

강변여과수 개발지역 우물 개량시 철망간 저감 효과

김규범 · 김병우* · 신선호 · 박준형

한국수자원공사 K-water연구원 지하수 연구팀

Iron and Manganese Removal through Well Development at River Bank Filtration Site

Gyoo-Bum Kim, Byung-Woo Kim*, Seon-Ho Shin, and Joon-Hyeong Park

K-water Institute, KWATER

낙동강 주변에 위치한 일부 충적층에서의 철과 망간은 음용수 기준치(각각 0.3 mg/L)를 초과하고 있으며, 강변여과 취수 개발 및 이용을 제한하는 요인으로 나타나고 있다. 본 연구에서 사용된 서지블록 및 에어서징 기술은 자갈층에 충전된 슬라임을 제거함으로써 관정 주변의 투수성을 높일 뿐 만 아니라 대수층을 산화 환경으로 만들 수 있고, 대수층에서 생성된 철과 망간의 산화물들을 관정내로 빼낼 수 있는 방법이다. 이와 같이 서징에 따른 철과 망간의 제거효율을 검토한 결과, $Fe_{(total)}$ 및 Fe^{2+} 이온 농도는 서징 전과 비교하여 5~8배 및 5~9배 정도 줄어들었고, Mn^{2+} 이온농도는 약 10배의 저감 효과가 나타났으며, 철산화물(Fe_2O_3)은 약 1.2배, 망간산화물(MnO)은 약 1~1.2배 증가하였다. 이와 같이 대수층내 공기 주입을 통한 철과 망간 이온농도의 저감은 효과가 있는 것으로 나타나 향후 국내에서도 강변여과수의 철 망간 제거를 위하여 대수층내 직접 처리 기술의 도입이 필요한 것으로 평가되었다.

주요어 : 철, 망간, 서지블록, 에어서징, 강변여과수

Iron and manganese contents are usually over the limit of drinking water standard (0.3 mg/L) in unconsolidated aquifer of river bank filtration site in Nakdong river. Surge block and air surging techniques used in this study are useful tools to remove the slime within gravels and pebbles, to increase permeability of aquifer, to provide oxygen into aquifer, and to discharge iron and manganese oxides from a well. Surging activity brought about 5~8 and 5~9 times decreases in $Fe_{(total)}$ and Fe^{2+} contents, and also 10 times decrease in Mn^{2+} contents compared to non-surging condition, respectively. Additionally, iron oxide and manganese oxide increased up 1~1.2 times after surging. This result shows that air injection into the aquifer can help iron and manganese content decreased and in-situ treatment technology needs to be introduced in river bank filtration project in South Korea.

Key words : iron, manganese, surge block, air surging, river bank filtration

서 론

유럽에서는 대부분의 음용수는 충적대수층에 설치된 집수정으로부터 공급되고 있다. 이러한 수리 형태는 수요 지역과 가깝고, 대수층(천부 지하수)에 쉽게 접근할 수 있으며, 강변여과수에서 양질의 수질과 고양수율(High pumping rate)로 물량을 얻을 수 있는 장점이 있다. 강변여과수(RBF; River bank filtration)는 강변으로부터 침투

된 부유된 입자물질, 불활성 바이러스, 자연 유기물과 인위적인 유기 화합물 등을 충적층 내에서 제거함으로써 수질을 개선시킬 수 있을 뿐만 아니라 흡착, 생물분해, 질소화합물의 분리(Denitrification)와 같은 과정이 이루어진다(Schwarzenbach et al., 1983; Jacobs et al., 1988; Von Gunten et al., 1991, 1994; Bourg and Bertin, 1993; Doussan et al., 1997; Grischek et al., 1998; Bourg et al., 2002; Hiscock and Grisch, 2002; Ray et al.,

*Corresponding author: bwkim@kwater.or.kr

2002; Kedziorek and Bourg, 2009). 아울러, 강변여과수의 개발을 통한 수자원 공급은 하천에서의 간접취수 방식을 도입함으로써 저수지로부터의 직접 취수와 달리 댐건설 등에 따른 환경 영향을 최소화할 수 있다는 잇점도 갖고 있다. 국내의 경우 낙동강 주변 충적층내에는 암석 기원의 철망간 성분이 함유되어 있어 물의 맛, 색, 탁도, 수도 설비 및 관정 주변의 폐색(Clogging)으로 인한 관정 및 수증펌프의 성능 저하와 같은 문제점이 발생하게 된다.

이와 같이 상수원으로서의 주요 장애 요인이 되고 있는 철망간 처리의 효율성과 경제성을 제고하기 위하여 Vyredox 방법(대수층내에서 직접 처리하여 농도를 저하시키기 방법)이 오래전부터 유럽을 중심으로 개발되어 왔다. Fan Maogong (1988)는 대수층에 강제적인 산소 분사 주입방법을 이용하여 철 농도를 제거하는 방법을 적용하였다. Appelo et al. (1999)는 대수층내에 산소로 처리된 물(Oxygenated water)을 주입한 후 다시 양수하는 일련의 순환과정을 반복하여 용존 철 농도를 낮추는 방법을 사용하였다. Houben (2004)는 산소 처리된 물 또는 공기에 노출된 용존 산화물로 구성된 산화 퇴적물의 화학 모델링에 대한 연구를 수행하였다. Sharma et al. (2005)는 지하수 내의 용존 철을 제거하기 위해서는 지하수를 양수한 후 폭기(Aeration)를 통해 산화시킨 후 필터 과정 또는 모래를 이용하여 흡착 및 필터링하는 방식을 적용하였다. 그리고 Mettler et al. (2009)는 물리적 운동을 이용하여 산화물을 방해석 표면에 수착(Sorption)과 공침(Coprecipitation)시켜 처리하는 효과에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 창녕 길곡면 증산지역에서 우물개량에 적용된 서지블록과 에어서징시 수행된 철망간 농도 측정 값과 슬라임 시료 분석으로부터 철과 망간 제거 효율을 검토해 봄으로써, 서정기법에 의한 용존 철과 망간 제거 효율 연구를 수행하였다. 또한 서정에 의한 철과 망간 제거 기작과 이에 따른 주변 수질변화에 대하여 분석하였다.

지형 및 지질

본 연구 지역은 행정구역상으로 경상남도 창녕군 길곡면 증산리에 해당되며, 낙동강을 경계로 남측에 창원시와 함안군이 위치한다. 본 연구지역의 충적층은 동서 방향으로 약 4km, 남북 방향으로 약 2km의 크기로 분포하며, 수계 형태는 동서 방향의 낙동강에 길곡천, 마천천, 온정천이 북측에서 남측으로 유입되는 형상이다. 특히, 길곡천의 경우에 과거 항공사진에 따르면 상류의 상길 저수지로부터 약 3km 하류부에서 좁은 골짜기를 빠져 나

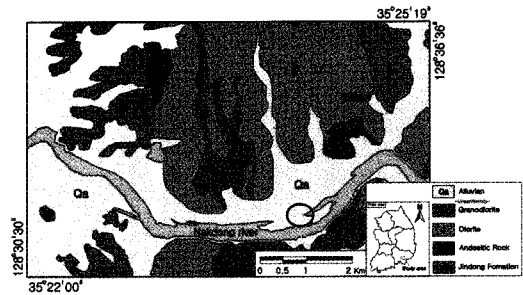


Fig. 1. Location of study area.

