

<Short Note>

지하수위 변화에 따른 깊이별 고밀도 오염물질 분포

전우현^{1,2} · 이진용^{1,2,‡} · 박유철³ · 전성천⁴ · 천정용⁴

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 크리티컬존선도연구실

³강원대학교 지구물리학과

⁴(주)지오그린21

요 약

삼염화에틸렌(TCE)은 산업단지지역에서 쉽게 발견되는 지하수 오염물질이다. 본 연구는 TCE로 오염된 대수층에서 양수처리시스템 운영에 따른 지하수위 변화와 TCE 농도 분포를 깊이별로 평가하였다. 이를 위해 강원도 도로관리사업소 내에서 지하수 흐름 방향을 고려하여 설치된 2개의 양수정(KDPW7, KDPW8)과 5개의 관측정(KDMW7, KDMW8, KDMW9, KDMW10, SKW2)을 이용하였으며 2011년 6월 13일부터 2013년 12월 11일까지 모니터링 하였다. TCE 농도 중앙값은 주오염원에서 지하수 흐름 방향을 따라 상류부에서 하류부 관정으로 갈수록 낮아졌다. 또한 TCE 농도 중앙값은 깊이가 깊어질수록 증가하였다가 이후 감소하거나 또는 감소하였다가 증가하지만 결국엔 감소하는 분포특성을 보였다. 전반적으로 깊이가 깊어질수록 감소하는 특성을 보였다. 따라서 고농도 오염원이 있는 깊이에서 수위를 유지하며 양수하는 것이 정화효율을 높일 수 있다.

주요어: 염화유기 용제, 오염물질 분포, 양수처리법, 대수층, 산업단지

Woo-Hyun Jeon, Jin-Yong Lee, Yu-Chul Park, Seong-Chun Jun and Jeong-Yong Cheon, 2017, High density contaminants distribution at different depths by changes in groundwater levels. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 3, p. 467-476

ABSTRACT: Trichloroethylene (TCE) is commonly found contaminant as a in groundwater around industrial complex. We estimated contaminant distribution in different depth by changes of groundwater level in TCE contaminated aquifer for operating pump and treat system. The two pumping wells (KDPW7 and KDPW8) and five monitoring wells (KDMW7, KDMW8, KDMW9, KDMW10 and SKW2) assigned along the groundwater flow direction were installed in the Road Maintenance Office of Gangwon Province. The changes of water levels and TCE concentrations had been monitored from June 13, 2011 to December 11, 2013. The median of TCE concentration decreased from the upper wells to the lower wells by direction of flow of groundwater in the main contaminated area. All median of TCE concentration showed decreasing distribution characteristics, even though it gradually increased then decreased or decreased then increased with increasing of depth. Generally, TCE concentrations decreased when the depth increased. Therefore, the depths that show high contaminants maintain water levels and then operating pump and treat system is the most efficient.

Key words: organic solvent, contaminant distribution, pump and treat, aquifer, industrial complex

(Woo-Hyun Jeon and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Critical Zone Frontier Research Laboratory, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Yu-Chul Park, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Seong-Chun Jun and Jeong-Yong Cheon, GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 08376, Republic of Korea)

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

1. 서론

염화유기용제 중 하나인 삼염화에틸렌(trichloroethylene, TCE)은 산업단지에서 주로 발견되는 고밀도 오염물질이다(Lenczewski *et al.*, 2003; Baek and Lee, 2010; Park *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2016). 염화유기용제는 산업현장에서 주로 금속 및 플라스틱 세정, 드라이클리닝 및 세탁, 기름제거, 전자제품 생산 등에 사용된다(Jackson, 1998). 염화유기용제는 유출 후 토양하부로 이동하고 일부는 토양에 잔존하며 지하수면에 도달해도 물보다 밀도가 커서 기반암과 같은 불투수층을 만나기 전까지 아래로 계속 침투한다(Oolman *et al.*, 1995; Chown *et al.*, 1997; Chambers *et al.*, 2004). 이러한 염화유기용제를 제거하는 전통적인 방법으로 양수처리법(pump and treat)이 있으며 단기간 내에 많은 양의 오염원을 제거할 수 있으나 잔존효과(tailing effect) 및 농도 재상승(rebound) 등의 한계점을 가지고 있다(Oostrom *et al.*, 1999).

우리나라에서는 2001년 부산문현동 오염부지의 정화사업을 시작으로 2009년에 이르러서야 가이아 프로젝트(GAIA Project)의 일환으로 염화유기용제 오염지하수에 대한 현장 정화기술개발에 착수하였다(Baek and Lee, 2010; Yang *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013a, 2013b). 본 연구지역에 대해 양수처리시스템을 활용하여 오염원(plume)의 확산 억제 및 정화를 수행하였으며 장기간 운영에 따른 비용과 목표 농도까지의 저감시간 등의 최적화를 수행하였다. 한편 Lee *et al.* (2013a)은 (구)아스팔트시험실(Asphalt Lab) 뒤편에서 단기양수시험을 수행하였고 주변의 지하수 오염물질 분포 특성을 평가하였다. Lee *et al.* (2013b)은 토양증기추출, 토양세척, 양수처리 등 다양한 저감 기술을 현장에 적용하여 TCE 오염원 제거 및 주요 오염원으로부터 확산방지를 수행하였고 장기모니터링을 통해 TCE 저감을 평가하였다. Jeon *et al.* (2013)은 2011년도 양수처리시스템 운영기간 동안 지하수위와 오염물질 농도 변화를 우기 및 건기에 대해 평

