

## 지하수 유동 방향에 대한 관정배열이 분배추적자 시험에 미치는 영향 분석

김보아<sup>1</sup> · 김용철<sup>1\*</sup> · 여인욱<sup>2</sup> · 고경석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원

<sup>2</sup>전남대학교 지구환경과학과

## An Experimental Study of the Effect of the Test-well Arrangement on the Partitioning Interwell Tracer Test for the Estimation of the NAPL Saturation

Bo-A Kim<sup>1</sup> · Yongcheol Kim<sup>1\*</sup> · In Wook Yeo<sup>2</sup> · Kyung-Seok Ko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM)

<sup>2</sup>Department of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonmma National University

### ABSTRACT

Partitioning interwell tracer test (PITT) is a method to quantify and qualify a site contaminated with NAPLs (Non-Aqueous Phase Liquids). Analytical description of PITT assumes that the injection-pumping well pair is on the line of the ambient groundwater flow direction, but the test-well pair could frequently be off the line in a real field site, which could be an erroneous factor in analyzing PITT data. The purpose of this work is to study the influence of the angle of the test-well pair on the ambient groundwater flow direction based on the result from PITT. From the experiments, it was found that the obliqueness of the test-well pair to the ambient groundwater flow direction could affect the tracer test resulting in a decreased NAPL estimation efficiency. In case of an oblique arrangement of the test-well pair to the ambient flow direction, it was found that the injection of a chase fluid could enhance the estimation efficiency. An increase of the pumping rate could enhance the recovery rate but it cannot be said that a high pumping rate can increase the test efficiency because a high pumping rate cannot give partitioning tracers enough time to partition into NAPLs. The results have a implication that because the arrangement of the test-well pair is a controlling factor in performing and interpreting PITT in the field in addition to the known factors such as heterogeneity and the source zone architecture, flow direction should be seriously considered in arranging test-ell pair.

**Key words :** Partitioning interwell tracer test (PITT), Test-well arrangement, Chase fluid, NAPLs (Non-aqueous Phase Liquids), Pumping rate

### 1. 서 론

유기화합물 관련 산업의 발전과 이용이 증가함에 따라 지하로 누출된 유류에 의한 토양 및 지하수의 오염사고가 증가하고 있으며, 유기오염물의 의학적 독성과 정화에 대한 많은 관심과 연구가 진행되고 있다(Brusseau et al., 1999). 서울, 평택, 경기 지역 등에 있는 미군기지에서 지하수 · 토양 오염, 유기용제의 사용으로 인한 오염사례가 보고되고 있으며(Wonju city, 2003), 오염 지역에서 발견되는 오염물질의 성상은 주로 비수용성유기오염물질(NAPL :

Non-aqueous Phase Liquid)이다.

NAPL은 물보다 밀도가 작은 LNAPL(Light Non-aqueous Phase Liquid)과 밀도가 큰 DNAPL(Dense Non-aqueous Phase Liquid)로 분류할 수 있다. 그 중 DNAPL은 중력 방향으로 이동하여 암반절리까지 침투 할 수 있어 정화 설계 시 오염범위와 오염위치의 파악에 어려움이 따른다(Mayer and hassanizadeh, 2005). DNAPL 종류 중 유기용제로 많이 사용했던 TCE(Trichloroethylene)는 위해성에 대한 인식 부족으로 인하여 공장지대나 군부대에서 기름때를 씻겨낼 수 있는 세척용매로 많이 사용되었다. 최