오면서 선상지를 형성한 후, 본류 충적층을 통과하여 낙동강으로 유입되었던 것으로 나타난다. 현재의 길곡천은 농수로 개보수에 의해 연구 대상 충적층을 우회하여 낙동강으로 유입하고 있다.

기존 지질 도폭(김남장과 이홍규, 1964)에 의하면 연구 대상 충적층의 기반암은 백악기 경상계 신리통의 진동층에 해당될 것으로 추정된다. 진동층은 주로 회색, 암회색, 암갈색의 세일, 일부 처어트질 암석 및 암회색의 아코스질 사암이 협재하는 형태를 갖고 있다(Fig. 1). 본 층은 층리의 발달이 우세하고 풍화에 약하여 낮은 구릉지 및 평지를 이룬다. 연구지역의 서측 배후 산지에서는 화강 섬록암이 관찰되며, 이는 진동층을 관입하고 있다.

현장 우물 설치시 수행된 시추조사자료에 따르면, 상부로부터 약 23 m 구간에는 실트질모래층이 존재하며, 그 하부에는 약 10 m 두께의 모래자갈층이 나타난다. 자갈층의 하부에는 풍화대가 존재하고 있다.

연구 방법 및 시료 분석

본 지역 충적층 지하수의 수질은 용존 철과 망간 농도에서 먹는 물 수질기준(0.3 mg/L)을 초과하고 있다. 유럽이나 미국에서는 철과 망간의 오염물을 제거하기 위하여 화학적 제거기법의 하나로 산소화된 물을 주입하여 관정 주변을 산화상태로 만들어 철과 망간을 제거하는 Vyredox의 기법을 이용하고 있다. 본 연구에서는 우물 개량 방법으로서 서지블록(Surge block) 및 에어서징(Air surging) 기법을 적용하여 관정 주변의 투수성 및 통기성을 높이고 산화상태를 제공함으로써 산소화된 물을 주입하는 효과를 발생시키는지 평가하고자 하였으며 이로부터 본 지역에서의 Vyredox 기법의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

본 시험을 위하여 양수정 1개소, 관측정 10개소가 굴착되었으며(Fig. 2), 양수정 1개소를 대상으로 약 16일간 총 16회(200년 4월 23일부터 5월 8일)에 걸쳐 서지블

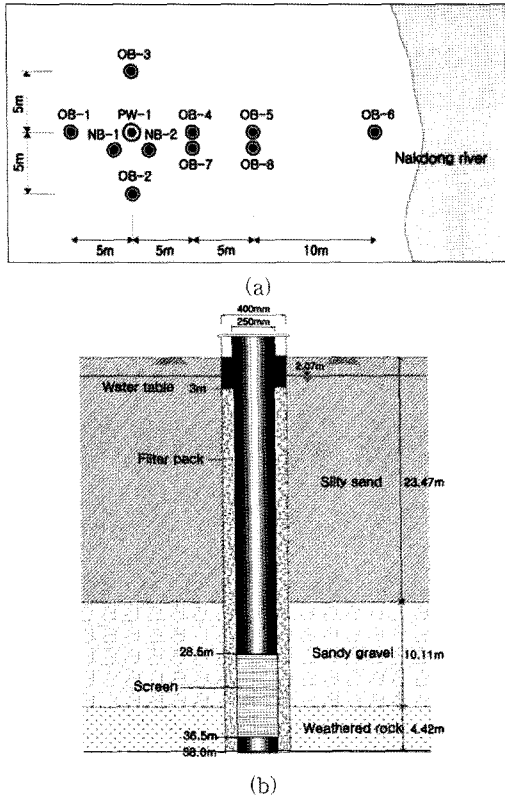


Fig. 2. Location of wells at study site (a) and a structure of pumping well (b).

목과 에어서징이 수행되었으며, 서지블록과 에어서징의 동시 시험은 6회부터 실시되었다. 서지블록은 Fig. 3(a)와 같이 블록을 상하로 이동시켜 관정 주변의 대수층내의 미립자를 제거하며, 그 후 공내에 침전된 슬라임 잔존물은 Fig. 3(b)와 같이 에어서징을 이용하여 밖으로 제거 시키도록 하였다. 이때 서지블록은 약 60분~100분간 지속적으로 수행하였으며 느린 속도로부터 빠른 속도로 변화를 주어 실시하였다. 그리고 침전된 슬라임 잔존물은 약 1시간에 걸쳐 에어서징을 통하여 밖으로 배출시켰으며, 서징시 양수정과 관측정에서 현장 수질분석과 수질 시료 채취를 실시하였다. 이 때 양수정에서는 수중모터펌프를 통하여 배출되는 물로부터 시료를 채취하였고, 관측정(OB-3, 6, NB-1, 2)에서는 배일러를 이용하였다. 이와 같이 채취된 시료는 ICP-OES (Perkin Elmer사의 Optima 5300DV) 및 IC (Dionex사의 DX-600)을 이용하여 양이온 및 음이온 분석을 실시하였다. 또한 서징에 따른 슬라임(산화물)을 채취하여 X-Ray 회절분석(XRD)과 XRF 분석으로 침전물의 광물조성 및 성분을 분석하였다. 에어서징에 의한 산소 분사로 슬라임을 밖으로 제거한 후에는, 최저로 내려간 양수관정내 지하수위가 지하 6m 심도까지 회복되는 과정의 회복시간과 수위를 측정하였다. 한편, 철망간은 산소와 반응성이 큰 이온이므로 전처리 과정에서 산화되기 쉽기 때문에 현장에서 이온상태로 존재하는 철망간의 용존된 농도를 분석하였다. 이와 같이 Fe^{2+} , $Fe_{(total)}$, Mn 에 대한

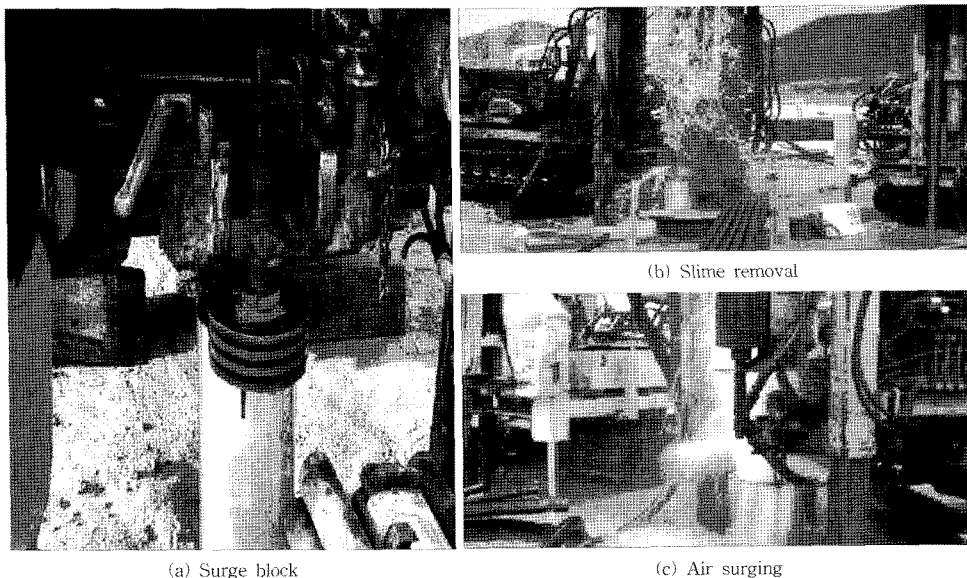


Fig. 3. Surging methods on well development.

