

단기양수를 통한 수리상수 및 지하수 오염물질 분포특성 동시평가

이진용^{1,‡} · 권형표² · 전우현¹ · 전성천² · 천정용²

¹강원대학교 지질학과

²(주)지오그린21

요 약

삼염화에틸렌(TCE)은 도시 및 산업지역 지하수에서 가장 흔히 발견되는 오염물질 중의 하나이다. 본 연구에서는 삼염화에틸렌으로 오염된 대수층에서 24시간의 단기양수를 통해 수리상수의 분포를 평가하고 또한 양수 및 양수중단 후 양수정 및 관측정의 TCE 농도변화를 통해 오염물질의 분포특성을 평가하였다. 양수정과 관측정의 TCE 농도변화는 양수 시 농도가 일부 감소하였다가 이후 증가하거나, 혹은 초기와 비슷하게 유지되거나 혹은 감소하는 경향으로 대별되었다. 이는 이들 각 관정 인근에 고농도 오염원 혹은 저농도 오염원의 존재여부에 따라 다르게 나타난 것이다. 특히 본 구역의 우측에서 양수에 따른 TCE 농도 증가현상이 뚜렷하므로 이들 외곽부에 대한 추가적인 조사가 필요하다. 한편 본 양수를 통해 추정된 수리전도도를 보면 해석 방법론에 따른 차이는 적었으며 또한 특이적 이방성은 발견되지 않았다. 본 연구는 단일 단기양수를 통해 주변 오염분포의 평가 및 수리상수 추정 등 두 가지를 모두 수행하였다는데 의의가 있다.

주요어: 양수, 오염물질 분포, 삼염화에틸렌, 수리상수, 산업단지

Jin-Yong Lee, Hyung-Pyo Kwon, Woo-Hyun Jeon, Seong-Chun Jun and Jeong-Yong Cheon, 2013, Simultaneous evaluation of distribution characteristics of hydraulic parameters and groundwater contaminants estimated by a short-term pumping. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 2, p. 275-287

ABSTRACT: Trichloroethylene (TCE) is one of the most frequently occurring contaminants in groundwater of urban and industrial areas. In this study, we evaluated the distribution of hydraulic parameters from a short-term (24 hours) pumping and that of contaminants using TCE concentrations at the pumping and monitoring wells during and after the pumping in a TCE contaminated aquifer. The changes in TCE concentrations at the wells were classified into 1) partly decrease during pumping and increase after pumping stop, 2) sustained like the initial values and 3) decrease during and after the pumping. These different behaviors at each well can be attributed to existence of high or low concentration plumes at nearby areas. Especially, the distinct increasing trends of TCE concentrations in the right region of the study area require an additional investigation for its outer region. In the meanwhile, hydraulic conductivities estimated the pumping results revealed neither significant difference with the analysis methods nor distinctive anisotropy. This study is meaningful because we have simultaneously evaluated both the distributions of the hydraulic parameters and the contaminants using the single short-term pumping.

Key words: Pumping, contaminant distribution, trichloroethylene (TCE), hydrological parameter, industrial complex

(Jin-Yong Lee and Woo-Hyun Jeon, Dept. of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; Hyung-Pyo Kwon, Seong-Chun Jun and Jeong-Yong Cheon, GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 152-719, Korea)

[‡] Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

1. 서 론

염화유기용제 특히 삼염화에틸렌(TCE)은 전 세계적으로 도시 및 산업지역에서 가장 흔히 발견되는 지하수 오염물질의 하나이다(Rivett *et al.*, 2001; Moon *et al.*, 2002; Lenczewski *et al.*, 2003; Heo *et al.*, 2007; Baek and Lee, 2010; Kim *et al.*, 2011). 이들 염화유기용제는 물보다 밀도가 커서 지하수면에 도달한 후 불투수 매질을 만나기까지 계속 침투할 수 있다. 특히 단열암반(fractured rock)을 만나 미세 단열속으로 침투하면 정화가 매우 어렵다. 오염지하수 정화 기술의 선진국으로 인식되고 있는 미국 등지에서도 단열암반 내 염화유기용제 오염지하수의 정화는 21세기 가장 도전적 환경기술 과제 중 하나로 파악하고 있다(Kavanaugh and Rao, 2003; McCarty, 2010).

한편 우리나라의 경우 2001년 부산문현동 오염부지의 정화사업을 시작으로 오염토양에 대한 정화가 본격화되었고 이와 더불어 오염토양 정화기술개발에 대한 관심과 투자도 점차 고조되었다(Lee and Lee, 2004). 특히 1992년 시작된 선도기술개발사업(일명 G7 프로젝트)과 이후 토양오염확산방지사업(2003-2008년)을 통해 오염토양 정화기술에 대한 기초가 놓아졌으며, 현재 토양지하수 분야에 특화된 가이아 프로젝트(GAIA Project)는 토양지하수 오염조사, 정화 및 사전예방 기술의 발전에 상당한 기여를 하였다. 그럼에도 불구하고 그 동안의 기술개발이 주로 (석)유류오염에 집중되어 왔으며 또 현장중심의 지하수정화기술 개발은 거의 없었다고 보는 것이 진실에 가깝다. 2009년이 되어서야 염화유기용제 오염지하수에 대한 현장 정화기술개발에 착수하였다(Baek and Lee, 2010; Yang *et al.*, 2012).

한편 전통적 오염지하수 정화기술로서 양수처리법(pump and treat)은 여러 한계점(tailing and/or rebound effects)에도 불구하고(Ostrom *et al.*, 1999), 현재에도 여전히 현장 적용성이 높다(Park *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2012). 이런 양수처리법의 효과적 적용을 위해서는 해당 대수층의 특성 및 오염물질의 분포에 대한 이해가 선행되어야 한다(Young *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2012). 이를 위해 Rivett *et al.* (1990), Bockelmann *et al.* (2001), Bauer *et al.* (2004), Zeru and Schäfer (2005) 등은 양수정에서 양수시간에 따른 오염물질 농도변화 곡선을 통해 주변의 오염분포

상태를 분석하기도 하였다.

본 연구에서는 염화유기용제(특히 TCE)로 오염된 대수층에서 단기양수시험을 실시하였고 양수정과 관측정에서 시간에 따른 TCE의 농도변화 분석을 통해 주변의 오염물질 분포를 추정하였다. 아울러 시험기간 동안 획득한 수위강하(및 회복) 자료를 통해 수리상수를 추정하여 해당 대수층의 이방성 또한 분석하였다. 본 연구는 단기양수를 이용하여 양수정 주변의 오염물질과 수리상수의 분포를 동시에 분석하였다는데 의의가 있다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

연구지역은 원주시 00공단으로 이 지역 대수층의 지하수오염은 1995년부터 알려지게 되었다(Yu *et al.*, 2006; Baek and Lee, 2010). 이 공단지역의 상류부에 도로관리사업소가 위치하는데(그림 1), 이 사업소 내부에 아스팔트 재료 등을 시험하는 (구)아스팔트 실험실에서 각종 유기용제를 사용하였고 폐유기용제의 부적절한 처리가 본 지역 TCE 오염의 주요인 중 하나로 지적되었다(Gangwon Province, 2005; Yu *et al.*, 2006; Baek and Lee, 2010; Jo *et al.*, 2010; Yang and Lee, 2012; Yang *et al.*, 2012). 현재 본 지역은 유기용제류 오염지하수에 대한 정화방법 개발을 위해 다양한 현장시험과 조사가 수행되고 있으며(Yang *et al.*, 2012), 자세한 오염 이력, 오염분포 및 각종 수리지질조건 등에 대한 정보는 상기한 참고문헌 등에서 찾을 수 있다.