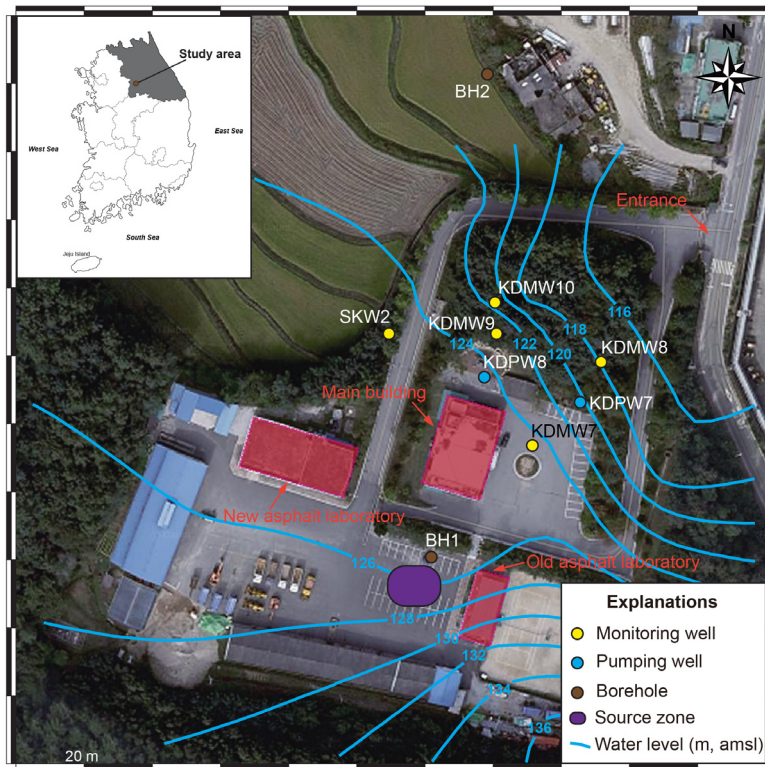


Fig. 1. Location map of the study area showing the pumping (KDPW7 and KDPW8) and monitoring wells (KDMW7, KDMW8, KDMW9, KDMW10 and SKW2). Distribution of water levels (m, amsl) measured in January 2011. Modified from Cheon *et al.* (2016).

가하였으며 Cheon *et al.* (2016)은 2011년도 전체 운영기간 동안 지하수위, TCE 농도, 양수량과의 관계를 평가하였다.

본 연구에서는 염화유기용제 중 TCE로 오염된 대수층에서 양수처리시스템 운영에 따른 지하수위와 TCE 농도 분포를 깊이별로 평가하였다. 기존 연구에서는 비교적 짧은 2011년도 모니터링 자료를 이용하였지만 본 연구에서는 2011~2013년도까지의 장기 모니터링 자료를 이용하였다. 또한 기존 수행된 주변의 지하수 오염물질 분포특성 연구는 수평적 관점이지만 이 연구에서는 3년간의 모니터링 자료를 이용한 실제 고농도 오염원이 분포 가능한 깊이에 대해 수직적인 관점에서 평가하였다. 평가 결과들은 양수처리시스템 운영시 고농도 오염원 위치에 양수 위치를 선정 가능토록 하며 결과론적으로 양수처리 효율을 증대시키는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

2. 연구 방법

2.1 연구지역

연구지역인 도로관리사업소는 강원도 원주시 우

산공단 인근에 위치한다. 도로관리사업소의 (구)아스팔트시험실에서 아스팔트 재료 등의 시험이 수행되었고 시험 후 폐유기용제의 부적절한 처리로 이 지역 TCE 오염의 주된 원인으로 지적되었다(Baek and Lee, 2010; Yang *et al.*, 2012, 2014). 도로관리사업소 뒤편에는 해발고도 205 m의 우두산이 있으며 남에서 북동방향으로 점차 낮아지는 지형이다(그림 1). 지하수 흐름 방향도 지형에 따라 주요오염원이 있는 (구)아스팔트시험실 건물 앞을 지나 본건물을 거쳐 정문이 위치한 북동방향이다. TCE 농도 분포는 양수처리시스템이 운영되기 이전인 2010년 (구)아스팔트시험실 건물 앞인 SKW3에서 최고농도인 13.15 mg/L를 보였다. 지하수 흐름 방향을 따라 본건물 앞 KDMW7에서의 농도는 2.69 mg/L를 보였고 도로관리사업소 정문 부근의 KDPW6에서 0.57 mg/L의 값을 보이며 하류부로 갈수록 TCE 농도는 낮아졌다(그림 2). 또한 연구지역의 고농도 TCE 오염원은 포화대뿐만 아니라 불포화대 지하수위 부근에 잔류상으로 남아 있는 것으로 알려져 있다(Yang *et al.*, 2012).

