the injection test of oxygenated water. (a) background, (b) injection (t=9h), (c) pumping 1h (t=19h), (d) pumping 30h (t=48h), (e) pumping 5d (t=140h), (f) pumping 50d (t=1,221h).

상 뚜렷한 농도 저감을 나타낸 후에 장기적으로 상승하는 경향을 나타냈었는데, 주입정과 가까운 수평관 #1에서 상대적으로 반응이 빠르고 수평관 #3에서 반응이 느리게 나타났다. 주입정 중앙의 수평관 #8에서는 Fe^{2+} 농도 저감이 빠르고 가장 오랜 기간 유지되었다. Mn^{2+} 농도는 주입정과 가까운 수평관 #1과 #8에서 Fe^{2+} 농도와 유사한 저감 형태를 나타내었으나, 변동폭 또는 저감 지속시간이 상대적으로 작게 나타났다. 수평관 #6에서는 양수초기 우라닌의 상승이 확인되었으나, 농도가 낮아 DO 농도의 상승이 산소수의 영향인지 하천수 유입 영향인지 판단하기 어려우며, Fe^{2+} 농도의 저감 형태 또한 영향요인의 판단이 어렵다.

4. 시험결과 해석 및 고찰

4.1 주입 산소수의 이동경로와 영향범위 추정

방사형 집수정의 수평관 #8의 주변에 설치된 수

직 주입정을 통하여 산소수의 영향범위를 평가하기 위하여 그림 9에 DO 및 우라닌의 최고농도와 Fe^{2+} 및 Mn^{2+} 의 최저농도의 공간적인 분포도를 도시하였다. 농도분포도 작성시 주입정에서의 농도는 제외하였다. DO의 최고농도 분포도는 주입 산소수의 DO가 26~28 mg/L로 높음에도 일부 지점을 제외하고는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 반면 우라닌의 최고농도 분포도는 수평관 #6 부근을 제외하고는 방사형 집수정의 대부분의 영역으로 확산되었으며, 주입정 부근에서는 높은 농도를 나타내었다. Fe^{2+} 의 최저농도값의 분포도는 우라닌의 분포와 유사한 형태를 나타내었다. 흥미로운 점은 수평관 #6 부근에서 Fe^{2+} 의 농도가 높게 나타나는 것으로 DO의 농도가 상대적으로 높은 데도 불구하고 Fe^{2+} 의 농도가 높다. Mn^{2+} 의 최저농도 분포도는 일부 지점을 제외하고 Fe^{2+} 의 분포도와 유사하지만 경향이 뚜렷하지는 않다. 수직 주입정을 통하여 주입된 산소수가 방사형