현장 수질분석은 독일 Hach사의 DR-2800을 이용하였다.

슬라임(침전물)의 광물조성 및 주성분 원소를 측정하기 위하여 화학분석을 실시하였는데, 서지블록과 에어서징시 발생된 시료를 단계별로 획득하였다. X-선 회절분석은 네덜란드 PHILLIPS사의 X'Pert=MPD System(부경대학교 공동실험실습관)으로 Cu-K α 를 이용하였으며, 가속전압 40 kV 전류는 30 mA의 조건에서 분석되었다. X-선 회절분석은 입자가 작은 광물들을 식별하는데 효과적인 분석 방법으로, 슬라임 내의 침전물의 존재 형태를 파악하기 위하여 실시하였다. 주성분 원소 측정을 위하여 일본 SHIMADZU사의 XRF-1700기종의 X-선 분석을 실시하였으며 전압 40 kV, 전류 95 mA의 조건에서 수행되었다. X-선에 의해 각각의 원소들에서 발생하는 이차 형광 X-선을 분광시켜 검출되는 X-선의 파장과 강도에 따라 원소를 정성적 및 정량적으로 분석한다.

분석결과

우물 개량 및 지하화 특성

우물개량의 목적은 손상된 대수층을 재생시키거나 우물 효율을 회복시키는 것이다. 이를 통하여 우물 주변 대수층의 양호한 공극과 수리전도도를 형성하고 투수량계수를 개선하게 된다. 이와 같은 우물 개량은 다양한 입자로 구성된 미고결층 대수층내에서 물의 이동을 용이하도록 자연적인 자

갈층진력의 형성을 유도하고 우물개량시 주입되는 공기는 철과 망간을 산화물로 침전하는데 도움이 되는 환경을 형성하게 된다.

우물개량 방법으로서 서지블록을 실시하여 주변 대수층내 모래자갈층을 재배열한 후 공 바닥에 침전된 슬라임을 에어서징에 의하여 밖으로 제거하는 과정을 수행하였다. 에어서징 후 지하수위 회복 시간을 측정한 결과는 Table 1과 같다. 전체적으로 우물 개량 작업이 진행되면서 슬라임의 양이 줄어들고 지하수위 회복시간이 빨라지고 있음을 알 수 있다. 한편, 에어서징을 실시하는 기간 중

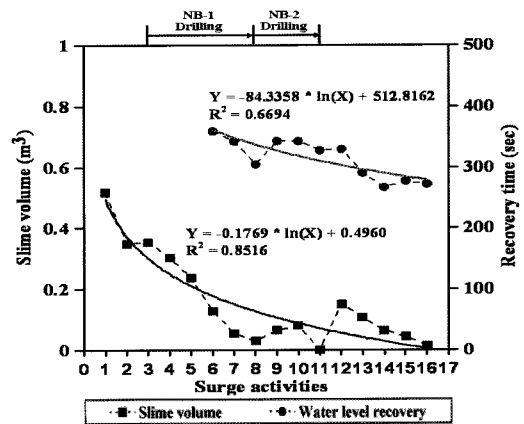


Fig. 4. Changes in slime and recovery time during well development.

Table 1. Slime and recovery time by surge block and air surging.

Activities	Date (mm-dd)	Total work time (min)	Surge block mode	After surge block		After air-surging	Note
				Slime thickness (cm)	Slime volume (m ³)	Water level Recovery time (sec)	
1	04-23	84.51	W	263.5	0.517	-	
2	04-24	84.51	W/P	177.6	0.349	-	
3	04-24	84.51	W/P	180.5	0.354	-	NB-1(D.B)
4	04-26	84.51	W/P	154.9	0.304	-	
5	04-26	84.51	W/P	121.1	0.238	-	
6	04-27	76.34	W	65.8	0.129	359	
7	04-28	76.34	W	28.6	0.056	343	
8	04-28	76.34	W	15.8	0.031	305	NB-1(D.C)
9	04-29	116.34	W	33.5	0.066	343	NB-2(D.B)
10	04-29	116.34	W	41.0	0.071	343	
11	04-29	100.00	W	0.0	0.000	328	NB-2(D.C)
12	04-30	76.34	W	77.5	0.152	330	
13	05-06	76.34	W	55.0	0.108	291	
14	05-06	76.34	W	33.0	0.065	267	
15	05-07	76.34	W	22.5	0.044	277	
16	05-08	76.34	W	7.0	0.014	272	

Remark) W: Winch, P: Pressure, D.B: Drilling beginning, D.C: Drilling completion

안에 양수관정 인근 2 m 이격 거리에서 2개의 관측정을 굴착(NB-1:4월24일 15:00~28일 18:00, NB-2:4월29일 05:00~30일 05:00)하였으며, 이 때 관측정 NB-2의 굴착으로 인한 지층의 교란으로 지하수위 회복시간이 느려지는 현상을 서정 9 및 10회에서 알 수 있다 (Fig. 4).

서정에 따른 지하수 수질변화를 분석하기 위하여 서정 7회(2009년 4월 28일)과 16회(5월 8일)에 각각 지하수 시료를 채수하였다. 서정 7회는 서정에 따른 수질변화 양상을 분석하기 위하여 양수정(PW-1)과 관측정 OB-1~8호정에서 시료 채취하였다. 서정 마지막 16회에는 양수정을 중심으로 OB-3, 6호정 그리고 NB-1, 2호정을 선정하여 수질을 분석하였다(Fig. 5). 본 지역 기반암은 셰일, 쳐어트질 암석 및 암회색의 아코스질 사암이 부분적으로 나타나고, 상부의 충적층은 실트질모래와 모래자갈층으로서 이들 2종류의 분포대에 속하는 지하수 수질의 유형을 Piper diagram에 도시하면 Fig. 5와 같다. 특히 주변 지하수 유입과 인근 낙동강으로부터 유입된 하천수는 다양한 경로로 공급됨으로서 Ca-HCO₃와 Ca-SO₄의 2가지 유형의 수질특성을 보인다. 이들 주성분은 지질학적 배경수질을 반영하는 Ca, Mg, HCO₃와 황화광물의 산화와 중금속의 용탈이동을 지시하는 SO₄ 이온 성분도 나타나고 있다(한원식 외, 2002). SO₄ 이온 성분은 황화광물의 산화가 Fe와 Mn의 산화환원반응에 직접적으로 영향을 미치거나 혼합된 상태로 나타나기도 한다. 이상 수질 분석결과를 해석 해보면 양수정(PW-1)에서는 Ca-HCO₃ 유형의 수질특성이 보이며, 관측정에서는 Ca-SO₄와 Ca-HCO₃ 유형으로 일반적인 충적 지

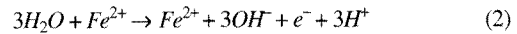
하수의 수질특성을 보이고 있다. 대수층의 지하수 수질은 Fe와 Mn이 다량 함유되어 있으나 서정 후에도 지하수의 주요 이온의 화학적 수질특성은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

철·망간 농도 변화

철과 망간의 에너지 변화에 대한 정량적인 척도는 산화환원전위(Redox potential)에 의해서 구해진다. 이와 같이 자연상태에 존재하는 철은 Fe²⁺와 Fe³⁺로 존재하며 Fe²⁺는 양이온 하나와 결합하면서 하나의 전자를 내놓는다. 자연 상태에서 Fe²⁺는 용존 상태로 존재하며 Fe³⁺는 불용성으로 쉽게 침전되어 철산화물 형태로 존재한다.