연구지역 일대의 지질은 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암이 기반암을 이루고 신생대 제4기의 충적층이

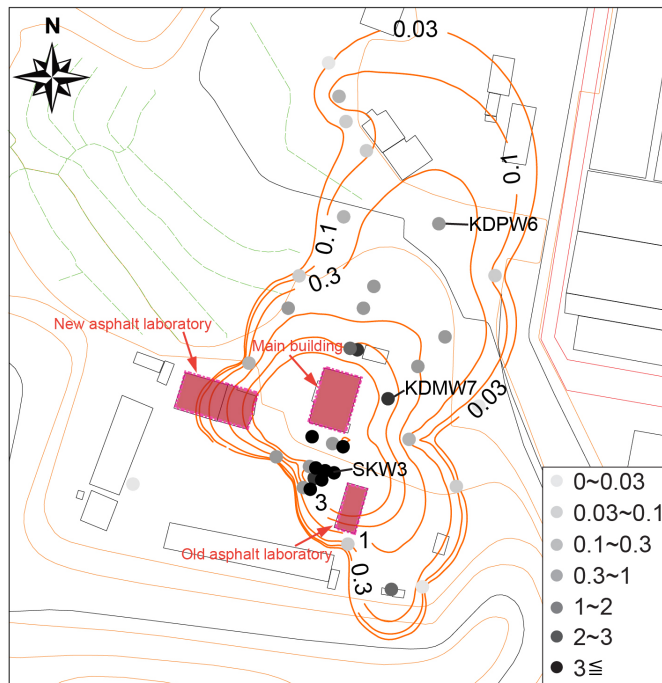


Fig. 2. Distribution of TCE concentrations in groundwater of the study area in 2010 (unit: mg/L). Modified from Cheon (2013).

부정합으로 피복한다(Park *et al.*, 1989). 주오염원 부근의 BH1과 도로관리사업소 외부 논경지에 위치한 BH2의 시추자료를 그림 3에 나타내었다. BH1은 하부 2.3 m까지 20 cm 두께의 아스팔트층(asphalt)과 복토층(reclamation)으로 이루어졌으며 이 복토층은 어두운 갈색의 습윤한 실트질 모래로 구성되어 있다. 하부 6 m까지 갈색과 회색을 띠는 습윤한 풍화토(weathered soil)이며 그 아래 29 m까지는 갈색의 습윤한 모래로 구성된 풍화암(weathered rock)이다. 또한 34 m 하부까지 균열 및 절리가 매우 발달한 어두운 갈색과 회색을 띠는 기반암의 상부층이 있으며 그 아래는 흑운모화강암의 기반암이 나타난다. BH2는 하부 4 m까지 어두운 갈색을 띠는 습윤한 실트질 점토 및 자갈 섞인 모래로 현재 경작지로 사용 중인

충적층(alluvial)이며 그 후 9 m까지 갈색의 습윤한 풍화토이다. 또한 21 m 하부까지 갈색과 회색을 띠는 실트질 모래로 구성된 풍화암이며 25 m 이후부터 흑운모화강암의 기반암이 나타난다.

2.2 모니터링 및 화학분석

양수처리시스템을 운영하기 위해 지하수 흐름 방향과 TCE 농도 분포를 고려하여 유량 조절이 가능한 컨트롤러와 함께 양수정인 KDPW7과 KDPW8을 설치하였다. 양수된 지하수는 수처리시설에서 방류수 기준(0.3 mg/L 이하)으로 처리된 후 방류되었다. 관측정인 KDMW7은 지하수 흐름 방향에서 상류부에 설치되었으며 SKW2를 제외한 KDMW8, KDMW9, KDMW10 관측정은 하류부에 설치되었다. 양수정과

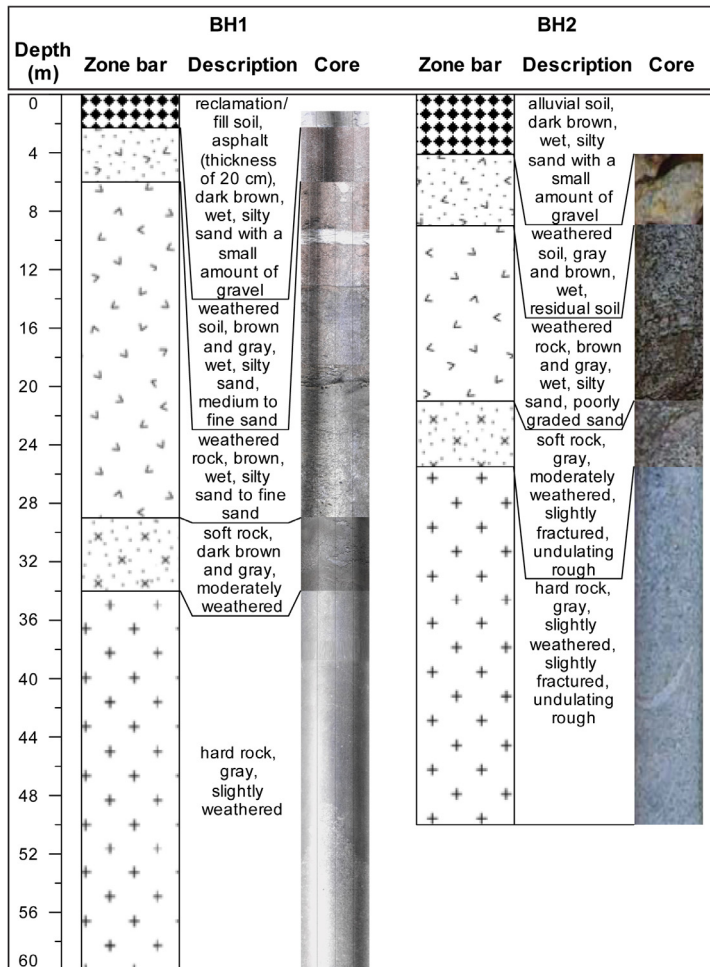


Fig. 3. Vertical geologic section from the logging data of the BH1 and BH2 boreholes.