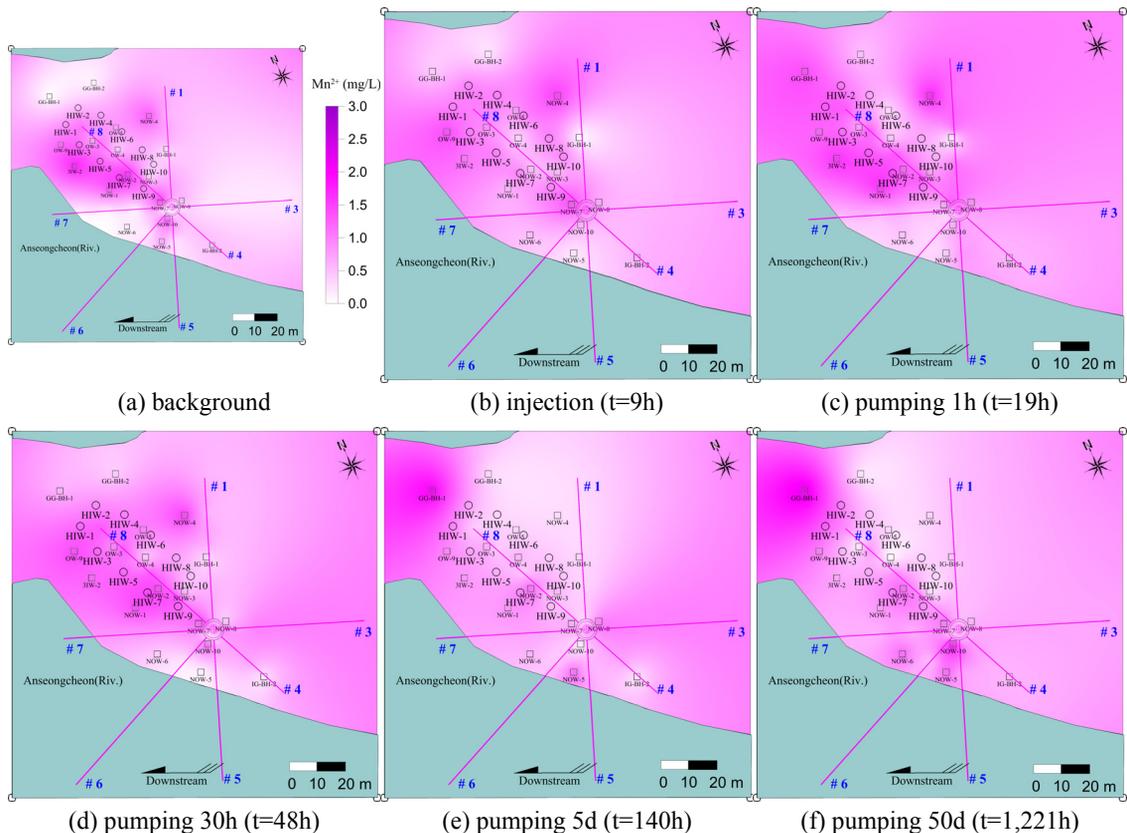


Fig. 6. Distribution of Mn^{2+} concentration during the injection test of oxygenated water. (a) background, (b) injection (t=9h), (c) pumping 1h (t=19h), (d) pumping 30h (t=48h), (e) pumping 5d (t=140h), (f) pumping 50d (t=1,221h).

집수정의 양수에 의하여 이동·확산하는 경로는 그림 4의 우라닌 농도 분포의 변화와 그림 8의 수평관에서 우라닌 및 Fe^{2+} 의 농도의 변화를 통하여 추정될 수 있다. 산소수는 주입단계 및 정지단계에서 수직 주입정을 중심으로 지하수위가 상승하여 방사상으로 확산되며, 양수단계에서는 수평관 쪽으로 지하수 배출됨에 따라 수평되어 이동하게 된다. 주입정에서 확산된 산소수는 중앙부의 수평관 #8 방향으로 먼저 이동하나, 보다 멀리 확산된 산소수는 주변의 수평관 #1, #7로 확산되는 것이 그림 4의 (c)~(e)의 우라닌 분포에서 확인된다. 수평관 #1로의 확산이 빠른 이유는 수평관 #1의 취수량이 수평관 #7의 취수량보다 크기 때문으로 판단된다. 한편 우라닌 분포

도에는 잘 나타나지 않으나, 그림 8의 (b)의 Fe^{2+} 의 농도변화를 통하여 수평관 #3방향으로 산소수의 영향이 느리게 확산되었음을 추정할 수 있다.

4.2 주입 추적자의 회수율과 철·망간 저감 효율 평가

산소수 주입에 의하여 방사형 집수정에서 취수되는 지하수에서 철·망간 저감 효율을 평가하기 위하여 주입 추적자의 회수율과 목표 철농도 이하의 취수량(양수량)을 평가하였다. 주입 산소수의 DO는 지하수내 Fe^{2+} 등과 반응하여 저감되기 때문에 DO의 농도 분포로는 주입 산소수의 영향범위를 파악하기 어렵다. 상대적으로 비반응성 물질인 추적자의 회수율을 계산하여 산소수 주입 정지 후 방사형집수