한편 본 단기양수시험을 수행한 상세 위치는 그림 1의 (구)아스팔트실험실(Asphalt Lab) 뒤편으로 지표고도 137~138 m의 언덕에 위치한다. 북동쪽 약 900 m 전면에 원주천이 남동방향에서 북서방향으로 유하한다. 시험지역에는 11개의 관정이 설치되어 있으며(그림 1 삽입도 참조), 깊이는 9개 관정이 동일하게 6 m 그리고 나머지 2개 관정은 각각 15, 30 m 이다(표 1). 스크린은 대부분 상부 1.5 m를 제외하고 그 하단에 설치되어 있다. 본 단기양수시험 전에(2011년 10월 24일) 측정된 지하수위는 지하 0.57~0.97 m로 매우 높았으며 이는 다른 해 보다 월등히 많은 6~9월 집중 강우 때문으로 판단된다. 기록상으로 2011년 6~9월의 강수량은 1713.3 mm이었고, 2010년

6~9월은 1081.5 mm이었다. 지하수는 지형상 상류인 MW1과 MW3 지역에서 하류부인 MW4와 MW8쪽으로 유동하는 것으로 나타났다(GeoGreen21, 2012; Hwang, 2012).

본 시험에 사용된 상기 관정을 설치하면서 획득한 시추자료에 의하면 지하 2~3 m 하부까지는 복토층(fill/reclamation soil), 그 아래 약 5 m 깊이까지는 풍화토(weathered soil) 그리고 그 아래는 풍화암(weathered rock)으로 구분되었다(그림 2). 지상 약 20 cm는 콘크리트로 피복되어 있으며 약 30 여 m 아래에는 비교적 신선한 암반(흑운모 화강암)이 나타난다(Jo *et al.*, 2010). 그러므로 상기한 지하수위는 복토층 내에 형성된다. 또 본 양수시험 전에 실시한 개별 관정에 대한 순간수위변화시험 결과에 의하면 수리전도도는 $1.92 \times 10^{-5} \sim 2.76 \times 10^{-3}$ cm/sec 범위이고

평균은 5.14×10^{-4} cm/sec, 중앙은 8.15×10^{-5} cm/sec 로 비교적 낮았다(GeoGreen21, 2012; 표 1).

2.2 양수 및 화학분석

본 단기양수시험은 2011년 10월 25일부터 28일까지 약 3.3일간(양수 및 회복모니터링 포함) 수행되었다. 양수는 중앙에 위치한 IW 관정에서 24시간 동안 실시하였으며(그림 1 삽입도의 관정 위치 참조), 양수량은 0.25~4.13 L/min이며 평균은 1.14 L/min이었다. 양수초기에는 4.13 L/min으로 높았으나 수위강하와 함께 양수량이 급격히 감소하여 1시간 이후에는 약간의 변동에도 불구하고 0.65 L/min로 거의 안정화되었다. 양수는 정량 수증펌프를 이용하였으며 양수기간 동안 강우는 없었다.

양수를 하는 동안과 양수중단 후 회복되는 56시

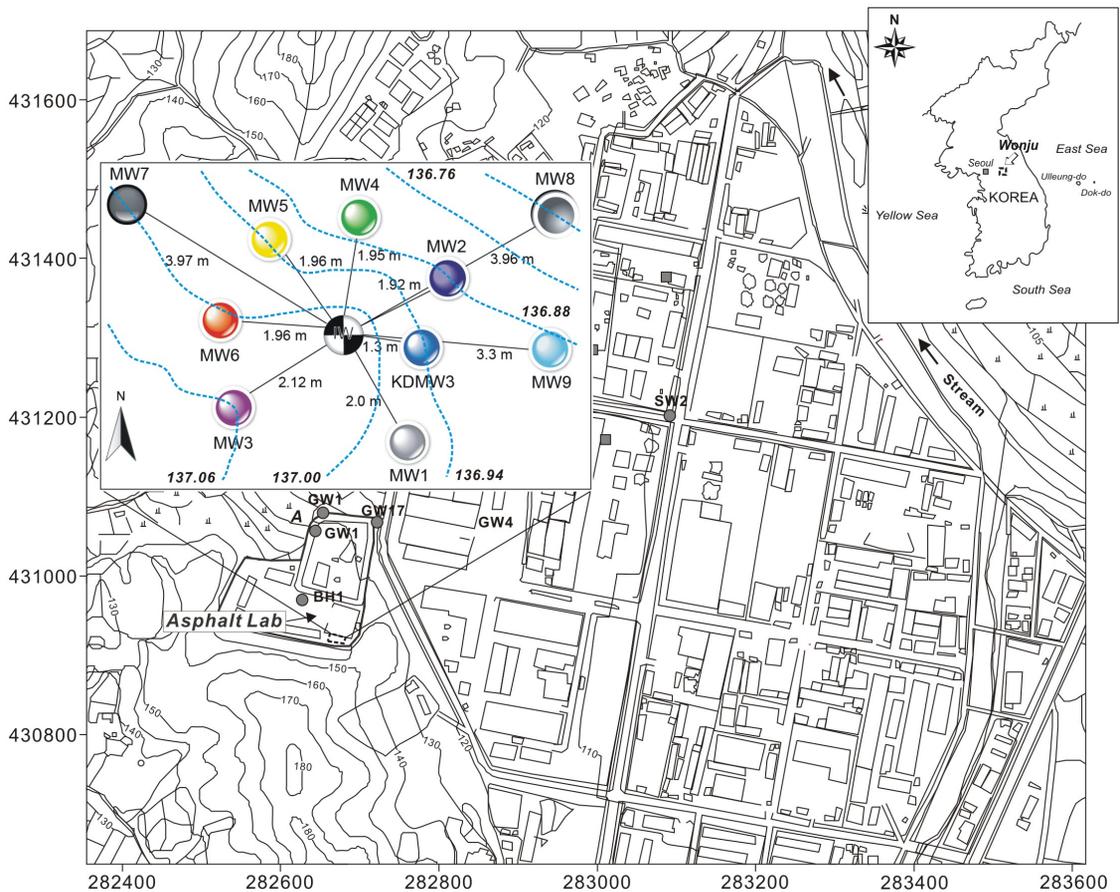


Fig. 1. Location of the study area also showing the layout of the pumping (IW) and monitoring wells (MW series) and the water level contours (m, amsl) measured before start of the pumping.

Table 1. Well completions, and hydraulic conductivity (K) and flow velocity (v) for each well estimated from slug tests and flowmeter tests, respectively. The flowmeter data are from Hwang (2012).

| Test wells | Elevation (m) | Depth (m) | Screen length (m) | Water level (m, bgs) | K (cm/sec) | v (m/day) |
|------------|---------------|-----------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| IW | 137.71 | 6 | 4.5 | 0.65 | 5.76×10^{-4} | 1.95 |
| MW1 | 137.70 | 6 | 4.5 | 0.65 | 4.51×10^{-4} | 3.78 |
| MW2 | 137.68 | 6 | 4.5 | 0.73 | 6.89×10^{-4} | 2.30 |
| MW3 | 137.71 | 6 | 4.5 | 0.57 | 2.76×10^{-3} | 1.95 |
| MW4 | 137.67 | 6 <td 4.5 | 0.64 | 8.51×10^{-5} | 2.69 | |
| MW5 | 137.76 | 6 | 4.5 | 0.76 | 3.51×10^{-4} | 1.36 |
| MW6 | 137.75 | 6 | 4.5 | 0.66 | 6.81×10^{-5} | 1.75 |
| MW7 | 137.73 | 6 | 4.5 | 0.64 | 5.68×10^{-4} | 3.13 |
| MW8 | 137.70 | 6 | 4.5 | 0.97 | 3.93×10^{-5} | 4.23 |
| MW9 | 137.67 | 15 | 9 | 0.67 | 4.33×10^{-5} | - |
| KDMW3 | 137.69 | 30 | 27 | 0.65 | 1.92×10^{-5} | - |
| Mean | 137.71 | 9 | 6.9 | 0.69 | 5.14×10^{-4} | 2.57 |
| Median | 137.70 | 6 | 4.5 | 0.65 | 8.51×10^{-5} | 2.30 |