관측정은 충적 및 풍화대 구간인 지표하 21~30 m 깊이에 설치되었다. 그리고 6 m 구간까지는 케이싱이며 그 후 SKW2를 제외한 나머지 양수정과 관측정은 스크린 구간으로 되어 있다(그림 4). 양수처리시스템 운영전에 수행한 개별 관정(SKW2 제외)에 대한 순간 수위변화시험 결과에 의하면 수리전도도는 $8.74 \times 10^{-5} \sim 3.51 \times 10^{-4}$ cm/sec 범위이다.

양수처리시스템은 2011년에 144일간, 2012년에 109일간 그리고 2013년에 116일간 운영되었다. 그리고 2011년 6월부터 12월까지 5차례에 걸쳐 운영되는 동안 KDPW7과 KDPW8에서 평균 7.1과 11.0 m^3/day 로 양수하였다. 2012년은 4월부터 12월까지 2차례에 걸쳐 운영되었으며 양수량은 평균 11.7과 19.8 m^3/day 이었고 2013년에는 6월부터 12월까지 2차

회에 걸쳐 운영되는 동안 평균 16.2와 21.1 m^3/day 로 양수하였다(표 1).

TCE 농도를 분석하기 위해 양수정에서는 양수된 지하수를 그리고 관측정에서는 교차오염을 방지하기 위해 각 관측정마다 와테라펌프를 이용하여 양수처리시스템 운영기간 동안 하루 한 번 시료 채취하였다. 채취한 지하수 시료는 아이스박스에 4°C 내외로 보관하여 연구지역 근처에 있는 상지대학교 자연과학연구지원센터에 분석을 의뢰하였다. 양수처리시스템 운영기간 동안 양수정과 관측정에서 지하수 위도 함께 측정하였다. 수위측정은 자동수위기록계(Model 3001, Solinst)를 이용하여 매 시간 측정하였으며 수동수위계(Solinst, Canada)는 시료채취 전 측정하였다. 강수자료는 연구지역으로부터 약 4 km

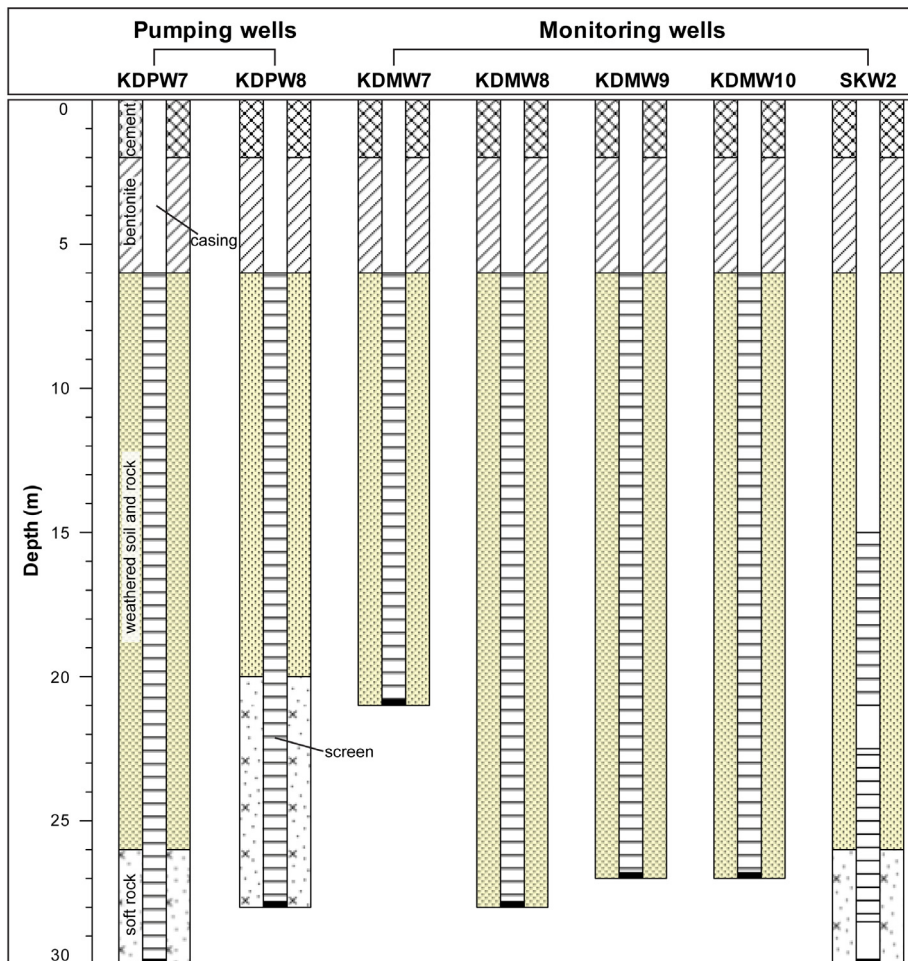


Fig. 4. Specifications of pumping and monitoring wells used in the study area.