이와 같이 물속에 용존 상태로 존재하던 Fe²⁺는 전자를 하나 내놓으면서 Fe³⁺가 되어 수산화이온과 결합, 침전하여 수산화물을 만든다. 식 (2)는 전자농도에 Eh의 변화와 pH의 변화가 철의 화학반응에 중요한 변수로 작용하는 것을 알 수 있다. 또한 Eh와 pH의 변화에 따른 철의 용존 및 침전의 상변화로 나타날 수 있다 (Fig. 6, 7).



↓ ↓ ↓
Precipitated Eh pH
as brown
Fe(OH)₃

철의 경우 Fe²⁺와 Fe³⁺은 산소 또는 유황과 결합하여

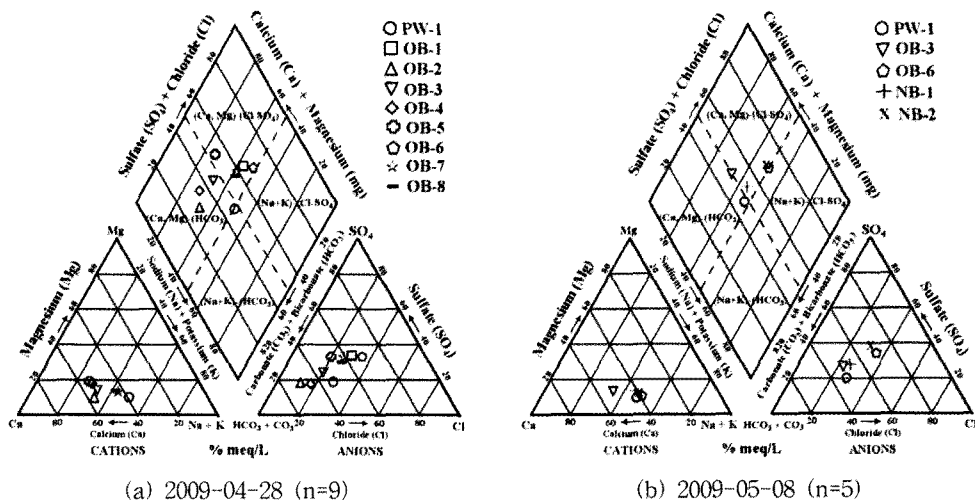


Fig. 5. Piper diagram showing groundwater type during surging.

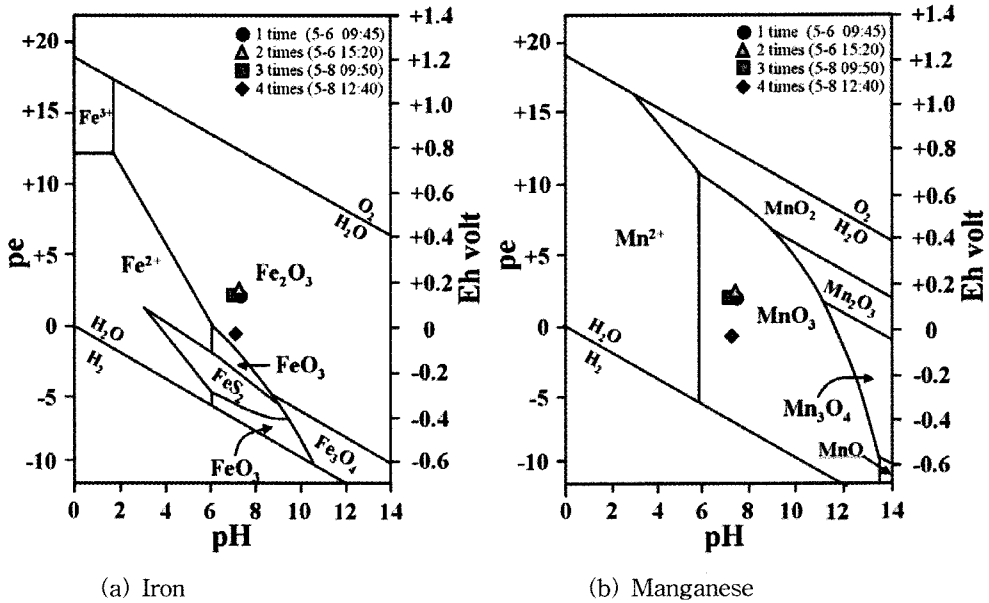


Fig. 6. Stability relation for iron and manganese with solid-solution boundaries in pumping well.

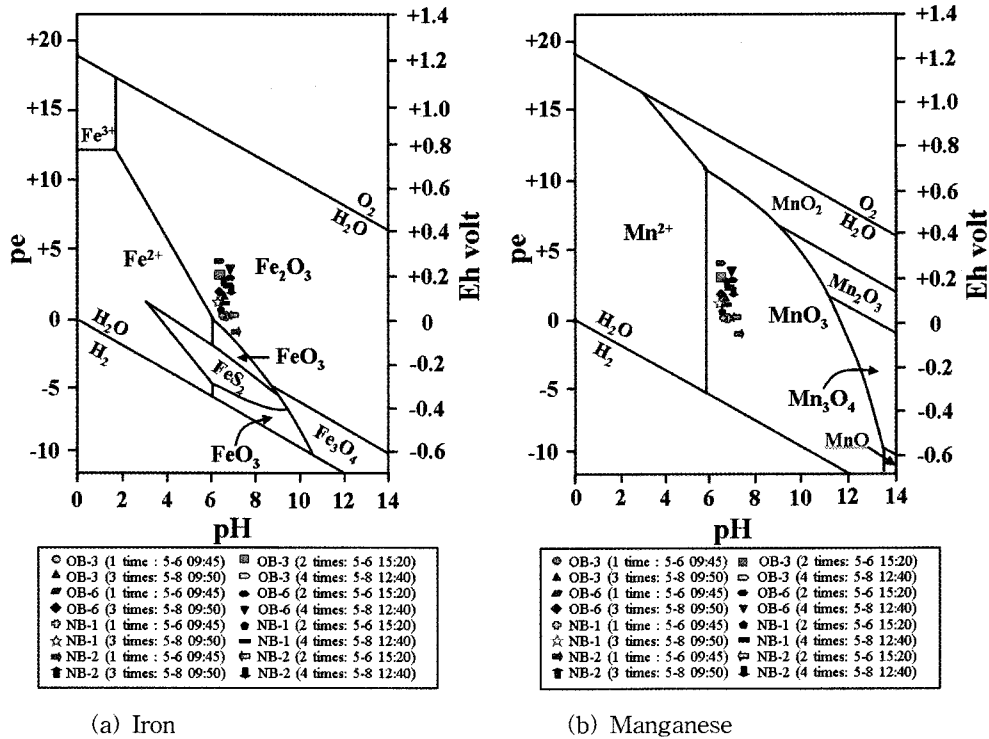
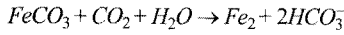


Fig. 7. Stability relation for iron and manganese with solid-solution boundaries in observation wells (OB-3, 6 and NB-1, 2).

산화물, 황화물, 수산화물 형태로 존재한다. 또한 토양과 광물속에 들어 있는 철은 주로 불용성인 산화제이철(Ferric

oxide)과 황화철(iron sulfide, pyrite: 황철광)로 나타난다. 지하수에는 상당량의 이산화탄소가 포함되어 있으므로

탄산칼슘과 탄산마그네슘이 용해되는 것과 같은 방식으로 탄산세일철도 다음에 의해 용해될 수 있다.