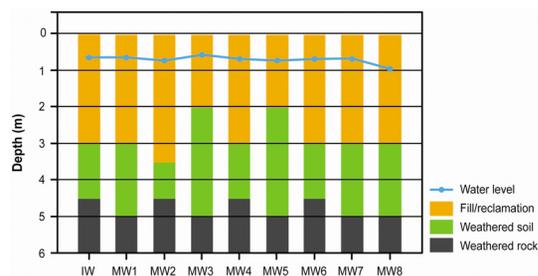


Fig. 2. Simplified geologic section constructed from the logging data of the pumping and monitoring wells.

간 동안 양수정과 1.3~3.97 m 이격한 상하류 관측정에서 TCE 농도와 각종 현장수질을 분석하였다. TCE 농도분석용은 양수정에서는 양수된 지하수를 그리고 관측정에서는 소형 펄스탈릭펌프(peristaltic pump)를 이용하여 시료를 채취하였고 이를 현장에서 약 1 km 떨어진 상지대학교 자연과학연구원센터에 분석을 의뢰하였다. 또 수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 및 산화환원전위(ORP) 등의 수질항목은 현장 측정장비(Horiba D series)를 사용하여 측정하였다.

2.3 수리상수 추정

한편 양수 및 회복기간 동안 양수정과 관측정에서 지하수위도 함께 측정하였다. 수위측정은 수동식

수위계(Solinst, Canada)를 이용하였다. 측정한 지하수위와 양수량 그리고 양수정과 이격거리를 이용하여 수리상수(K: 수리전도도, T: 투수량계수, S: 저류계수)를 추정하였다. 수리상수 추정을 위해 해당 대수층을 자유면대수층(unconfined aquifer)으로 설정하였고 이는 Theis 법(1935)과 Cooper-Jacob 직선 법(1946)을 적용하였다. 수평 및 수직 수리전도도의 비는 10:1로 설정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 오염물질 농도변화 및 분포

3.1.1 양수정

그림 3은 양수정(IW)과 관측정에서 시간에 따른 TCE의 농도 및 지하수위를 보여준다. 양수정(그림 3(a))의 경우 최초 양수를 시작하였을 때(2011년 10월 25일 12:05) TCE 농도가 5.471 mg/L로 매우 높았다(먹는물 수질기준 0.03 mg/L의 182배), 양수 시간이 경과함에 급격하게 낮아져 최저 1.080 mg/L(양수 3시간째)에 도달하였다. 이후 완만한 증가 경향을 보이다 양수 13~14시간이 경과하였을 때 TCE 농도가 급격하게 다시 상승하여 각각 5.554 및 7.547 mg/L로 최초농도보다 더욱 높은 값을 기록하였다. 이는 양수로 인하여 일부 잔류한 고농도 오염물질

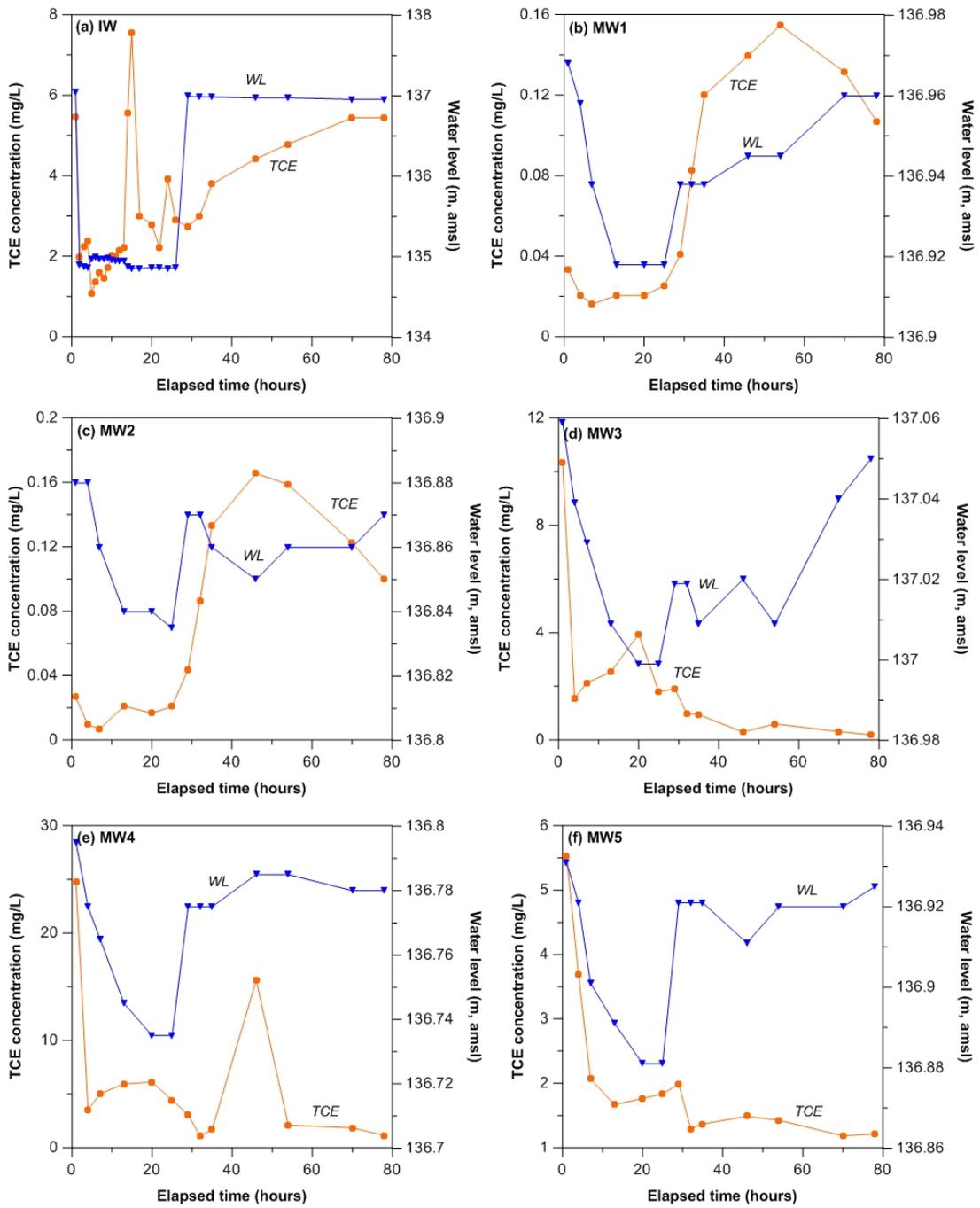


Fig. 3. TCE concentrations and groundwater levels during pumping and after cessation of the pumping at each well. Pumping started at 12:05, October 25 of 2011.