Table 1. Summary of the pilot tests periods and pumping rates.

Year	Test	Period (mm/dd)	Duration (days)	Pumping rates (m ³ /day)	
				KDPW7	KDPW8
2011	1 st	06/13~06/17	5	3.9	5.7
	2 nd	06/21~07/01	11	7.0	6.1
	3 rd	07/06~08/06	32	8.4	14.2
	4 th	08/22~09/06	16	8.2	15.8
	5 th	09/19~12/07	80	8.2	13.3
2012	1 st	04/26~06/15	51	11.6	19.9
	2 nd	10/16~12/12	58	11.8	19.6
2013	1 st	06/10~08/30	82	16.4	21.3
	2 nd	11/08~12/11	34	15.9	20.9

떨어진 기상청에서 운영하는 무인관측소(원주 114)에서 양수처리시스템 운영기간인 2011년 6월 11일부터 2013년 12월 11일까지 측정된 일강수량 자료를 이용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 수위와 오염농도

양수처리시스템 운영기간 동안 KDPW7과 KDPW8의 TCE 농도, 수위, 일강수량 자료를 그림 5에 나타내었다. 2011년도 1~3차 운영기간 동안 내린 총 강우량은 1286.8 mm이며 KDPW7의 수위는 강우의 영향으로 지표층을 기준으로 초기수위인 14.8 m 심도보다 2.1 m 상승한 12.7 m로 측정되었다. 이 기간 TCE 농도는 중앙값 0.533 mg/L를 보인다. 4~5차 운영기간은 지속적인 양수와 1~3차 때 보다 적은 강우량(207.6 mm)으로 수위는 지속적으로 하강한다. TCE 농도는 1~3차 운영기간 때와 비슷한 중앙값 0.516 mg/L를 보인다. 일반적으로 TCE 농도는 강우시 희석으로 낮은 농도 값을 보이지만 잔존오염원 또는 주요염원까지 수위가 상승함에 따라 농도가 낮아지지 않은 것으로 판단된다(Yang *et al.*, 2012; Jeon, 2013; Cheon *et al.*, 2016).

2012년도 1차 운영기간 동안 수위는 중앙값 18.5 m, 2차에는 중앙값 17.3 m로 1.2 m 상승하였는데 이는 1차와 2차 운영기간 사이에 1001.3 mm의 강우가 있었기 때문이다. TCE 농도는 1차에 중앙값 0.355 mg/L, 2차에 중앙값 0.232 mg/L를 보여 2011년도 운영기간의 TCE 농도 보다 크게 감소하였다. 이는 2011년

도 운영기간 동안 수위는 지표로부터 12.7~14.8 m 범위였지만 2012년도에는 1차 수위의 중앙값은 18.5 m, 2차 17.3 m로 수위가 크게 하강하였고 양수처리시스템이 운영됨에 따라 수처리시설에서 방류수 기준(0.3 mg/L)으로 기존의 TCE 오염물질도 처리되었기 때문에 전년도 보다 낮은 TCE 농도값을 보인다. 또한 2013년도 1~2차 수위의 중앙값은 각각 19.0, 19.3 m로 전년도 보다 더 하강하였고 TCE 농도의 중앙값도 각각 0.139, 0.145 mg/L로 방류수 기준치(0.3 mg/L) 이하로 농도가 낮아진 것을 확인할 수 있다.

KDPW8의 2011년도 1~3차 운영기간 동안 수위는 지표로부터 측정된 초기수위 11.1 m에서 강우의 영향으로 9.9 m까지 1.2 m 상승한다. TCE 농도 중앙값은 1.289 mg/L로 같은 기간 KDPW7의 TCE 농도보다 2배 이상 높은 것으로 나타났다. 이는 KDPW8의 최고 수위가 9.9 m로 12.7 m인 KDPW7수위 보다 2.8 m 높아 고농도 TCE 오염원 부근까지 수위가 상승한 것으로 판단된다. 또한 폐기유기용제의 양 및 처리 등의 과거 기록이 없고 무분별한 투기로 TCE 오염원이 도로관리사업소 내에 산재해 있기 때문인 것으로 판단된다(Yang *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013a). 4~5차 운영기간 동안 수위는 초기수위 11.1 m에서 최대 17.1 m까지 하강한다. TCE 농도는 중앙값 1.036 mg/L이며 1~3차 때 보다 감소하였다.

2012년도 1~2차 운영기간 동안 수위의 중앙값은 각각 17.1, 18.1 m이며 TCE 농도 중앙값은 0.688, 0.563 mg/L로 수위 하강과 함께 TCE 농도 감소를 보인다. 2013년도 1차 운영기간 수위 중앙값은 17.6 m이며 TCE 농도의 중앙값은 0.29 mg/L이다. 2차

운영기간 동안 수위의 중앙값은 17.3 m이며 TCE 농도의 중앙값은 0.382 mg/L로 직전 운영기간 TCE 농도 중앙값 보다 소폭 증가 하였다. 수위보다 위 지점에 고농도 오염원이 있는 경우 강우 또는 양수 중단 등으로 수위가 회복되면 TCE 농도가 높아진다. 반대로 수위보다 위 지점에 저농도 또는 오염원이 없는 경우 강우에 의한 희석으로 농도가 낮아질 수 있다(Yang *et al.*, 2012; Jeon, 2013; Jeon *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013a; Cheon *et al.*, 2016).