지질학적 환원조건하에 있는 망간은 산성용액에서 2가 망간 화합물(Manganous compounds)로 존재하고, pH가 8이 넘으면 Mn(OH)₂로 침전된다. 더욱 산화상태로 됨에 따라 망간 이온의 영역은 더욱 산성으로 향한다. 또 알카리성에서는 Mn(OH)₂는 계속해서 Mn₂O₄, MnOOH, 및 MnO₂의 순으로 치환이 일어난다. 산화도가 높으면 MnO₂는 모든 pH 영역에서 안정상으로 나타난다. 이와 같이 망간은 대부분 이산화망간(Manganese dioxide)으로 존재하며, 이것은 이산화탄소가 포함되어 있는 물에 아주 불용성으로서, 환원성 조건에서는 환원작용에 의하여 산화제이철과 마찬가지로 쉽게 용해된다.

양수정과 관측정에서 우물개량시 DR-2800을 이용하여 현장 측정된 철망간 농도 변화는 Table 2와 같다.

양수정에서의 분석 결과에 따르면, 서징 과정에서 철의 산화로 형성된 Fe³⁺는 Geothite(Fe₂O₃:FeOOH)의 수산화물로 존재하며, 서징 마지막 단계에서는 산소의 급증으로 산화-환원전위(Eh)가 낮아짐을 알 수 있다(Fig. 6(a)). 이는 산화 반응의 속도가 빠르지 않아 공급된 물속에서 잠시 동안 환원된 형태를 유지할 수 있기 때문이다. 산소공급에 의해 철이 Fe²⁺에서 Fe³⁺로 변환되면서 철산화물이 생성되고 박테리아들이 철산화물을 전자공여체로 사용하면서 빠른 속도로 증식하게 된다. 이렇게 증식된 철산화물은 일정한 수로 증가되면 산소부족에 의해 박테리아가 죽고 이들은 유기물이 되어 유기탄소를 생성하게 된다. 한편 망간은 산화될 때 유기탄소가 필요하게

되는데, 서징시 1-4회에 걸쳐 분석된 수질에서도 Mn²⁺는 불용성으로 쉽게 침전되어 MnCO₃의 수산화물로 생성된다. 서징 마지막 단계에서는 산소 공급 급증으로 산화-환원전위(Eh)가 낮아짐을 알 수 있다(Fig. 6(b)).

이와 함께, 양수정 주변 20m 이내에 위치한 4개의 관측정에서도 동일한 분석이 수행되었는데, Fig. 7과 같이 철은 2+에서 3+로 변환되면서 각각 Fe₂O₃의 철산화물로 생성되고, 그 이후 유기탄소에 의해 망간이 산화되는 것으로 나타났다.

양수정은 주변 관측공 OB-3, 6, NB-1, 2호정 보다 산소의 직접적인 주입 영향을 받기 때문에 OH⁻ 및 pH가 크게 증가된다. 이렇게 양수정과 관측공은 산소가 주입된 지하수에 의한 영향을 받기 때문에 철과 망간의 2+와 3+의 경계면이 형성된다. 또한 산소가 공급된 양수정으로부터 일정 거리(관측정)까지 철산화물의 생성으로 철에 의한 침전 영역이 형성된다. 철산화물의 생성으로 많은 수의 박테리아가 성장하고 박테리아 성장에 따른 산화물이 모두 소진되고 나면 박테리아가 죽어 유기물 형태로 남게 되며 이는 탄소공급원이 된다. 이러한 탄소의 공급은 망간 침전물을 만들어 소모되면서 망간 침전물에 의한 망간 침전지대가 생성된다(Hallberg and Martinell, 1976). 따라서, 관측정은 양수정에 비하여 산소 공급이 미미하여 그 효과가 저감되므로 양수정에 비하여 Fe²⁺과 Mn²⁺의 경계면에 가깝게 도시된다 (Fig. 6 및 Fig. 7).

철·망간 침전 작용

철과 망간 산화 기작은 침전여과(Floc filtration), 흡착 제거(Adsorptive removal) 그리고 생물학적 철 제거(Biological iron removal)으로 분류할 수 있다. 침전여과

Table 2. Iron and manganese contents during well development.

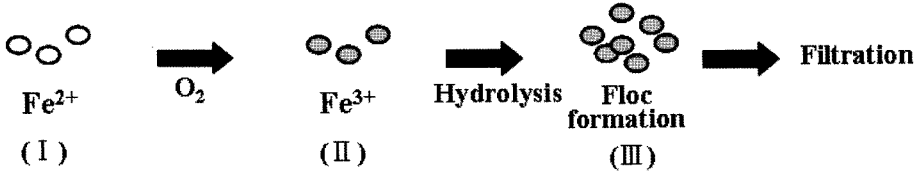
a) Iron (unit: mg/L)

Sampling	PW-1		OB-3		OB-6		NB-1		NB-2	
	Fe ²⁺	Fe _(total)	Fe ²⁺	Fe _(total)	Fe ²⁺	Fe _(total)	Fe ²⁺	Fe _(total)	Fe ²⁺	Fe _(total)
1st	0.34	5.88	2.40	13.8	0.02	0.64	2.95	9.8	0.09	0.29
2nd	0.12	2.71	0.03	0.18	0.03	0.21	2.62	4.08	0.14	2.72
3rd	0.11	1.25	0.95	1.30	0.06	0.18	1.65	2.91	0.13	0.14
4th	0.04	1.21	0.01	0.15	0.03	0.22	2.01	2.91	0.02	0.28

b) Manganese (unit: mg/L)

Sampling	PW-1	OB-3	OB-6	NB-1	NB-2
1st	1.0	3.4	0.2	2.4	1.0
2nd	0.1	1.4	0.4	2.7	0.5
3rd	1.1	2.6	0.3	3.1	1.0
4th	0.5	2.2	0.5	2.7	0.8

(a) Oxidation-floc formation mechanism



(b) Adsorption-oxidation mechanism

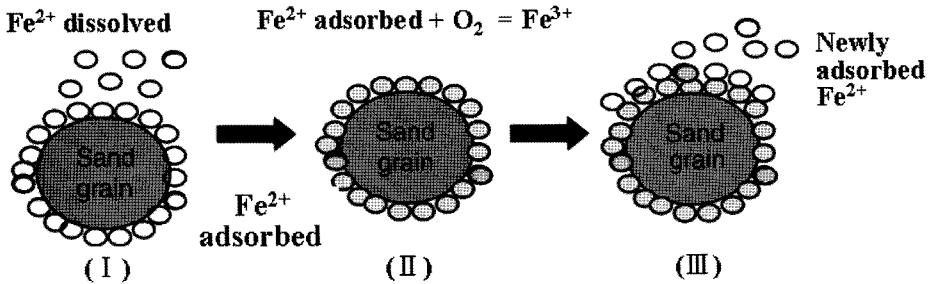


Fig. 8. Mechanism of floc filtration and adsorptive iron removal (Sharma, 2001).