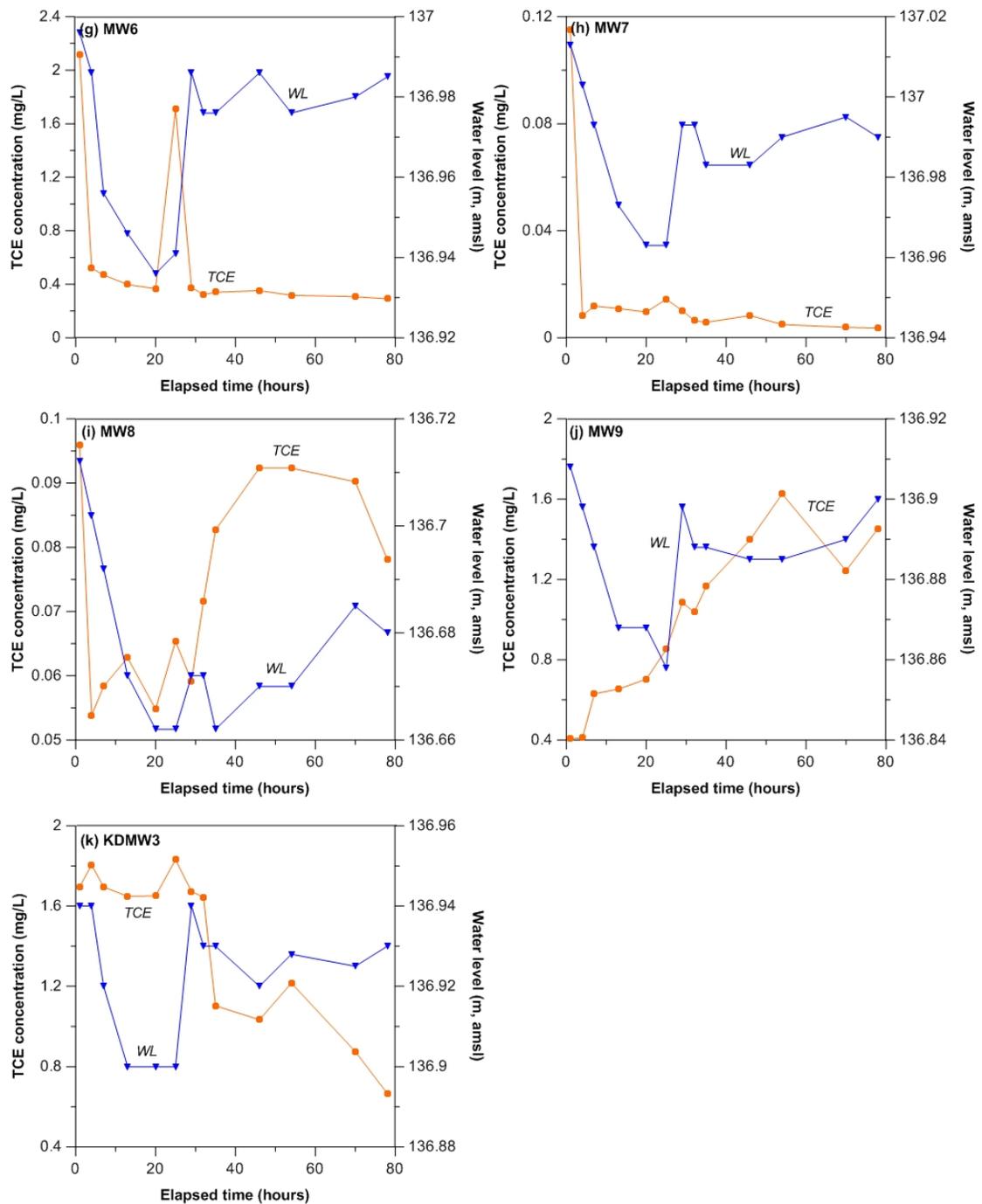


Fig. 3. Continued.

Table 2. Correlation between TCE and groundwater levels, and variation trends of the TCE levels identified using a non-parametric analysis (Mann-Kendall test) for each well. The p is the probability that the parameters are un-correlated.

| Test wells | Correlation (r) | p | Trend | Confidence |
|------------|-----------------|-------|-------|------------|
| IW | 0.473 | 0.012 | Up | 99.9% |
| MW1 | 0.374 | 0.207 | Up | 99% |
| MW2 | 0.042 | 0.892 | Up | 99% |
| MW3 | 0.342 | 0.253 | Down | 99.9% |
| MW4 | 0.283 | 0.349 | Down | 95% |
| MW5 | 0.272 | 0.368 | Down | 99% |
| MW6 | 0.003 | 0.991 | Down | 99.9% |
| MW7 | 0.484 | 0.093 | Down | 99% |
| MW8 | 0.117 | 0.704 | Up | 90% |
| MW9 | 0.039 | 0.899 | Up | 99.9% |
| KDMW3 | -0.175 | 0.567 | Down | 99.9% |

(Yang *et al.*, 2012)을 교란(activation)시킨 결과이거나 혹은 인접 고농도 오염원(양수 전 MW3 최고 10.348 mg/L, MW4 최고 24.767 mg/L)의 영향으로 볼 수 있다. 그러나 지속되지 않는다는 측면에서 전자의 가능성이 더 높은 것으로 사료된다. 한편 24시간 경과 후 양수를 중단하였을 때부터 매우 빠른 속도로 TCE 농도는 상승하였으며 양수 중단 후 53시간 이후에는(양수 시작 후 77시간) 거의 원래의 농도(5.442 mg/L)를 회복하였다.

지하수위는 양수와 함께 빠른 하강을 보였으며(양수 1시간 내에 2.15 m 하강), 이후 미미한 변동을 보이던 양수 중단과 함께 3시간 이내에 거의 회복하였다(2.1 m 회복). 흥미로운 것은 지하수위와 TCE 농도가 유의미한 양의 상관성($r=0.473$ at $p=0.012$; 표 2)을 보인다는 것이다. 즉 수위가 높으면 TCE 농도가 높고 수위가 낮으면 TCE 농도가 낮다. 이는 일반적으로 해당 관정이 양수영향반경 내 주변보다 오염도가 높음을 지시한다(상기한 일시적 고농도 제외 하면; Bockelmann *et al.*, 2001). 그러나 본 양수정의 주변에 상대적 고농도(MW3~5)와 저농도 관정(예를 들어 MW2 최고 0.027 mg/L, KDMW3 1.696 mg/L, MW1 0.033 mg/L, MW6 2.114 mg/L)이 혼재되어 있어 해석이 단순하지는 않다.

3.1.2 관측정

그림 3(b)~(k)는 양수정 상하류부 관측정에서 측

정한 TCE 농도 및 지하수위이다. 관측정 MW1(그림 3(b), $r=2.0$ m)은 TCE 농도에 있어서 특이한 변동 양상을 보여준다. 최초 TCE 농도는 0.033 mg/L로 먹는물 수질기준(0.03 mg/L)을 약간 상회하는 정도였고 양수시간 동안 농도가 하강하는 일반적 양상을 보였으나, 양수 종료 후 TCE 농도는 지속적으로 증가하여 최고 0.155 mg/L(양수중단 후 29시간 경과)에 도달하는 등 특이변동을 보였다. 이는 MW1 위쪽 상류부(MW1-IW 방향)에 MW1 보다는 상대적 고농도의 오염이 있음을 지시한다(그 위쪽에 관측정이 없어 확인은 불가능하였다). MW2(그림 3(c), $r=1.92$ m)의 TCE 농도 경우에도 MW1과 매우 유사한 거동을 보였다. 최초 0.027 mg/L의 농도를 보였고 양수가 진행되면서 소폭 하강하였으나 양수가 멈춘 후부터 빠른 속도로 상승하여 양수중단 21시간이 경과하였을 때는 최초 농도의 6배 이상인 0.166 mg/L에 도달하였다. 이 또한 MW2 인접 하류부에(IW-MW2-MW8 방향) 상대적 고농도가 있음을 지시하며 MW8의 최초 농도가 0.096 mg/L로 MW2 보다 3.5배나 높았다는 사실이 이러한 해석을 지지한다.