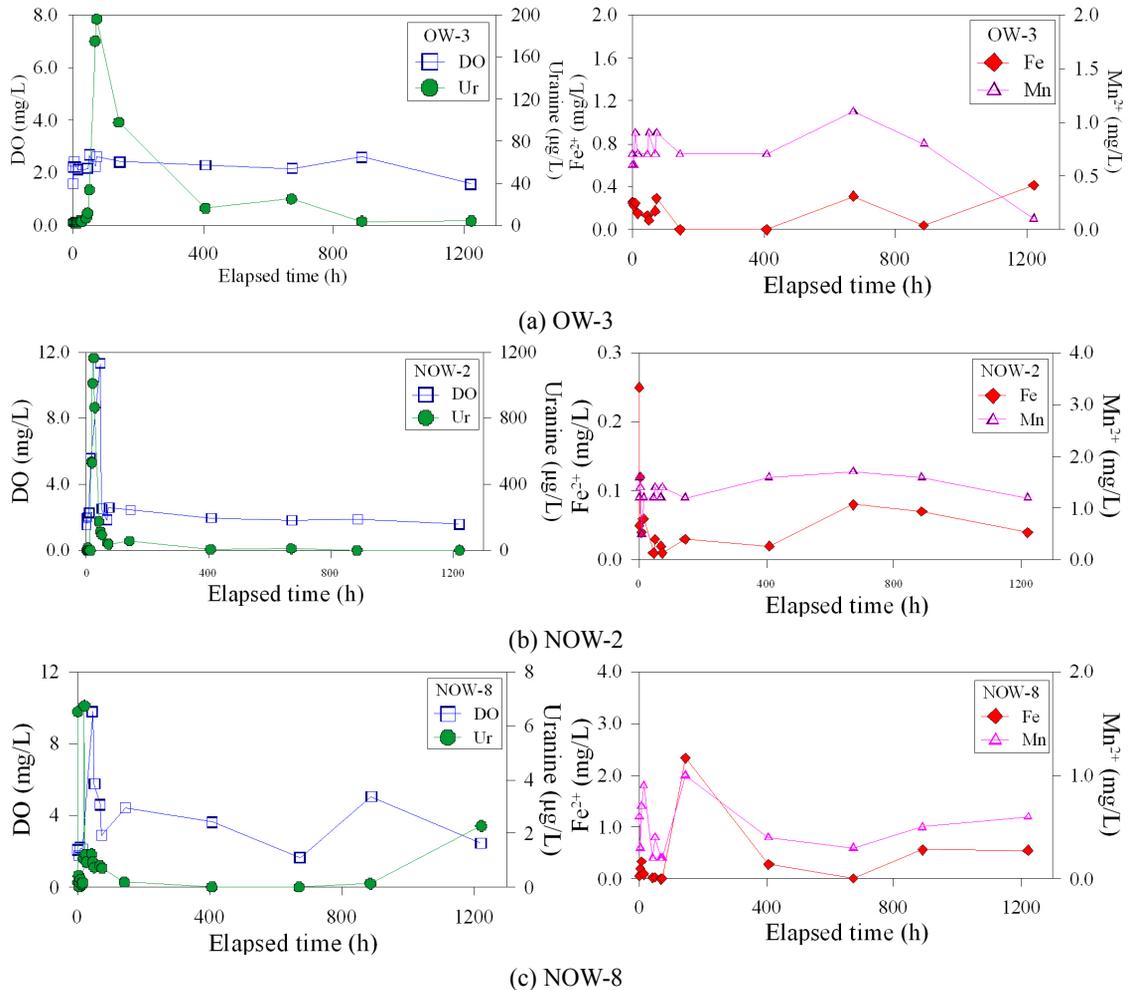


Fig. 7. Temporal variation of DO, uranine, Fe^{2+} and Mn^{2+} concentrations in observation wells. (a) OW-3, (b) NOW-2, (c) NOW-8.