3.2 깊이에 따른 TCE 분포

3.2.1 양수정

수위 변화에 따른 TCE 농도 분포를 깊이별로 그림 6에 나타내었다. KDPW7의 TCE는 12~20 m 사이에 분포하며 깊이 12~14 m까지 TCE 중앙값은 각각 0.472, 0.485, 0.569 mg/L로 점차 증가한다. 15~16 m 깊이의 TCE 농도 중앙값은 0.531과 0.511 mg/L로 소폭 감소하기 시작하며 17~18 m 깊이에서 TCE 농도 중앙값은 각각 0.233, 0.254 mg/L로 크게 감소한다. 그 후 20 m까지 TCE 농도 중앙값은 더 낮아진다. 수위 변화에 따른 깊이별 TCE 농도 분포를 통해

KDPW7의 경우 16 m 깊이까지 오염원에 의한 고농도 TCE 오염원이 있고 그 이후부터는 저농도 TCE가 분포하고 있는 것으로 판단된다.

KDPW8의 TCE는 9~18 m 깊이에 분포한다. 최초 9 m 깊이의 TCE 농도 중앙값은 0.499 mg/L이며 이후 10 m 깊이에서 가장 높은 TCE 농도 중앙값인 1.27 mg/L을 보인다. 11~13 m 깊이의 TCE 농도 중앙값은 소폭으로 감소와 증가를 반복한 후 15 m 깊이에서 TCE 농도 중앙값은 크게 감소한 0.497 mg/L을 보인다. 16 m 깊이에서 TCE 농도 중앙값은 0.643 mg/L로 다시 상승한 후 17 m 깊이에서 0.385 mg/L로 감소하고 18 m 깊이에서 다시 상승한 0.480 mg/L의 값을 보인다. 깊이가 증가함에 따라 TCE 농도 중앙값은 전반적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며 KDPW8은 10~13 m 깊이에 오염원에 의한 고농도 TCE 오염원이 분포하고 이후 15~18 m 깊이에는 상부 깊이보다 상대적으로 낮은 저농도 TCE 오염원이 분포되어 있을 것으로 평가된다.

3.2.2 관측정

KDMW7은 양수정 하류부 관측정보다 양수에 의

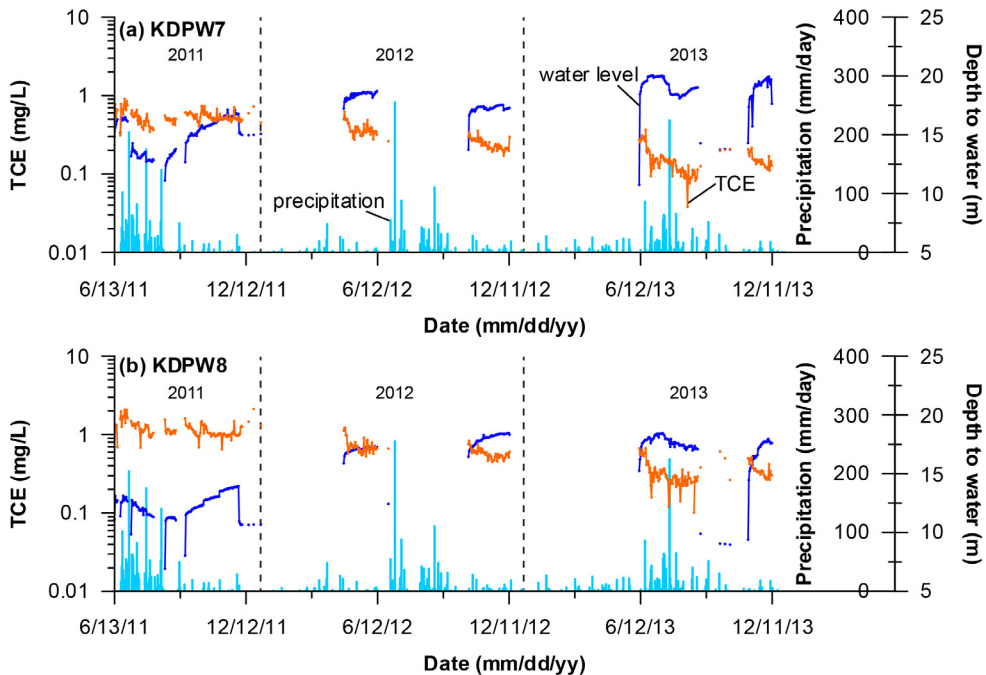


Fig. 5. TCE concentrations, water levels and precipitation in the pumping (KDPW7 and KDPW8) wells from June 13, 2011 to December 11, 2013.