\*Corresponding author : yckim@kigam.re.kr

Received : 2014. 4. 18 Reviewed : 2014. 5. 23 Accepted : 2014. 5. 23

Discussion until : 2014. 8. 31

근까지 국내에서도 TCE로 오염된 지하수에 대한 연구가 진행되고 있으며(Jo et al., 2010, Lee et al., 2013, Park et al., 2013) 토양 및 지하수 오염 지역에서 효과적인 정화 설계 시 해당 지역의 오염물질 농도 및 종류, 오염 물질의 분포도, 지하수의 수리학적 특성 등을 파악하는 것이 중요하다. 추적자 시험은 최소한의 굴착으로 관심지역을 전체적으로 평가할 수 있으며 상대적으로 넓은 지역을 연속적인 공간적 측정이 가능하여 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다(Jin et al., 1995; Dwarakanath et al., 1999). 또한 자연에 노출된 여러 가지 오염물질이 어떤 과정과 경로를 통해서 지하 매질을 이동하는지 파악하고자 할 때 가장 결정적인 정보를 제공한다는 장점을 갖고 있다(Lee et al., 1999). 그 중 분배추적자 시험(PITT: Partitioning Interwell Tracer Test)은 NAPL 정량화를 목적으로 1990년대 중반에 도입되었으며(Jin et al., 1995; Deeds et al., 1999), NAPL로 오염된 대수층 및 토양 내 오염물질의 양, 오염원 분포를 예측하는 새로운 모니터링 방법으로 최근 많이 연구되고 있다(Annable et al., 1998; Kim et al., 2006; Wang et al., 2013). 추적자 시험 중 관정 내에 남아있는 추적자를 밀어내기 위해 추격수를 사용한 사례도 있다(Guvanasen et al., 1987). 분배추적자 시험은 농도 구배에 의해 NAPL에 분배되는 분배추적자(partitioning tracer)와 분배되지 않는 보존추적자(conservative tracer)의 체류시간(residence time) 차이에 의하여 NAPL을 정량화, 정성화 하는 방법이다. 불확실한 인자를 제거할 수 있는 실내실험과 달리 현장에서는 시험 결과에 영향을 미칠 수 있는 대수층의 불균질성, 각 관정별 절리의 연결성, 오염원의 위치, 지하수 유동 방향에 어긋난 관정배열 등의 다양한 인자들이 존재하기 때문에, 시험 결과를 수치적으로 또는 해석적으로 분석할 때 신중한 접근이 필요하다.

현장에서의 관정배열은 지하수 유동 방향에 영향을 미치는 요인 중 가시적으로 쉽게 확인할 수 있는 지형구배에 의존하게 되는데, 실제 지하수 유동 방향은 배열된 관정의 주 방향과 어긋나 있는 경우가 많이 발생한다(Fig. 1). 기존의 분배추적자 시험에서는 주입정과 양수정이 지하수 흐름 방향과 평행하게 배열되어 있다고 가정하고 다른 영향 인자들에 대한 연구가 있었지만, 관정 배열이 지하수 흐름과 어긋나는 경우에 대한 고찰이 없었다.

따라서 본 연구에서는 지하수 유동 방향에 대한 관정배열이 분배추적자 시험 결과에 미치는 영향을 파악하고 어긋난 관정 배열에 의한 영향을 저감할 수 있는 방법을 대수층 모형을 이용하여 파악하고자 하였다.

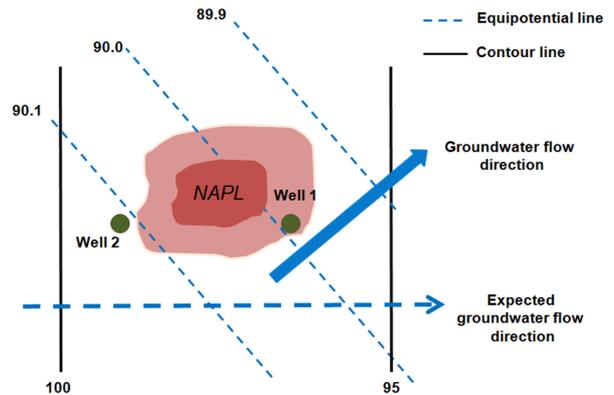


Fig. 1. An example of the arrangement of test-well pair off the line of the ambient groundwater flow direction in a real field site, resulting from the biased estimation of the flow direction based on topographic gradient.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 대수층 물리 모형

실내에서 분배추적자 시험을 실시하기 위해 대수층 물리 모형을 제작하였다. 대수층 물리 모형은 크기가  $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.15\text{ m}$  (L × D × H)로 스테인리스 재질로 5면을 제작하고 시야확보를 위해 윗면은 강화아크릴판을 이용하였다(Fig. 2). 실험에 사용된 모래는 흐르는 물에서 가벼운 물질이나 먼지 등의 부유물을 제거 한 강사를  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  오븐에서 24시간 건조시킨 후  $250\sim 850\text{ }\mu\text{m}$  범위의 모래만 분리한 후 사용하였다. 모형 안에 모래를 채우는 동안 모래에 공기가 들어가지 않도록 물을 먼저 채우고 나중에 모래를 채우는 wet-packing 방식을 적용하였다. 물리 모형 내 대수층은 자유면 대수층이 되도록 상부는 대기 중에 노출시켰다.