정의 양수에 따른 지하수흐름 경로를 감안한 주입 산소수의 이동경로를 평가할 수 있다. 방사형 집수 정으로 회수되는 우라늄 양은 양수량과 우라늄 농도를 이용하여 계산하였다. 그림 10은 개별 수평관과

전체 혼합수에서 측정된 우라늄 농도를 이용하여 계산한 누적 회수량과 회수율을 나타낸 것이다. 양수 시작 후 35일간 회수된 전체 우라늄의 질량은 865 g이며, 전체 주입된 우라늄의 질량은 1,770 g이므로

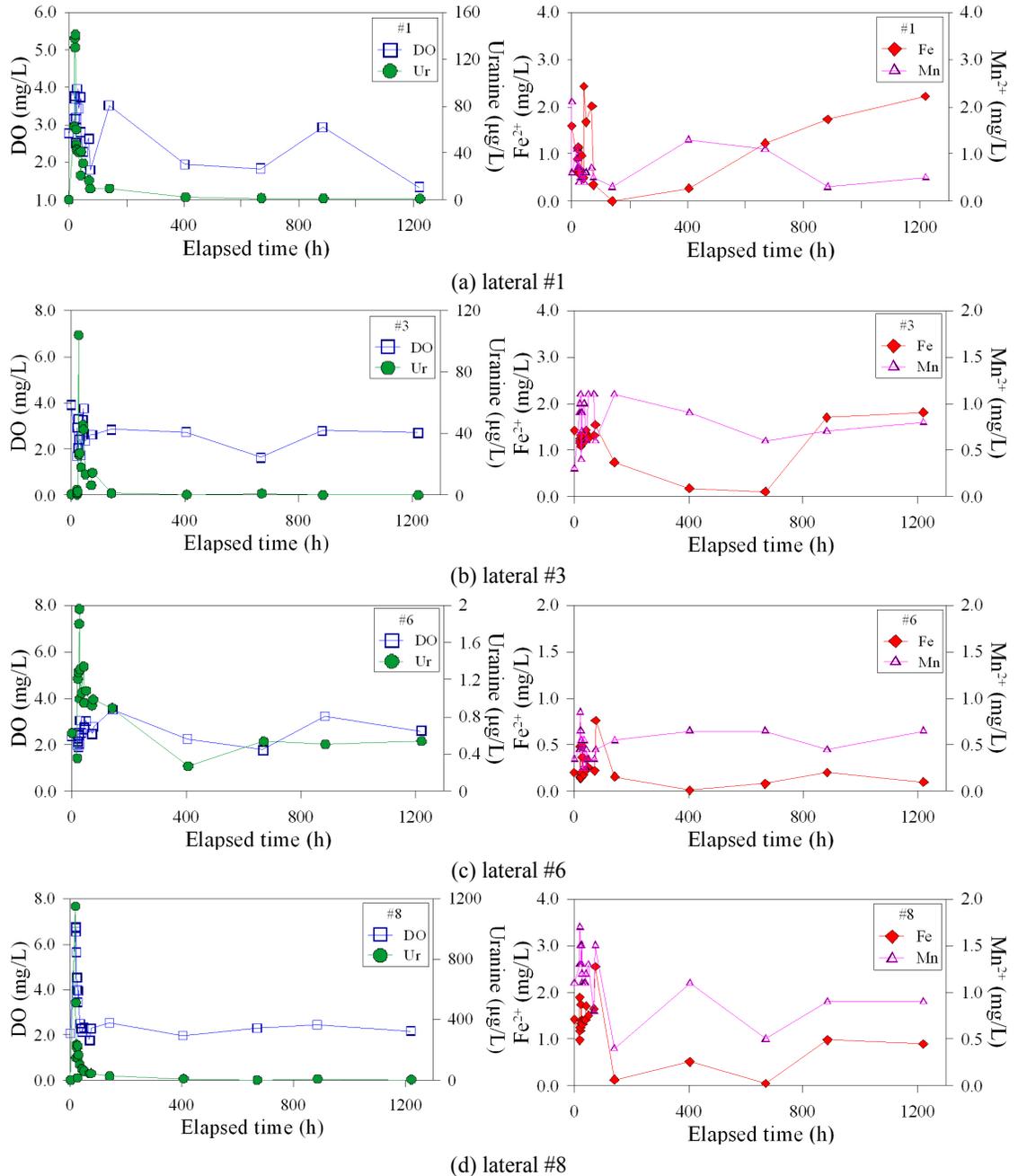


Fig. 8. Temporal variation of DO, uranine, Fe²⁺ and Mn²⁺ concentrations in laterals of the radial collector well. (a) lateral #1, (b) lateral #3, (c) lateral #6, (d) lateral #8.