그림 3(d)는 MW3 관측정($r=2.12$ m)의 TCE 농도 변화를 보여준다. 이 관측정은 가장 급격한 농도감소를 보이는데 최초 10.348 mg/L(먹는물 기준의 345배)이었으나 양수 3시간 만에 약 1/7인 1.547 mg/L로 급강하였고 이후 약간의 반등 후에도 지속적으로 감소하여 모니터링을 중단한 약 77시간 후에는

0.191 mg/L에 도달하였다. 이는 상기 세 관정(양수정 IW와 관측정 MW2~3)과 매우 다른 거동으로 관측정 MW3의 상류부(IW-MW3 방향)에 매우 저농도 오염(혹은 비오염)이 있음을 지시한다. 현장조건상 본 관측정 직상류는 수목이 우거진 사면으로 이러한 저오염 해석을 뒷받침한다(관측정 위치 그림 1 삽입도 참조).

그림 3(e)와 3(f)는 관측정 MW4($r=1.95$ m)와 MW5($r=1.96$ m)의 시간에 따른 TCE 농도변화를 보여준다. 두 관측정에서의 농도변화는 상기한 MW3과 매우 유사한 거동을 보이는데 최초 고농도(MW4 24.767 mg/L, MW5 5.523 mg/L)에서 출발하여 급격한 감소를 보이고(각각 최초농도의 4.3%, 21.4%까지 도달) 양수중단 이후에도 여전히 지속적으로 감소하는 경향이다. 이는 이들 고농도 오염관측정 하류부(IW-M4 및 IW-MW5 방향)에 비교적 저농도의 오염지하수가 있음을 지시한다. 한편 관측정 MW6과 MW7의 TCE 농도변화도 상기한 MW4~5와 매우 유사하였다(그림 3(g)와 3(h)). 초기에는 매우 농도가 높았으나 양수가 진행되면서 농도가 급격히 하강하였고 양수중단 후(MW6은 양수중단 시 일시적 농도상승이 있었지만) 두 관측정 모두 지속적으로 TCE 농도가

하강하였다. 이는 이들 관정 인접 하류부(그림 1 삽입도에서 북서방향)에 상대적으로 저농도 오염이 있음을 지시한다.

한편 MW8(그림 3(i))과 MW9(그림 3(j))는 상기 와 또 다른 거동을 보여준다. MW8의 경우 양수 시 급한 농도의 감소를 보이다 양수 중단 후 크게 상승하는 양상을 보이고 MW9의 경우 양수 시작부터 농도가 계속 크게 상승하는 모습을 보였다. 이는 이들 두 관정 하류방향에 보다 고농도의 오염이 존재함을 지시한다. KDMW3의 경우(그림 3(k)), 초반기는 양수에도 불구하고(약 24시간 이내) TCE 농도에 큰 변화가 없었으나(1.6~1.8 mg/L), 양수영향이 확대되면서 KDMW3 근접 거리에 위치하고 있는 MW1과 MW2의 저농도 오염원(초기~0.033 mg/L)이 도래하여 농도감소가 발생한 것으로 사료된다.

3.1.3 분포추정

상기한 양수정과 관측정의 TCE 농도 변화에 대한 개별적 해석을 보다 종합적으로 이해하기 위하여 초기농도 대비 시간에 따른 농도변화(C/C_0)를 하나의 그래프에 도시하였다(그림 4). 그림에서 보는 바와 같이 양수정과 10개 관측정은 그들의 농도 거

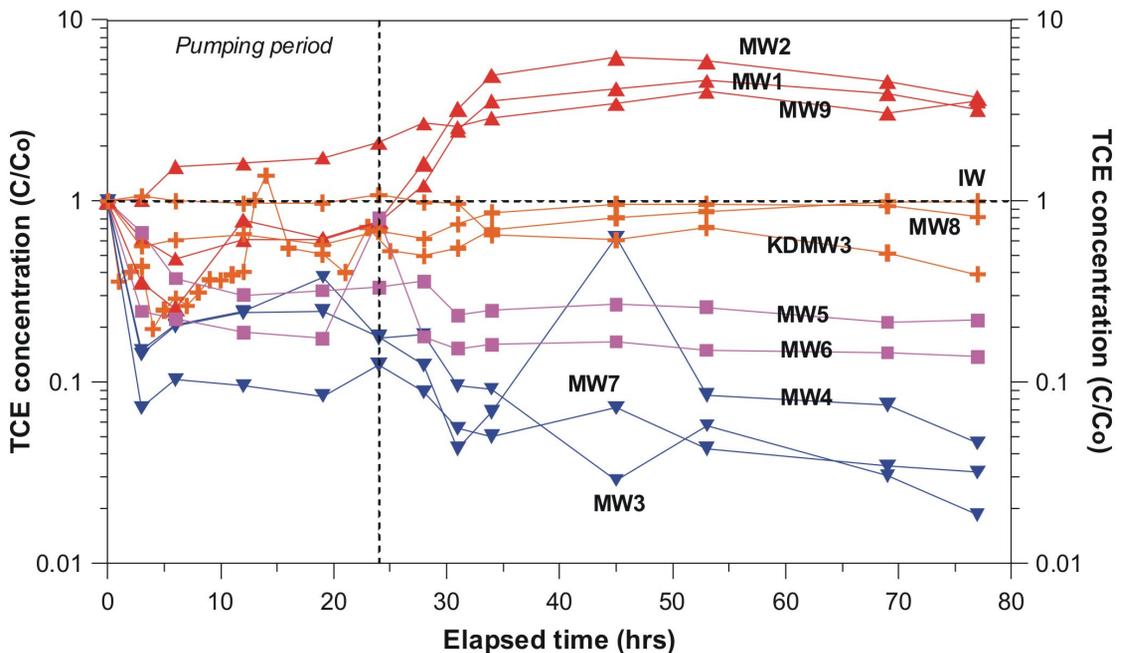


Fig. 4. TCE concentration normalized by the initial value (C_0) for each well.

동에 있어 몇 개의 그룹으로 확연히 구분된다. 첫 번째 그룹(MW1, 2, 9)은 처음부터 지속적으로 혹은 처음 일시적 하강 후(양수기간 동안) 농도가 상승하는 양상이다(표 2 참조). 이는 이들 관측정 주변에(양수정 방향이면서 각 관정의 하류부) 보다 고농도의 오염이 있음을 지시한다(MW8의 TCE 배경농도가 MW2의 배경농도보다 훨씬 높다는 사실이 이를 증명한다). 두 번째 그룹(IW, MW8, KDMW3)은 초기 양수기간 동안 약간의 농도 감소가 있었으나 약간 회복하면서 최초보다는 약간 낮거나 비슷한 농도가 유지되는 양상을 보인다. 이는 양수 영향반경 내에 각 관측정보다 비교적 저농도 혹은 비슷한 정도의 오염이 있음을 지시한다. KDMW3 초기농도와 비교하였을 때 MW9의 초기농도가 매우 낮다는 사실이 이런 해석을 뒷받침한다(그림 1 관정의 위치관계 및 그림 3(j) 및 3(k) 참조).