시험용 관정의 스크린은 내경 1 cm인 테플론 재질 파이프에 0.1 mm 크기의 구멍을 시료 채취구간에만 착공하여 제작하였다. 스크린 구멍은 상하 0.5 cm 간격으로 심도별로 테플론 파이프 둘레를  $45^{\circ}$  간격으로 착공하였으며 모래가 관정내로 들어가지 않도록 200 mesh 스테인리스 철망으로 스크린 주변을 감싸주었다. 관정 배치는 중앙 관정 중심으로  $45^{\circ}$  간격으로 8방향으로 배열하였다.

대수층 물리 모형 양 끝단에 폭 5 cm 크기의 저류지(reservoir)를 설치하여 대수층 모형 양측면의 전면으로 지하수 유입과 유출이 균일하게 이루어지도록 하였다. 양 끝단의 저류지는 월류방식의 일정 수두 유지 장치에 8 mm 튜브를 통해 연결시켰으며, 상류수두와 하류수두 유지장치에서 월류되는 월류수는 각각 다른 배수탱크로 흘러가도록 8 mm 튜브로 연결시켰다.

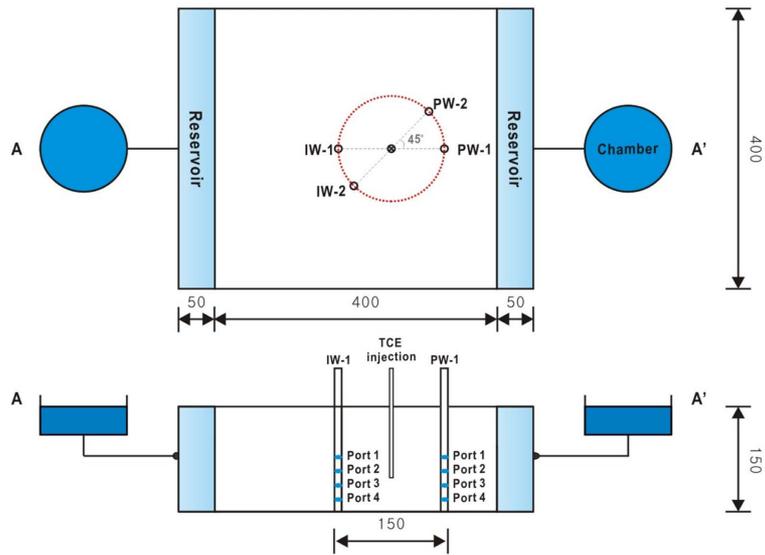


Fig. 2. A schematic drawing of the experimental setup (Injection Well : IW-1, IW-2), Pumping Well : PW-1, .PW-2).

2.2. 분배추적자 시험 방법

오염물질은 TCE(Trichloroethylene)로 선정하였고, TCE 주입 시 육안으로 구별이 용이하게 하기 위해 소수성 염료인 Sudan(IV)를 혼합하였다. 주입정-양수정의 중간에 위치한 지점에서 지표로부터 심도 10 cm에 총 9.8 ml를 유리주사기를 이용하여 1시간 동안 주입하였다. 본 연구에서 보존추적자로는 브롬이온(Bromide, Br<sup>-</sup>)을 사용하였고 분배추적자로는 미생물과 반응이 없고 비교적 물에 잘 용해되는 알코올 추적자인 DMP(2,4-dimethyl-3-pentanol)와 6M2H(6-methyl-2-heptanol)을 사용하였다. 분배추적자의 분배계수(K<sub>n</sub>)는 NAPL에 대한 추적자의 분배 정도 또는 지연되는 정도를 결정하는 중요한 인자인데(Rhee et al., 2007), 시험 전에는 오염량을 알 수 없으므로 분배계수가 서로 다른 여러 개의 분배추적자를 사용해야한다(Nelson and Brusseau., 1996; Kim, 2004). 이 연구에서는 기존 연구에 사용된 분배추적자를 문헌 조사하여 실험목적 및 방법에 적절한 분배계수를 가지는 추적자를 선정하였다. DMP와 6M2H의 분배계수는 각각 22.40과 193.24이다. 추적자 농도는 시험 시작 전 미리 시료를 채취하여 제조된 추적자 값을 얻었으며 각 추적자별 농도범위는 Br가 99.90~124.47 mg/L, DMP가 69.35~167.92 mg/L, 6M2H는 43.53~142.71 mg/L이다. 특히 분배추적자는 물에 대한 용해도가 낮기 때문에 교반장치를 사용하여 24시간 동안 용해시킨 후 사용을 하였다.