누적 회수율은 48.9%이다. 개별 수평관으로 보면 #8에서 회수된 우라늄의 52.9%인 464 g이 회수되었으

며, 인접한 수평관 #1과 #7에서 21.9%와 12.8%가 회수되어 대부분 인접한 수평관을 통하여 회수된 것

Table 3. Efficiency ratio of Fe²⁺ treatment by oxygenated water injection.

	Initial concentration of Fe ²⁺ (mg/L)	Extracted water volume to 0.3 mg/L of Fe ²⁺ (m ³)	Water volume affected by oxygenated water injection (m ³)	Efficiency ratio (V _{out} /V _{in})
#1	1.59	11,305	11,305	19.9
#3	1.42	2,806	2,806	5.0
#4	0.22	25,703	-	-
#5	0.42	4,160	-	-
#6	0.20	52,791	-	-
#7	0.20	1,245	-	-
#8	1.42	4,834	4,834	8.5
Sum		102,844	18,945	33.4

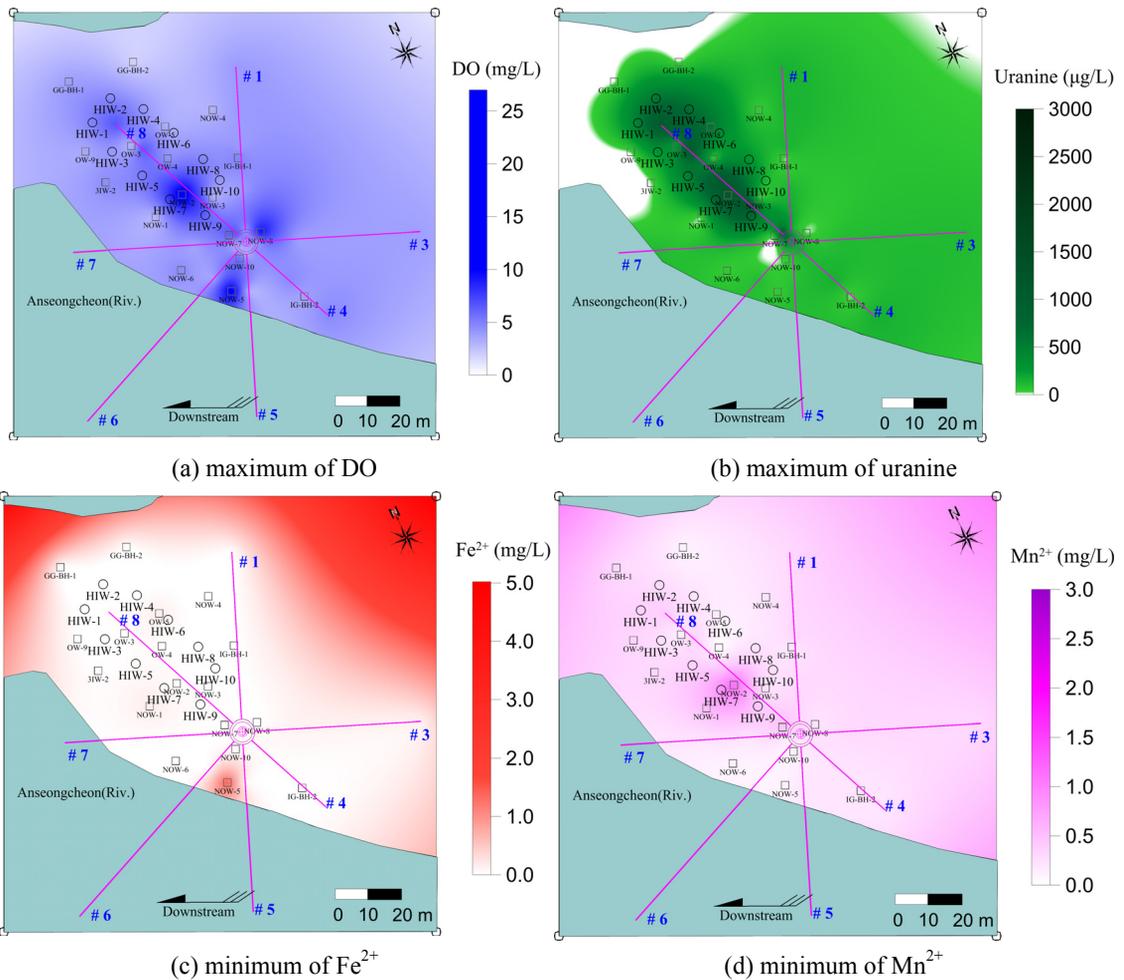


Fig. 9. Distribution of maximum or minimum concentrations during the injection test of oxygenated water. (a) maximum of DO, (b) maximum of Uranine, (c) minimum of Fe²⁺, (d) minimum of Mn²⁺.

으로 나타났으며, 나머지 수평관에서도 추적자가 작은 비율로 회수되었다.

한편 산소수 주입에 의한 철·망간 제거 시스템의 효율(efficiency ratio)을 평가하기 위하여 철의 먹는 물 수질기준인 0.3 mg/L 이하의 상태로 누적된 양수량(V_{out})을 계산하였으며, 이를 산소수의 총 주입량(V_{in})으로 나누어 효율을 평가하였다(Yi *et al.*, 2015; 표 3). 