기작은 Fig. 8(a)에서 보는바와 같이 지하수 속에는 Fe^{2+} 가 존재하며, 공기와 접촉한 Fe^{2+} 는 산화되어 Fe^{3+} 로 변화하게 된다. 이때 Fe^{3+} 은 물분자의 가수분해 반응에 의해 생성된 OH와 결합하여 침전물을 형성하게 된다. 흡착-산화 기작은 Fig 8(b)에서 보는 바와 같이 지하수 속에 용해된 Fe^{2+} 는 모래입자에 흡착되며, 이때 흡착된 Fe^{2+} 는 다시 공기와 접촉되어 Fe^{3+} 으로 존재하는 과정으로, 이러한 기작은 반복되어 새로운 침전물을 형성한다(Fig. 8(b)). 서정과정에서의 Fe와 Mn 이온의 침전 기작 및 작용을 파악하기 위하여 양수정에서의 서정시 침전된 슬라임의

광물조성 분석을 위하여 6회에 걸쳐 채취하고 분말 시료에 대하여 3~50° 2θ 구간에서 X-ray(XRD)로 분석하였다. 또한 슬라임에 함유된 광물의 결정구조를 분석하였으며, 이때 슬라임내 광물조성 비율은 1회 시료에서 석영, 조장석, 미사장석, 2회 시료분석에서는 석영, 조장석, 정장석, 백운모, 3-4회 시료분석에서는 석영, 조장석, 5-6회 시료에서는 석영, 조장석, 정장석의 순으로 나타났다(Fig. 9 및 Fig. 10). 여기에서 3회 이후는 Table 1의 12회차 이후 서정 기간 동안의 시료에 해당한다.

슬라임내 화학성분 전 함량은 X-선 형광분석기를 이용

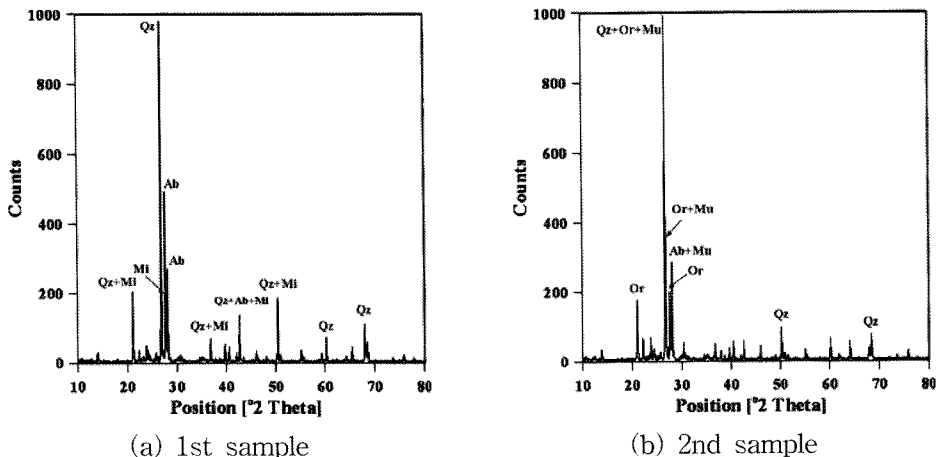


Fig. 9. Diffraction patterns of the slime analyzed by X-ray diffraction (XRD) at pumping well (PW-1): the peak positions are albite (Ab), microcline (Mi), muscovite (Mu), orthoclase (Or) and quartz (Qz)

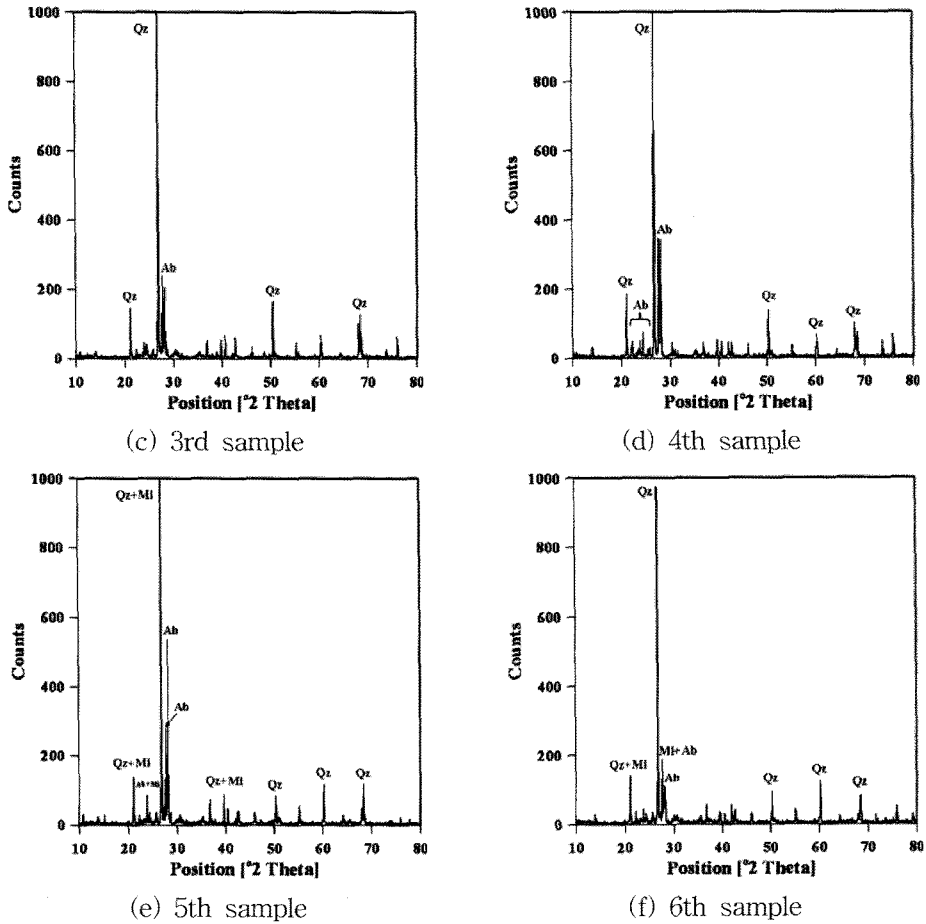


Fig. 9. Continued.



Fig. 10. Iron and manganese oxidate discharged around pumping well (Floc: black color).

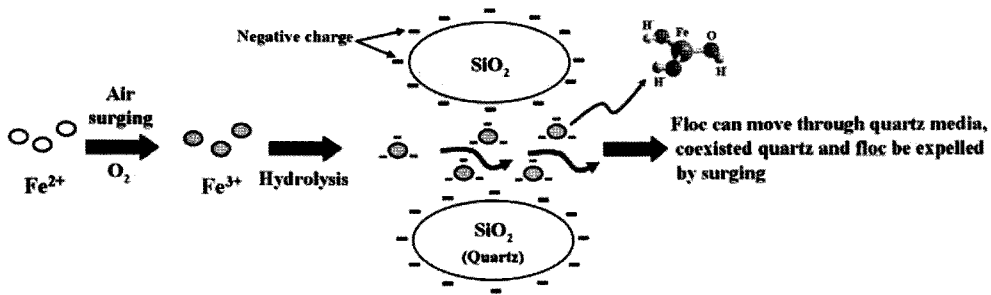
하였으며, 이에 대한 각 원소별 농도(%)는 Table 3에 정리하였다. 14개(SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, Fe₂O₃, CaO,

MgO, TiO₂, SO₃, P₂O₅, WO₃, MnO, SrO, ZrO₂)의 성분 중에 SiO₂와 Al₂O₃는 각각 79.1213~81.4345%, 9.7706~11.0110%의 범위로 매우 높게 나왔으며, 나머지 원소들은 5% 미만인 것으로 분석되었다. 그 중에서 철산화물(Fe₂O₃)와 망간산화물(MnO)는 각각 1.4046~1.7052%, 0.0330~0.0483%의 범위를 보였다. 전체적으로 슬라임의 조성 광물은 SiO₂가 매우 높게 나타났다.