한편 세 번째 그룹(MW5~6)도 확연히 구분되는데 양수와 함께 TCE 농도가 감소하며 일정 농도 이하로는 더 이상 낮아지지 않고 유지하는 양상을 보인다. 이는 이들 하류부(동심원상 하류부)에 보다 저농도 오염이 있음을 지시한다. 네 번째 그룹(MW3~4, 7)은

양수중단 후에도 TCE 농도가 지속적 하강 양상을 보이는 그룹이다. 이는 영향권 하류 방향에 해당 관정보다 확실히 낮은 농도의 오염이 존재함을 나타낸다. 상기 그룹들의 거동을 대별하여 위치적으로 살펴보면 시험지역 우측(MW1, MW2, MW9)은 이들 관측정보다 상대적 고농도 오염이 있어 농도 상승경향을 반대로 좌측(MW3~7)은 보다 저농도 오염이 있어 농도 하강현상을 보인 것으로 해석된다. 그러나 시험지역 인접 외부에 관측정이 없거나 농도자료가 없어 이를 확인하기는 어렵다. 그러나 향후 효과적인 오염지하수 정화를 위해서는 MW1 방향 상류부에 대해서는 추가적인 관측정 설치를 통해 확인이 필요하다.

3.2 현장수질 변화 및 특성

3.2.1 pH

그림 5는 양수 및 양수 후 모니터링 기간 동안 현장수질의 변화를 보여준다. 우선 이 지역의 pH는 6~9.6 범위로 좁은 구역에서 매우 큰 변화를 보인다(그림 5(a)). 이는 수암반응(water-rock interaction) 등의 자연적 원인은 아니며 국지적 오염 등 인위적 요인에 의한 영향이 큰 것으로 보인다(Lee *et al.*, 2008). 특히 KDMW3

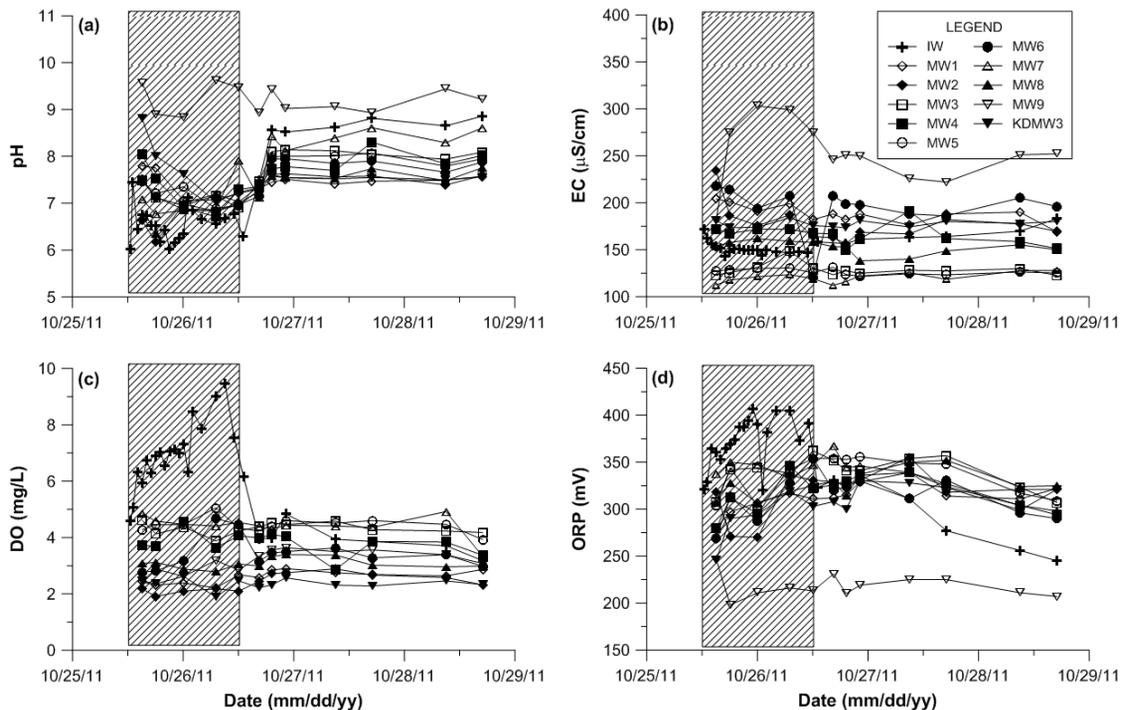


Fig. 5. Field parameters measured at each well during (shaded region) and after the pumping.

과 MW9의 경우 초기(배경) pH가 8.8~9.6으로 매우 높는데 현재로서는 정확한 원인을 알 수 없으나 바로 근처에 시멘트 콘크리트 등 각종 폐기물이 있어 이의 영향으로 보는 것이 타당하다(Lee *et al.*, 2008). 전체적으로 양수 후 pH 분포범위가 좁아지는데 이는 양수에 의한 혼합효과로 볼 수 있다.

양수정(IW)의 pH는 양수 초기에는 약간의 변동이 있지만 6~7 수준이었으나 양수중단 후에 8~9 범위로 크게 증가하는 양상을 보였다(그림 5(a)). 이는 pH가 매우 높은 KDMW3과 MW9 근처 지하수의 도래 영향으로 볼 수 있다. 이러한 양상은 MW2와 MW7~8에서도 관찰되었고 이는 주변에 보다 높은 pH 지하수의 영향을 받은 것으로 사료된다. 다른 관측정들(MW1, 3~6)은 대체로 7.5~8의 초기 pH에서 양수기간 동안 일부 하강하였으나 이후 비슷한 수준(조금 낮거나 높은 수준)으로 회복되는 현상을 보였다. 한편 KDMW3의 pH는 특이적 변화를 보이는데 초기에 약 9 정도의 수준에서 계속 떨어져 약 7.5 정도에 이르러 안정되었다. 유동 경로상에 있는 높은 pH인 MW9의 영향을 직접적으로 받았을 경우 오히려 상승하는 것이 더 타당하나 내려가는 것으로 보아 다른 경로상의 낮은 pH 지하수의 영향도 받는 것으로 사료된다. 가장 높은 pH를 보인 MW9 지하수는 초기 9.6에서 이후 9 정도에 안정되어 비교적 양수 시험의 영향을 덜 받거나 혹은 받더라도 높은 pH로 인하여 상쇄(masking)된 것으로 보인다.

3.2.2 전기전도도(EC)

그림 5(b)는 양수정과 관측정의 EC 변화를 보여준다. EC는 전체적으로 110~300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보이며 pH와 유사하게 위치간 차이가 비교적 크다. 양수정(IW)의 경우 양수기간 동안 약간($\sim 30 \mu\text{S}/\text{cm}$) 하강하였으나 이후 초기 EC와 비슷한 값으로 회복하였다. MW1~2의 경우 25~50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도 떨어지는 경향을 보이거나 다른 관측정들(MW3~8, KDMW3)은 대체로 미미한 수준에서 약간 감소 혹은 상승하는 등 큰 변화를 보이지는 않았다. TCE 농도의 큰 변화와 비교하였을 때 이와 같은 EC의 작은 변화는 이 구역의 지하수 오염은 이온성 물질이 아닌 주로 비극성 탄소유기화합물에 의한 것임을 지시한다(Atekwana *et al.*, 2004).

다만 MW9의 경우 EC값 자체도 상대적으로 매우 높

으며 양수기간 동안 125 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도 상승하는 등 특이적 변동을 보였다. 이는 TCE의 농도 상승과 일치하며 앞서 이 관측정의 높은 pH (pH~9.6)에 대한 원인으로 인근의 콘크리트, 염화칼슘 등의 폐기물로 추정 한 바 이온성물질의 추가적 오염개연성과 잘 일치한다.