방사형 집수정의 모든 수평관에서 수질기준에 적합하게 양수된 양은 102,844 m³으로 계산되었으나, 이전 산소수 주입시험의 영향으로 추적자 주입 시점에서 수평관 #4 ~ #7은 Fe²⁺의 초기농도가 수질기준보다 낮거나 비슷한 수준이기 때문에 산소수 주입에 의한 시스템 효율 평가에서 제외하였다. Fe²⁺의 초기농도가 1 mg/L 이상인 수평관 #1, #3, #8에서 수질기준에 적합하게 양수된 양만을 계산하면 18,945 m³이며, 산소수 주입량으로 나누면 효율은 33.4로 평가된다. 이러한 결과는 산소수 주입에 의한 철·망간 지중 제거가 단순히 산소와 Fe²⁺간의 산화작용이 아니라 산화영역이 만들어짐에 따라 전체 방사형 집수정 영역으로 확대되어 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

5. 결론 및 토의

산소수 내의 산소는 지하수 내의 Fe²⁺와 반응하면

서 저감하기 때문에 산소의 농도 분포만으로는 주입한 산소수의 이동경로를 파악하기 어려우며, 산소수 주입에 따른 철/망간의 제거 효과도 정량화하기 어렵다. 본 연구에서는 추적자를 산소수와 함께 주입하여 산소수의 이동경로를 추적자를 이용하여 파악하였다.

지하수내 산소농도는 주입정 인근의 수평관 #1과 #7에는 영향을 주는 것으로 나타나지만, 반대 쪽에 위치한 수평관 #3, #4, #5에서의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 반면 추적자로 사용한 우라늄은 수평관 #6과 같이 소량 유입된 경우도 있지만 전체 수평관에 유입이 되었으며, 수평관에서의 Fe²⁺의 제거에 영향을 준 것으로 파악되었다.

Fe²⁺의 농도가 상대적으로 높았던 수평관 #1, #3, #7, #8에서 산소수의 주입으로 인하여 먹는물 수질기준인 0.3 mg/L까지 크게 낮아졌고, Fe²⁺의 농도가 낮았던 수평관에서도 Fe²⁺의 저감이 나타났기 때문에 방사형 집수정 내로 들어오는 각 수평관의 전체 혼합수의 Fe²⁺ 농도 역시 먹는물 수질기준까지 낮아질 수 있었으며, 이후 양수를 계속하면서 다시 증가하였다. 반면 Mn²⁺의 경우는 Fe²⁺와 같이 뚜렷한 저감이 나타나지는 않았으나, 저감 경향은 나타나고 있다.