실내 물리 모형은 분급한 모래를 이용하여 자유면대수층을 설정하고 불포화대는 5 cm 두께로 유지하면서 주입

정과 양수정에 마노미터를 연결하여 수위를 확인하였다. 수위가 안정화 된 후 TCE를 누출시켰다. 추적자용액은 연동펌프를 이용하여 심도별로 주입 및 양수하였으며 다섯 번 반복 측정을 통해 평균 주입율을 산출하였다. 기존 연구에 의하면 누출된 오염물의 분포가 수직적으로 불균질하므로 시험의 정밀성을 높이기 위해 다중심도에서 농도이력을 관찰하는 것이 필요하며(Nelson and Brusseau., 1996; Kim, 2012), 이에 근거하여 주입정과 양수정은 관측 심도에 맞추어 다중관정으로 제작하였다.

지하수 유동방향에 대한 관정배열이 일치하는 경우(PITT-I(Q<sub>low</sub>, 0°))와 어긋나는 경우(PITT-II(Q<sub>low</sub>, 45°))를 각각 0도와 45도로 설정하여 시험을 실시하였다(Fig. 2). 추적자의 주입율과 양수율은 각각 1.39 × 10<sup>-7</sup> m<sup>3</sup>/s와 1.36 × 10<sup>-7</sup> m<sup>3</sup>/s이다. 지하수 유동 방향에 대한 관정배열이 어긋나는 경우 주입정과 관측정의 수리적 연결성이 낮아서 추적자 시험이 적절히 수행되지 않았을 경우를 대비하여 연결성을 높이기 위해서 추적자 주입정의 영향 반경을 증가시키거나 관측정의 양수에 의한 영향 반경을 증가시키는 방법을 고려하였다. 추적자 주입정의 영향 반경을 증가시키기 위해 추격수를 Kang et al.(2005)의 경우처럼 추적자 성분이 함유되지 않은 증류수를 추적자용액 주입속도와 동일하게 주입하면서 시험을 수행하였다(Post-PITT-II(Q<sub>low</sub>, 45°)). 주입정과 관측정의 영향 반경을 증가시키기 위해 주입율과 양수율을 각각 1.24 × 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s와 1.02 × 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s으로 증가시켜 시험을 수행하였다(PITT-II(Q<sub>high</sub>, 45°)). 분배추적자 시험 조건은 Table 1에 요약하였다.

**Table 1.** Experimental conditions for the tracer tests in an unconfined aquifer

| Parameter                        | Value                          |      |                                  |      |                                   |      |
|----------------------------------|--------------------------------|------|----------------------------------|------|-----------------------------------|------|
|                                  | PITT-I (Q <sub>low</sub> , 0°) |      | PITT-II (Q <sub>low</sub> , 45°) |      | PITT-II (Q <sub>high</sub> , 45°) |      |
|                                  | Pre                            | Post | Pre                              | Post | Pre                               | Post |
| <b>Tracer</b>                    |                                |      |                                  |      |                                   |      |
| Species                          | Br <sup>-</sup> as NaBr        |      | DMP                              |      | 6M2H                              |      |
| Input concentration (mg/l)       |                                |      | 100                              |      |                                   |      |
| <b>Injection phase</b>           |                                |      |                                  |      |                                   |      |
| Rate (m <sup>3</sup> /s)         |                                |      | 1.39 × 10 <sup>-7</sup>          |      | 1.24 × 10 <sup>-6</sup>           |      |
| Total injected volume (ml)       |                                |      | 752.4                            |      | 556.2                             |      |
| Duration (min)                   | 90                             |      | 90                               |      | 30                                |      |
| <b>Withdrawal phase</b>          |                                |      |                                  |      |                                   |      |
| Depth of sampling points (cm)    |                                |      | 7.0, 9.0, 11.0, 13.0             |      |                                   |      |
| Rate (m <sup>3</sup> /s)         |                                |      | 1.36 × 10 <sup>-7</sup>          |      | 1.02 × 10 <sup>-6</sup>           |      |
| Dominant sampling interval (min) |                                |      | 5                                |      |                                   |      |