한 수위 강하가 작으며 TCE는 6~11 m 깊이에 분포한다. 최초 6 m 깊이의 TCE 농도 중앙값은 0.426 mg/L이며 7 m 깊이부터 크게 상승하여 최고 농도인 중앙값 1.871 mg/L를 보인다. 지하수 흐름 방향의 상부에 위치한 KDMW7 관측정은 (구)아스팔트실험실 건물 앞 주요오염원에서 지하수 흐름을 따라 이동하는 TCE를 처음 관측하는 지점으로 다른 양수정이나 관측정보보다 상대적으로 TCE 농도가 높다. 최고농도를 보인 후 10 m 깊이까지 TCE 농도 중앙값은 각각 1.572, 0.703, 0.585 mg/L를 보이며 감소하다가 11 m 깊이에서 0.933 mg/L로 증가한다. KDMW7은 전반적으로 6~11 m 깊이에 고농도 TCE 오염원이 있는 것으로 판단된다. KDMW8은 8~13 m 깊이에 TCE가 분포한다. 8~9 m 깊이의 TCE 농도 중앙값은 각각 0.662, 0.627 mg/L로 비슷하며 이후 10 m 깊이에서 0.208

mg/L 감소한다. 11 m 깊이에서 TCE 농도 중앙값은 0.587 mg/L로 다시 증가한 후 12~13 m 깊이까지 0.331, 0.260 mg/L로 감소한다. 양수정에서 상당량의 TCE 오염원을 포획하여 양수정 하류부 위치한 KDMW8은 상대적으로 TCE 농도가 낮다.

KDMW9의 TCE는 13~18 m 깊이에 분포하며 수위 하강에 따른 TCE 농도 중앙값의 감소가 뚜렷하게 나타난다. KDMW10의 TCE는 18~23 m 깊이에 분포하며 18~19 m 깊이에서 TCE 농도 중앙값은 각각 0.052, 0.078 mg/L이며 20 m 깊이에서 0.172 mg/L로 상승한 후 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 KDMW10은 깊이가 증가함에 따라 TCE 농도 중앙값은 증가하였다가 이후 감소하는 것을 볼 수 있다. SKW2는 4~11 m 깊이에 TCE가 분포하며 최초 4 m 깊이의 TCE 농도 중앙값은 0.208 mg/L로 가장

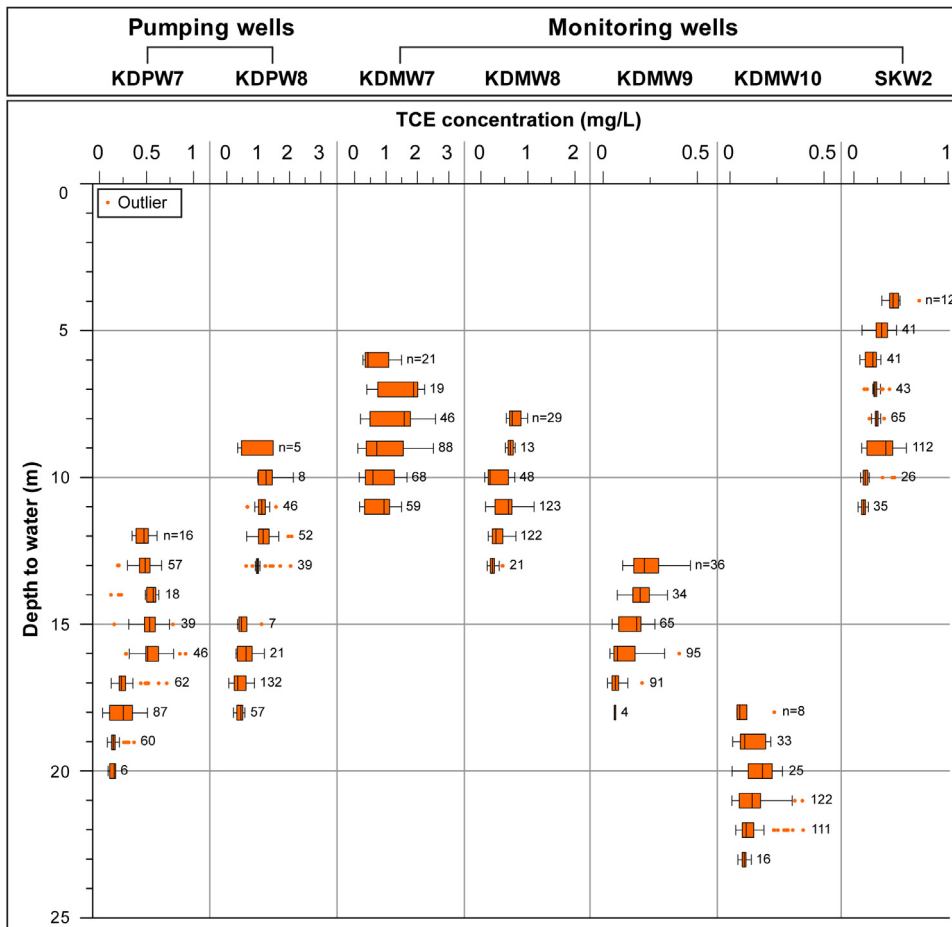


Fig. 6. Distribution of TCE concentrations with different depths in the wells.