이와같이 층적 대수층의 토양성분은 대부분 석영 및 장석계열의 세립질 토양으로 구성되어 있으며, Fe와 Mn의 이온 농도는 먹는 물 기준치를 초과하고 있다. 서징 과정을 통하여 주입된 산소는 Fe와 Mn이온농도 저감을 가져오는데, 산소와 접촉한 Fe²⁺는 산화되어 Fe³⁺로 변화하게 되고, Fe³⁺은 물분자의 가수분해 반응에 의해 생성된 OH와 결합하여 침전물을 형성한다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 본 지역 대수층은 석영 성분을 다량 함유한 매

Table 3. Total element content of the slime using X-ray fluorescence spectrometry (XRF) at pumping well (unit: %).

Component	1st sample ('09.04.27)	2nd sample ('09.04.30)	3rd sample ('09.05.06)	4th sample ('09.05.06)	5th sample ('09.05.07)	6th sample ('09.05.07)
SiO ₂	81.0279	79.1213	81.4345	81.2916	80.8110	79.3482
Al ₂ O ₃	10.1696	11.0110	10.0010	9.7706	10.1031	10.9893
K ₂ O	3.1882	3.3486	3.1600	3.2993	3.2499	3.3727
Na ₂ O	1.8826	2.0640	1.8483	1.8234	2.0089	2.2109
Fe ₂ O ₃	1.4461	1.6698	1.4046	1.4653	1.4929	1.7052
CaO	1.1795	1.2361	1.0928	1.1380	1.1997	1.1814
MgO	0.6429	0.8485	0.5715	0.6864	0.6092	0.7276
TiO ₂	0.2469	0.2918	0.2437	0.2934	0.2543	0.3271
SO ₃	N.D.	0.1579	0.0891	N.D.	N.D.	N.D.
P ₂ O ₅	0.0737	0.0987	N.D.	0.0914	0.0821	N.D.
WO ₃	0.0571	0.0646	0.0880	0.0695	0.1095	0.0675
MnO	0.0481	0.0483	0.0330	0.0349	0.0398	0.0349
SrO	0.0309	0.0314	0.0298	0.0290	0.0334	0.0351
ZrO ₂	0.0065	0.0079	0.0036	0.0072	0.0063	N.D.

**Fig. 11.** Mechanism of iron removal using air-surfing and surge block.

질로서 전체적으로 음전하를 띠며, Fe 이온 또한 산화반응에 의하여 음전하를 가지게 된다. 침전물과 석영은 서로 음전하를 띠기 때문에 흡착되지 않고 석영 고정상에 부유 및 안정적으로 통과하게 되거나 서징에 의해 일부 석영 입자와 함께 빠져 나온다. 이와 같이 우물개량 과정에서 Fe와 Mn 이온의 산화물로 형성되며, 조립질 토양에 의한 흡착제거 기작보다는 침전여과 기작에 의해 Fe와 Mn의 산화물이 생성되는 것으로 나타났다.

철·망간 저감 효과

2009년 4월 23일부터 5월 8일에 걸쳐 양수정에서 실시된 서지블록과 에어서징에 따른 철과 망간의 이온농도 변화 및 슬라임의 변화를 보기 위하여, 12회차 서징을 기준으로 이전과 이후 2차례에 나누어서 변화를 분석하였다. 아울러 서징에 따른 슬라임의 양, 수위 회복속도, 철과 망간 농도, 산화물로부터의 상관 관계 등의 경험식을 도출하였다 (Fig. 12).

서징에 따른 $Fe_{(total)}$ 농도는 1차 분석에서는 1.90 mg/L에서 0.24 mg/L로, 2차 분석에서는 5.88 mg/L에서 1.21 mg/L로 각각 7.92배 및 4.86배 줄어들었다. 그리고 Fe^{2+} 이온 농도는 1차 분석에서는 0.38 mg/L에서 0.08 mg/L로, 2차 분석에서는 0.37 mg/L에서 0.04 mg/L로 각각 4.75배 및 9.25배 줄어들었다 (Fig. 12(b)). Mn^{2+} 이온 농도의 경우 1차 분석에서는 0.90 mg/L에서 1.10 mg/L로 1.2배 증가하였으나 2차 분석에서는 1.00 mg/L에서 0.10 mg/L로 10배의 저감 효과를 보였다 (Fig. 12(c)). 전체적으로 서징 경과에 따른 철과 망간의 농도는 감소되었다.

반면에, 철과 망간의 산화반응에 의한 침전물은 슬라임에서 나타나는데, 철산화물(Fe_2O_3)의 경우 1차 분석에서 1.4461%에서 1.6698%로, 2차 분석에서는 1.4046%에서 1.7052%로 각각 1.15배 및 1.21배 증가하였다. 망간산화물(MnO)의 경우 1차 분석에서는 0.0481%에서 0.0483%로, 2차 분석에서는 0.0330%에서 0.0398%로, 각각 1.00 및 1.2배의 미미한 증가를 보였다.

결론 및 토의

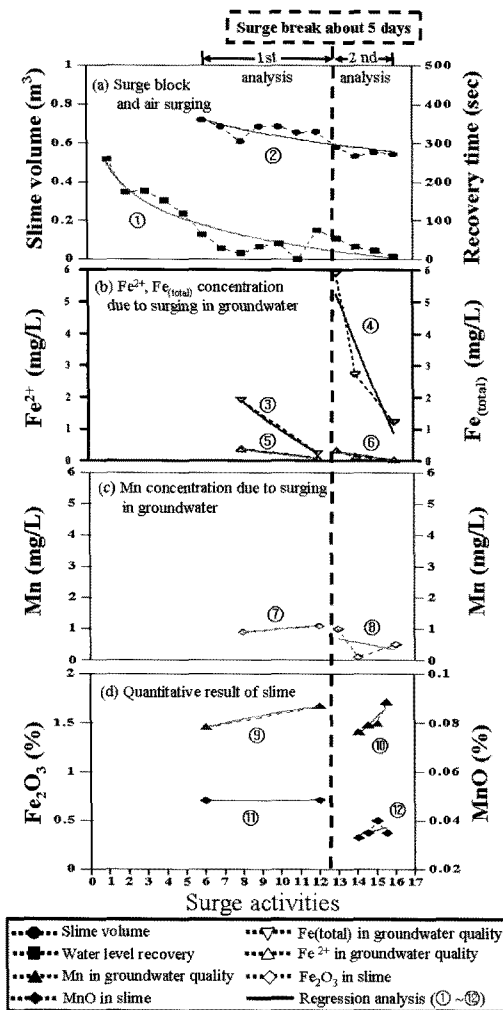


Fig. 12. Trends in iron and manganese contents in groundwater and slime during surge block and air surging.

이상 서징과정에서 서징블록의 횟수와 슬라임의 양 및 회복시간, 수질변화 그리고 산화물 양의 변화 등을 분석한 결과 서징에 따른 지하수 및 슬라임내의 철과 망간의 산화물 농도 등이 철망간 제거의 물리화학적 기작과 밀접한 관련이 있음이 확인된다. 따라서, 연구지역에서 본 지역 강변여과수의 개발에 앞서 우물의 형성시 보다 체계적인 우물개량(서징)은 철과 망간 농도의 저감을 가져올 수 있는 것으로 평가된다. 물론, 서징에 따른 수질분석 및 산화물 분석에서 많은 시료를 통한 연속 분석이다소 미흡하나, 서징에 따른 경과별 변화 경향에서 수질의 변화 및 침전물의 생성 반응을 어느 정도 파악하는 것이 가능하였다.