주입한 우라늄의 방사형 집수정에서의 회수율은 약 48.9%로 주입한 추적자의 절반 이상이 대수층에 흡착되어 잔존되어 있거나 지하수 흐름방향을 따라

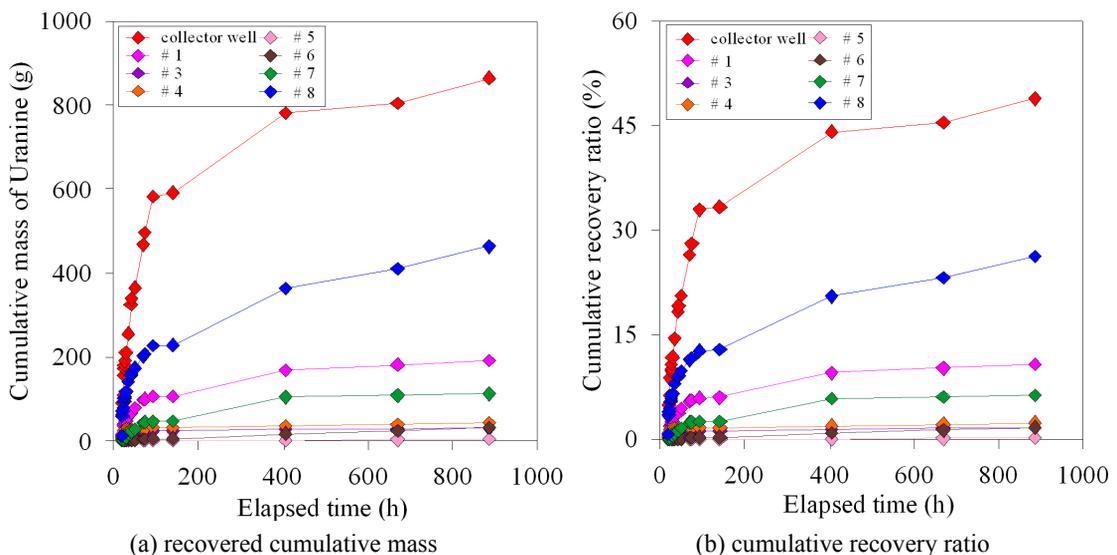


Fig. 10. Recovered cumulative mass and recovery ratio of injected Uranine. (a) recovered cumulative mass, (b) cumulative recovery ratio.

외부로 이동한 것으로 판단된다. 특히 주입정 위치에 가까운 수평관 #1, #7, #8에서 대부분의 추적자가 회수된 것으로 나타나 주입정 위치에 따른 편중이 나타났다. 방사형 집수정은 수평관의 연장길이가 길기 때문에 지층의 수평적 연결성이 유지되지 않을 수 있으며, 이에 따라 주입 효율이 달라질 수 있다. 따라서 주입정의 위치와 주입량 등을 현장 지층특성을 고려하여 설계해야 하며, 산소수의 주입 효율을 높이기 위해 주입시 선택적인 수평관 개방 등 인위적인 양수를 통해서 지하수 흐름을 제어할 필요도 있다.

본 연구를 통하여 대용량 취수가 가능한 방사형 집수정에서도 철/망간 지중제거 기술을 적용할 수 있음을 보였으며, 적용된 기술을 통하여 간접여과수 내 철/망간을 제거하기 위한 직접 처리공정 또는 전처리공정으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