3.2.3 용존산소(DO) 및 산화환원전위(ORP)

그림 5(c)는 양수정과 관측정 지하수의 용존산소 변화를 보여준다. 이 구역의 용존산소는 양수정의 양수기간을 제외하면 2~5 mg/L 범위로 대체로 호기성 상태이다. 이런 호기 상태는 이 지역 TCE의 혐기적 생분해의 제한요인으로 작용하고 있다(Baek and Lee, 2010). 한편 양수정(IW)의 경우 양수기간 동안에서 최초 4.5 mg/L에서 9 mg/L 이상으로 크게 증가하였다가 양수중단 후 원래로 회복되었다가 3.5 mg/L 수준으로 약간 감소하였다. 인근 관측정의 용존산소가 시험기간 내내 큰 변화없이(변동 $\pm 1 \text{ mg}/\text{L}$ 이내) 2~5 mg/L을 유지하는 것으로 보아 양수정 용존산소 증가는 펌프가동에 따른 일시적 폭기 영향으로 사료된다.

그림 5(d)는 산화환원전위(ORP)의 변동을 보여준다. 이 구역 ORP는 200~400 mV 범위로 산화상태를 반영한다. 양수정의 경우 용존산소와 동일하게 양수기간 중 크게 증가하였다가 다시 감소하는 양상을 보였다. 다른 관측정들은 250~350 mV 내외로 양수 및 중단 기간에도 큰 변동이 발생하지 않았다. 다만 MW9의 경우 50 mV 정도의 감소가 발생하였는데 이는 앞에서 TCE, pH 및 EC에 대하여 설명한 바와 같이 인접 고오염 지하수의 영향으로 보는 것이 타당하다.

3.3 추정 수리상수 및 분포

표 3은 양수시험을 통해 추정된 수리상수(투수량계수, 수리전도도, 저유계수)이다. Thies (1935)해를 이용한 투수량계수(T)는 0.2395~0.5609 cm^2/sec 범위이며 평균과 중앙값은 0.4294 및 0.4421 cm^2/sec 로 추정되었다(KDMW3는 저유계수가 지나치게 크게 추정되어 통계에서 제외하였으며 '*' 표시함). 이를 수리전도도(K)로 환산하였을 때 범위는 $5.32 \times 10^{-4} \sim 1.25 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{sec}$, 평균과 중앙값은 9.54×10^{-4} 및 $9.82 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$ 로 나왔다. 한편 또 다른 해인 Copper-Jacob 직선식(1946)을 이용한 분석에서는 투수량계수가 0.2635~0.3425 cm^2/sec , 평균과 중앙값이 0.2966 및 0.2959 cm^2/sec 로 추정되었다. 또한 수리전도도의

Table 3. Hydraulic parameters estimated from the groundwater level data for the pumping tests. Unconfined model was used for the analysis. Abnormally high values were excluded for the mean and median calculation.

| Test wells | Theis (1935) | | | Cooper-Jacob (1946) | | |
|------------|--------------------------|-------------------------|---------|--------------------------|-------------------------|---------|
| | T (cm ² /sec) | K (cm/sec) | S | T (cm ² /sec) | K (cm/sec) | S |
| MW1 | 0.3194 | 7.10×10 ⁻⁴ | 0.1732 | 0.2953 | 6.56×10 ⁻⁴ | 0.1445 |
| MW2 | 0.5399 | 1.20×10 ⁻³ | 0.1180 | 0.2975 | 6.61×10 ⁻⁴ | 0.2168 |
| MW3 | 0.4421 | 9.82×10 ⁻⁴ | 0.0777 | 0.2834 | 6.29×10 ⁻⁴ | 0.1062 |
| MW4 | 0.4421 | 9.82×10 ⁻⁴ | 0.0918 | 0.2834 | 6.29×10 ⁻⁴ | 0.1255 |
| MW5 | 0.5609 | 1.25×10 ⁻³ | 0.1043 | 0.3121 | 6.94×10 ⁻⁴ | 0.1592 |
| MW6 | 0.5040 | 1.12×10 ⁻³ | 0.0779 | 0.2635 | 5.86×10 ⁻⁴ | 0.1337 |
| MW7 | 0.3845 | 8.54×10 ⁻⁴ | 0.0471 | 0.2959 | 6.58×10 ⁻⁴ | 0.0426 |
| MW8 | 0.2395 | 5.32×10 ⁻⁴ | 0.0636 | 0.2959 | 6.58×10 ⁻⁴ | 0.0429 |
| MW9 | 0.4324 | 9.61×10 ⁻⁴ | 0.0662 | 0.3425 | 7.61×10 ⁻⁴ | 0.0626 |
| KDMW3 | 0.7584* | 1.69×10 ⁻³ * | 0.2806* | 0.3089* | 6.86×10 ⁻⁴ * | 0.4926* |
| Mean | 0.4294 | 9.54×10 ⁻⁴ | 0.0911 | 0.2966 | 6.59×10 ⁻⁴ | 0.1149 |
| Median | 0.4421 | 9.82×10 ⁻⁴ | 0.0779 | 0.2959 | 6.57×10 ⁻⁴ | 0.1255 |

범위는 5.86×10⁻⁴~7.61×10⁻⁴ cm/sec, 평균과 중앙값은 6.59×10⁻⁴ 및 6.57×10⁻⁴ cm/sec이다. 두 해석방법에 대하여 수리전도도의 평균과 중앙값을 비교하면 Theis (1935)해가 Cooper-Jacob (1946)해 보다 크게 산정되었지만 그 차이는 각각 31%와 33%로 크지 않다. 저 유계수에 있어서도 Theis (1935) 및 Cooper-Jacob (1946)해의 평균값은 각각 0.0911과 0.1149로 매우 유사하게 추정되었다.

그런데 이들 양수시험을 통한 추정 수리전도도 값을 순간수위변화시험으로 추정된 값(표 1 참조)과 비교하면 비슷하거나 순간수위변화시험을 통해 추정된 값이 양수시험값보다 약간 작다. 일반적으로 영향반경이 작은 순간수위변화시험을 통해 추정된 값이 영향반경이 큰 양수시험을 통해 추정된 값보다 작을 것으로 알려져 있어(Butler and Healey, 1998; Lee and Lee, 1999), 이와 잘 일치한다. 한편 방향에 따른 수리전도도의 차이가 크지 않아(최대와 최소 1.29배 차이) 적어도 이 구역에서 특이한 이방성은 존재하지 않는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 삼염화에틸렌으로 오염된 대수층에서 1일간 단기양수를 실시하였다. 양수를 하는 동안 양수정과 동심원상 여러 거리에 위치하는 10개 관측

정에서 시간에 따른 TCE의 농도변화, 현장수질(pH, EC, DO, ORP)의 변화를 관찰하였고 또한 지하수위 측정도 병행하였다. TCE 농도변화에 있어서는 양수정과 관측정은 양수 시 농도가 일부 감소하였다가 이후 증가하거나, 혹은 초기와 비슷하게 유지되거나 혹은 감소하는 경향으로 대별되었다. 이는 이들 각 관정 인근에(양수에 따른 지하수 유동경로상에) 상대적 농도 오염원이 있는지 아니면 저농도 오염원이 있는지에 따라 다르게 나타난 것이다. 특히 본 구역의 동쪽에 해당하는 지역(MW1, MW9 동쪽)은 양수에 따른 TCE 농도 증가현상이 뚜렷하므로 이들 외곽부에 대한 추가적인 조사가 필요하다. 또한 이들 지역에서 pH, 전기전도도 및 용존산소의 거동도 또다른 오염원의 가능성을 지시하고 있어 이의 필요성을 뒷받침하였다.