강변여과 취수지역에서의 지하수 개발 및 이용에 있어서 문제가 될 수 있는 수질 항목으로는 용존 철, 망간, 비소 등이 있다. 특히 철과 망간은 우물 개량시 서징에 의하여 그 농도가 줄어들고 화학적인 특성 변화가 나타남을 확인할 수 있었다. 서징에 따른 철과 망간의 물리화학적 환경은 공기 분사 횡수에 따라 크게 변화는 것으로 나타났다으며, 서징에 의한 슬라임에서도 철과 망간 산화물이 변화를 보이는 것으로 분석되었다. 대용량 충적층 우물의 개발시 우물개량 공법은 우물효율의 증가, 대수층의 투수량계수 증가, 대수층내에서 폐색(clogging) 및 산화물의 제거 효과 뿐 아니라 철과 망간의 제거 효율도 일부 갖는 것으로 나타나 일거양득의 기대효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 우물개량은 양수관정 주변의 양호한 공극과 수리전도도 영역을 형성하는 것으로, 우물의 기능을 향상시키는데 목적이 있다. 또한 다른 크기의 입자로 구성된 미고결층 대수층을 개량하여 자연적인 자갈 충전력의 형성을 유도할 수 있다. 이러한 작업은 서징과정에 산소로 포화된 물이 철과 망간을 산화물로 침전될 수 있도록 환경을 조성시키게 된다. 즉, 서지 블록과 에어 서징의 반복적인 과정은 미립질 슬라임의 효율적 제거 및 산소의 주기적인 주입이 가능하게 하며 이는 철과 망간을 저감시키는 효과를 가져온다.

2) 서징시 지하수의 화학적 특성 변화를 파악하고자 2차례 화학분석을 실시한 결과, 양수관정(PW-1)은 Ca-HCO₃ 유형, 관측정은 Ca-SO₄와 Ca-HCO₃유형으로서 일반적인 충적 지하수의 유형을 나타내어 서징에 따른 변화는 뚜렷하지 않다.

3) 수 일간의 서징 기간 동안 2차례에 걸친 지하수질 및 산화물의 변화를 분석한 결과, 농도는 약 5-8배, Fe²⁺ 이온은 약 5배-9배, Mn²⁺이온은 약 10배의 저감 효과가 나타났으며, 산화물로서 철산화물(Fe₂O₃)은 약 1.2배, 망간산화물(MnO)은 1.0배에서 1.2배 정도 증가되는 것으로 나타나 이온농도의 감소 및 산화물의 형성이 잘 나타나고 있다.

현재 철과 망간 이온에 대한 현장 제거 방법으로서 Vyredox 등이 유럽에서 활발히 적용되고 있어 국내에서의 적용성 검토가 필요한 시점이다. 본 연구를 통하여 철과 망간의 현장 제거 기작이 적용될 수 있음을 알 수 있었으며 추후 현장 실증을 통한 Vyredox 시스템의 개발은 수처리 비용을 절감할 수 있는 대안으로 가능할 것이라 본다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적인 확보기술개발사업단의 연구지원(과제번호: 3-4-3)에 의해 수행되었으며, 연구지원 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- 김남장, 이규홍, 1964, 한국지질도 영산도폭(1:50,000), 국립지질조사소.
- 한원식, 우남철, 이기철, 이광식, 2002, 무주지역 수질특성자료의 통계학적 분석에 의한 소유역 구분, 한국지하수토양환경학회, 7(3), 19-32.
- Appelo, C.A.J., Drever, B., Hekkenberg, R., and de Jonge, M., 1999, Modeling in situ iron removal from groundwater, *Ground Water*, 37, 811-817.
- Bourg, A.C.M., Bertin, C., 1994, Quantitative appraisal of biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer, *Environmental Science & Technology*, 27, 661-666.
- Bourg, A.C.M., Kedziorek, M.A.M., and Darmendrail, D., 2002, Organic matter as the driving force in the solubilisation of Fe and Mn during river water infiltration. In: Ray, C. (Ed.), *Understanding contaminant Biogeochemistry and Pathogen Removal*. Kluwer, 43-54.
- Doussan, m C., Poitevin, G., Ledoux, E., Detay, M., 1997, River bank filtration: modelling of the changes in water chemistry with emphasis on nitrogen species, *Journal of Contaminant Hydrology*, 25(2) 129-156.
- Grisczek, T., Hiscock, K.M., Metschies, T., Dennis, P.F., Nestler, W., 1998, Factors affecting denitrification during infiltration of river water into a sand and gravel aquifer in saxony, Germany. *Water research*. 32(2), 450-460.
- Hallberg R. O. and Martinell R., 1976, *Vyredox-In Situ Purification of Ground Water*, *Ground Water*, 88-93.
- Hiscock, K.M., Grisczek, T., 2002, Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Sci. Technol.* 28, 153-159.
- Houben G., 2004, Modeling the Buildup of Iron Oxide Encrustations in wells, *Ground Water*, 42(1), 78-82.
- Jacob, H., Von Gunten, H.R., Keil, R., Kuslys, M., 1988, Geochemical changes along a river groundwater infiltration flow path: Glattfelden, Switzerland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*; (USA); 52, 2693-2706.
- Kedziorek, M.A.M., and Bourg, A.C.M., 2009, Electron trapping capacity of dissolved oxygen and nitrate to evaluate Mn and Fe reductive dissolution in alluvial aquifers during riverbank filtration, *Journal of Hydrology*, 365, 74-78.
- 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 Ground Water Treatment Plant, *Ground Water*, 39(6), 921-930.
- Ray, C., Soong, T.W., Lian, Y.Q., Roadcap, G.S., 2002, Dffect of flood-induced chemical load on filtrate quality at bank filtration sites, *Journal of Hydrology*, 266, 235-258.
- Schwarzenbach, R.P., Giger, W., Hoehn, E., Schneldeer, J.K., 1983, Behavior of organic compounds during infiltration of river water to groundwater: field studies, *Environmental Science & Technology*, 17, 472-479.
- Sharma, S. K., 2001, Comparison of physicochemical iron removal mechanisms in filters. In: *Journal of water supply: Research and Technology aqua*, 187-198.
- Fan Maogong, 1988, The application of vyredox method regarding iron removal from ground water in China, *Groundwater*, 26(5), 647-648.
- Von Gunter, H.R., Karametaxas, G., Keil, R., 1994, Chemical processes in infiltrated riverbed sediments, *Environmental Science & Technology*, 28, 2087-2093.

2009년 8월 24일 원고접수, 2009년 9월 17일 게재승인

김규범

한국수자원공사 K-water연구원 지하수연구팀
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1
TEL: 042-870-7640
Fax: 042-870-7629
e-mail: gbkim@kwater.or.kr

김병우

한국수자원공사 K-water연구원 지하수연구팀
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1
TEL: 042-870-7647
Fax: 042-870-7629
e-mail: bwkim@kwater.or.kr

신선호

한국수자원공사 K-water연구원 지하수연구팀
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1
TEL: 042-870-7645
Fax: 042-870-7629
e-mail: shinsh@kwater.or.kr

박준형

한국수자원공사 K-water연구원 지하수연구팀
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1
TEL: 042-870-7641
Fax: 042-870-7629
e-mail: joonpark@kwater.or.kr