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

REFERENCES

- Appelo, C.A.J. and de Vet, W.W.J.M., 2003, Modeling in situ iron removal from groundwater with trace elements such as As. p381-401. *In* Welch, A.H. and Stollenwerk, K.G. (eds) Arsenic in groundwater, Boston, Kluwer Academic, Boston.
- Hallberg, R. O. and Martinell, R., 1976, Vredox - 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.
- Kang, D.H., Chung, S.Y. and Kim, B.W., 2006, The Characteristics of Hydrodynamic Dispersion in a Horizontally Heterogeneous Fractured Rock Through Single Well Injection Withdrawal Tracer Tests. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 11(6), 53-60 (in Korean with English abstract).
- Kang, D.H., Shim, B.O., Kwon, B.H. and Kim, I.K., 2007, The Scale-Dependent Dispersion Through Convergent Flow Tracer Tests in Alluvial Aquifer with High Permeability at the Ttaan isle, Gimhae City. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12(6), 17-25 (in Korean with English abstract).
- Kang, D.H., Yang, S.I., Kim, T.Y., Kim, S.S. and Chung, S.Y., 2008, Hydrodynamic Dispersion Characteristics of Multi-soil Layer from a Field Tracer Test and Laboratory Column Experiments. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13(4), 1-7 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.A., Kim, Y.C., Yeo, I.W. and Ko, K.S., 2014, An Experimental Study of the Effect of the Test-well Arrangement on the Partitioning Interwell Tracer Test for the Estimation of the NAPL Saturation. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 19(3), 111-122 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.H., Choi, W.C. and Chang, T.W., 1980, Geological report of the Pyeongtaeg sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 31 p (in Korean with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Kim, G.B., Lee, J.W. and Lee, M.J., 2015, Estimation of Drilling Velocity for Horizontal Wells Based on Alluvial Sediment Characteristics. *The Journal of Engineering Geology*, 25(2), 273-280 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B. and Lee, M.J., 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*, 49(5), 579-586 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Cheon J.Y., Lee, K.K., Lee, M.Y. and Yun, J.K., 2001, A study on tracer transport in a shallow porous aquifer. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37(2), 309-316 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Hwang, H.T., Yi, M.J., Kim, Y.C. and Yum, B.W., 2007, Feasibility of Granular Activated Charcoal as a Detector in Fluorescent Tracer Tests. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12(4), 83-90 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Kim, J.W., Cheon, J.Y., Yi, M.J. and Lee, K.K., 2003, Combined performance of pumping and tracer tests: a case study. *Geosciences Journal*, 7(3), 237-241.
- 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 with English abstract).
- Rott, U. and Meyerhoff, R., 1994, Physical, chemical and biological processes in consequence of in-situ treatment of groundwater. *Groundwater Quality Management*;

- Tallinn. IAHS, 439-447.
- Silveria, L., 1988, Groundwater, Volume III "In situ" groundwater treatment, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Available at; <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E2-09-08-05.pdf>
- Teutsch, N., Gunten, U.V., Porcelli, D., Cirpka, O.A. and Halliday, A.N., 2005, Adsorption as a cause for iron isotope fractionation in reduced groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(17), 4175-4185.
- van der Laan, H., 2008, Modeling subsurface iron removal - application of a geochemical model to describe subsurface aeration at pumping station Schuwacht. Additional MSc thesis, Delft Univ. of Technology, Delft, Netherlands, 91 p.
- 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.
- Yi, M.J., 2016, In situ iron and manganese removal from groundwater. Ph.D. thesis, Kangwon National Univ., Wonju, Korea, 166 p (in Korean with English abstract).
- Yi, M.J., Cha, J.H., Jang, H.J. Ahn, H.S., Hahn, C. and Kim, Y.S., 2015, In-situ iron-manganese removal by an oxygenated water injection-and-extraction technique in a riverbank filtration system. *The Journal of Engineering Geology*, 25(3), 339-347 (in Korean with English abstract).
- Yi, M.J., Lee, J.Y., Mok, J.G., Yeo, I.W., Lee, K.K., Park, Y.C., Ahn, K.H. and Won, J.H., 2007, Evaluation of groundwater contamination through abandoned wells by multiple tracer test. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43(2), 241-252 (in Korean with English abstract).

Received : June 1, 2016
 Revised : June 24, 2016
 Accepted : June 24, 2016