한편 본 양수기간 동안 측정된 수위를 이용하여 수리전도도 등 수리상수를 추정된 결과 해석 방법론에 따른 차이는 적었으며 또한 방향에 따른 차이도 적어 특이한 이방성은 발견되지 않았다. 본 연구에서 수치해석 등을 통해 정량적 영향반경(지하수 유동 및 오염물질 이동관점) 분석 등을 수행하지 못한 점은 다음 과제로 남겨둔다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발

사업(173-092-010)”에서 지원받았습니다. 유익한 심사의견을 주신 전남대 여인옥 교수님과 강원대 박우철 교수님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Atekwana, E.A., Atekwana, E.A., Rowe, R.S., Dale Werkema Jr., D. and Legall, F.D., 2004, The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, 56, 281-294.
- Baek, W. and Lee, J.Y., 2010, Source apportionment of trichloroethylene in groundwater of the industrial complex in Wonju, Korea: a 15-year dispute and perspective. *Water and Environment Journal*, 25, 336-344.
- Bauer, S., Bayer-Raich, M., Holder, T., Kolesar, C., Müller, D. and Ptak, T., 2004, Quantification of groundwater contamination in an urban area using integral pumping tests. *Journal of Contaminant Hydrology*, 75, 183-213.
- Bockelmann, A., Ptak, T. and Teutsch, G., 2001, An analytical quantification of mass fluxes and natural attenuation rate constants at a former gasworks site. *Journal of Contaminant Hydrology*, 53, 429-453.
- Butler, J.J. and Healey, J.M., 1998, Relationship between pumping-test and slug-test parameters: Scale effect or artifact? *Ground Water*, 36, 305-312.
- Cooper, H.H. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Transactions of American Geophysical Union*, 27, 526-534.
- Gangwon Province, 2005, Detailed Investigation and Basic Remediation Design for Contaminated Soil and Groundwater in the Woosan Industrial Complex, Wonju City. Gangwon Province, 125 p (in Korean).
- GeoGreen21, Co., Ltd., 2012, Development of Technology for Containment and Mitigation of DNAPL Using Pump-and-Treat System. A Presentation Material for 2nd Phase Evaluation of GAIA Project, Seoul, SEEDS, 48 p (in Korean).
- Heo, J.W., Lee, D.H., Koh, D.C. and Chang, H.W., 2007, The effect of ionic strength and hardness of trichloroethylene-contaminated synthetic groundwater on remediation using granular activated carbon. *Geosciences Journal*, 11, 229-239.
- Hwang, I., 2012, Development of Technology for Mitigation and Containment of DNAPL Based on In-Situ Reactive Zone of NZVI. A Presentation Material for November Meeting, Seoul, SEEDS, 15 p (in Korean).
- Jo, Y.J., Lee, J.Y., Yi, M.J., Kim, H.S. and Lee, K.K., 2010, Soil contamination with TCE in an industrial complex: contamination levels and implication for groundwater contamination. *Geosciences Journal*, 14, 313-320.
- Kavanaugh, M.C. and Rao, P.S.C., 2003, The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion? USEPA, Cincinnati, Ohio, 129 p.
- Kim, T., Kim, H.S., Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Lee, K.K. and Hwang, I., 2011, Effects of dissolved compounds in groundwater on TCE degradations reaction by nano-scale zero-valent iron. *Journal of KSEE*, 33, 413-419 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 1999, Analysis of the quality of parameter estimates from repeated pumping and slug tests in a fractured porous aquifer system in Wonju, Korea. *Ground Water*, 37, 692-700.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2004, A short note on investigation and remediation of contaminated groundwater and soil in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 14, 123-130 (in Korean).
- Lee, J.Y., Moon, S.H., Yi, M.J. and Yun, S.T., 2008, Groundwater contamination with petroleum hydrocarbons, chlorinated solvents and high pH: implications for multiple sources. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41, 35-47.
- Lee, K.K., Cheon, J.Y., Yi, M.J., Lee, J.Y., Jeon, S.C., Kwon, H.P., Park, Y.C. and Kim, Y.C., 2012, Analysis Report on Technology Status of Pump and Treat. KEITI, Seoul, 68 p (in Korean).
- Lenczewski, M., Jardine, P., McKay, L. and Layton, A., 2003, Natural attenuation of trichloroethylene in fractured shale bedrock. *Journal of Contaminant Hydrology*, 64, 151-168.
- McCarty, P.L., 2010, Groundwater contamination by chlorinated solvents: history, remediation technologies and strategies. In: Stroo, H.F. and Ward, C.H. (eds.), *In Situ Remediation of Chlorinated Solvent Plumes*. Springer, New York, 1-28.
- Moon, J.W., Moon, H.S., Roh, Y., Kim, H. and Song, Y., 2002, Optimal remediation of TCE-contaminated groundwater using direct current and Fe⁰. *Economic and Environmental Geology*, 35, 229-239 (in Korean with English abstract).
- Oostrom, M., Hofstee, C., Walker, R.C. and Dane, J.H., 1999, Movement and remediation of trichloroethylene in a saturated, heterogeneous porous medium 2. Pump-and-treat and surfactant flushing. *Journal of Contaminant Hydrology*, 37, 179-197.
- Park, Y.C., Jeong, J.M., Eom, S.I. and Jeong, U.P., 2011, Optimal management design of a pump and treat system at the industrial complex in Wonju, Korea. *Geosciences Journal*, 15, 207-223.
- Rivett, M.O., Feenstra, S. and Cherry, J.A., 2001, A controlled

- field experiment on groundwater contamination by a multicomponent DNAPL: Creation of the emplaced-source and overview of dissolved plume development. *Journal of Contaminant Hydrology*, 49, 111-149.
- Rivett, M.O., Lerner, D.N. and Lloyd, J.W., 1990, Temporal variations of chlorinated solvents in abstraction wells. *Ground Water Monitoring Review*, 10, 127-133.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions of American Geophysical Union*, 16, 519-524.
- Yang, J.H. and Lee, K.K., 2012, Locating plume sources of multiple chlorinated contaminants in groundwater by analyzing seasonal hydrological responses in an industrial complex, Wonju, Korea. *Geosciences Journal*, 16, 301-311.
- Yang, J.H., Lee, K.K. and Clement, T.P., 2012, Impact of seasonal variations in hydrological stresses and spatial variations in geologic conditions on a TCE plume at an industrial complex in Wonju, Korea. *Hydrological Processes*, 26, 317-325.
- Young, C.M., Jackson, R.E., Jin, M., Londergan, J.T., Mariner, P.E., Pope, G.A., Anderson, F.J. and Houk, T., 1999, Characterization of a TCE DNAPL zone in alluvium by partitioning tracers. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 19, 84-94.
- Yu, S.Y., Chae, G.T., Jeon, K.H., Jeong, J.S. and Park, J.G., 2006, Trichloroethylene contamination in fractured bedrock aquifer in Wonju, Korea. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 76, 341-348.
- Zeru, A. and Schäfer, G., 2005, Analysis of groundwater contamination using concentration-time series recorded during an integral pumping test: Bias introduced by strong concentration gradients within the plume. *Journal of Contaminant Hydrology*, 81, 106-124.

투 고 일 : 2012년 12월 15일

심 사 일 : 2012년 12월 20일

심사완료일 : 2013년 1월 11일