높았다. 이후 TCE 농도 중앙값은 6 m 깊이까지 감소하다가 7 m 깊이부터 다시 증가하여 9 m 깊이에서 0.169 mg/L를 보인다. 10~11 m 깊이의 TCE 농도 중앙값은 각각 0.060, 0.052 mg/L이다. SKW2의 경우 깊이가 증가함에 따라 TCE 농도 중앙값은 감소하였다가 다시 증가하지만 결국엔 감소하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 TCE로 오염된 대수층에서 양수처리시스템 운영에 따른 수위 변화와 TCE 오염물질의 분포를 깊이별로 평가하였다. TCE 농도 중앙값은 깊이가 깊어짐에 따라 증가하였다가 이후 감소하거나 또는 감소하였다가 증가하지만 다시 감소하였다. 전반적으로 깊이가 증가함에 따라 TCE 농도는 감소하는 경향을 보였다. 상부에 위치한 KDMW7 관측정의 TCE 오염원은 7 m 깊이에서 다른 관정들보다 가장 높은 1.871 mg/L의 TCE 농도 중앙값을 보였으며 2011년 10월 11일에 최고농도인 2.578 mg/L를 보였다. 양수정에서는 KDPW7보다 KDPW8에서 TCE 중앙값 농도가 높았다. 하루부 관측정의 TCE 농도 중앙값은 양수처리시스템 운영에 따른 TCE 오염원의 제거와 수위하강으로 감소하였다.

적정 양수량을 넘어 양수시 지하수위는 지속적으로 하강하게 되고 고농도인 TCE 주요오염원을 지나 상대적으로 저농도 오염원이 분포하는 깊이에서 양수처리시스템이 운영되면 시간과 비용적인 측면에서 비효율적일 수 있다. 또한 강우시 수위상승은 동반되며 TCE 농도는 강우의 영향으로 희석되기도 하지만 강우 전 수위보다 강우 후 높아진 수위로 인해 상부 고농도 오염원에 수위가 도달하면 TCE 농도는 높아질 수 있다. 따라서 강우의 영향을 고려하여 깊이에 따라 TCE 오염원의 분포를 모니터링하고 오염원에 의한 고농도 오염원이 있는 깊이에 수위를 유지하며 양수량을 결정하는 것이 정화효율을 높일 수 있다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업(173-092-010)”에서 지원받았습니다. 또한 이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국

연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2015R1A4A1041105).

REFERENCES

- 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.
- Chambers, J.E., Loke, M.H., Ogilvy, R.D. and Meldrum, P.I., 2004, Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography. *Journal of Contaminant Hydrology*, 68, 1-22.
- Cheon, J.Y., 2013, Remediation studies for DNAPL contaminated aquifer: Focus on pump-and-treat system. Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Cheon, J.Y., Jeon, W.H., Lee, J.Y., Park, Y., Jun, S.C. and Lee, K.K., 2016, Relationship between water levels and TCE concentrations during pump-and-treat tests for a TCE-contaminated aquifer. *Journal of Soil and Groundwater Remediation*, 3, 1-17.
- Chown, J.C., Kueper, B.H. and McWhorter, D.B., 1997, The use of upward hydraulic gradients to arrest downward DNAPL migration in rock fractures. *Groundwater*, 35, 483-491.
- Jackson, R.E., 1998, The migration, dissolution, and fate of chlorinated solvents in the urbanized alluvial valleys of the southwestern USA. *Hydrogeology Journal*, 6, 144-155.
- Jeon, W.H., 2013, Variation of TCE, CF and CT concentration using pump and treat in a DNAPL contaminated area. Master's Thesis, Kangwon National University, Gangwon, Korea (in Korean).
- Jeon, W.H., Lee, J.Y., Kwon, H.P., Jun, S.C. and Cheon, J.Y., 2013, Evaluation of contaminant concentrations in wet and dry seasons during pump-and-treat pilot tests. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 18(6), 18-31.
- Lee, J.Y., Kwon, H.P., Jeon, W.H., Jun, S.C. and Cheon, J.Y., 2013a, Simultaneous evaluation of distribution characteristics of hydraulic parameters and groundwater contaminants estimated by a short-term pumping. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 275-287 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.S., Kim, H.M., Lee, S.H., Yang, J.H., Koh, Y.E. and Lee, K.K., 2013b, Evidences of in situ remediation from long term monitoring data at a TCE-contaminated site, Wonju, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*,

- 18(6), 8-17.
- 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.
- Oolman, T., Godard, S.T., Pope, G.A., Jin, M. and Kirchner, K., 1995, DNAPL flow behavior in a contaminated aquifer: Evaluation of field data. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 15, 125-137.
- Ostrom, 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, B.K., Chang, H.W. and Woo, Y.K., 1989, Geological report of the Wonju sheet (scale 1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources.
- Park, Y.C., Jeon, J.M., Eom, S.I. and Jeon, U.P., 2011, Optimal management design of a pump and treat system at the industrial complex in Wonju, Korea. *Geosciences Journal*, 15, 207-223.
- 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.
- Yang, J.H., Jun, S.C., Kwon, H.P. and Lee, K.K., 2014, Tracing of residual multiple DNAPL sources in the sub-surface using ^{222}Rn as a natural tracer at an industrial complex in Wonju, Korea. *Environmental Earth Sciences*, 71, 407-417.

Received : March 17, 2017

Revised : April 26, 2017

Accepted : May 9, 2017