**2.3. 시료 채취 및 분석 방법**

분배추적자 시험에서 보존추적자인 Br<sup>-</sup>, 분배추적자인 DMP와 6M2H를 분석하기 위해 시료를 채취하였다. 알코올 분배추적자의 휘발을 없애기 위해 20 mL 유리병에 TCE와 비 반응성 물질인 테플론뚜껑을 이용하여 head space없이 가득 채워 밀봉시켰다. 밀봉된 시료를 불꽃이온화 검출기(Flame Ionization Detector, FID)가 설치된 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)를 이용하여 분석하였다. 일정비율의 헥산(5 mL)으로 농도를 추출하였으며 GC 오븐을 50°C에서 시작하여 분당 50°C 올리는 조건에서 TCE는 10.695분, DMP는 16.061분, 6M2H는 20.615분에 검출되었다. 분배추적자 분석을 수행한 후 보존추적자 Br<sup>-</sup>은 설정된 표준용액의 최고농도에 맞추어 약 11배 희석을 수행한 후 이온크로마토그래피(Ion Chromatography, IC)를 이용하여 농도 분석을 수행하였다.

**2.4. 해석 방법**

분배추적자 시험을 통해 얻은 농도이력곡선의 모멘트 분석을 통해 추적자의 평균체류시간, 선속도, 분산계수, NAPL 포화도 및 NAPL 부피를 추정하였다.

농도이력곡선의 모멘트 분석법을 이용하여 추적자의 평균시간과 분산 정도를 파악할 수 있다. 추적자가 순간적으로 주입될 경우, 일차 모멘트 (M<sub>1</sub>)와 이차 중심모멘트 (μ<sub>2</sub>)를 다음의 식 (1)과 식 (2)와 같이 각각 구할 수 있다(Yu et al., 1999; Kim, 2004).

$$M_1 = \frac{\int_0^\infty tC(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt} \tag{1}$$

$$\mu_2 = \frac{\int_0^\infty (t-M_1)^2 C(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt} \tag{2}$$

여기서, t는 추적자 채취 시간, C(t)는 시간에 따른 추적자의 농도이다. 계산된 일차 모멘트 (M<sub>1</sub>)와 이차 중심모멘트 (μ<sub>2</sub>)를 이용하여 다음의 식 (3)과 식 (4)와 같이 지하수 유속 (v)과 분산계수 (D)를 구하였다.

$$v = \frac{z}{M_1 - t_0/2} \tag{3}$$

$$D = \left( \mu_2 - \frac{t_0^3}{12} \right) \frac{v^3}{2z} \tag{4}$$

여기서, z는 추적자 주입정과 양수정 사이의 거리, t<sub>0</sub>는 추적자 주입시간이다.

주입정에 주입된 보존추적자와 두 종류의 분배추적자는 지하수의 수리구배 의한 추출정에서 시료 채취 또는 양수를 통해 회수된다. 주입한 추적자 양에 대한 회수된 추적자의 비인 회수율, Ri(% , recovery rate)은 식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$R_i = \frac{\int_0^\infty Q(t)C(t)dt}{Q_{inj}C_{inj}t_{inj}} \times 100 \tag{5}$$

여기서, Q(t)는 양수율, C(t)는 검출된 추적자 농도, t는 시간, Q<sub>inj</sub>는 주입율, C<sub>inj</sub>는 주입된 추적자 농도, t<sub>inj</sub>는 추적자 주입시간이다.

추적자의 체류시간은 주입된 추적자의 질량 중심이 관

측정에 도달하는데 소요되는 시간이며 이것은 추적자가 대수층을 이동하는 속도와 관련 있다. 채취된 추적자의 농도이력곡선에서 체류시간을 구하기 위해 식 (6)과 같이 시간 모멘트 방법을 이용했다(Yu et al., 1999; Kim, 2004).

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{t_s} tC(t)dt}{\int_0^{t_s} C(t)dt} - \frac{t_s}{2} \quad (6)$$

여기서,  $t_s$ 는 추적자 주입 시간,  $t_f$ 는 분배추적자 시험 시간,  $C(t)$ 는 경과 시간에 따라 채취된 추적자의 농도이다. 지연계수 ( $R_f$ )는 보존추적자의 체류시간 ( $\bar{t}_c$ )과 분배추적자의 체류시간 ( $\bar{t}_p$ )의 비로 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다(Park et al., 2006).

$$R_f = \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_c} = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta_w} + \frac{S_N K_N}{(1-S_N)} \quad (7)$$

여기서,  $\rho_b$ 는 용적밀도,  $\theta_w$ 는 수분함유량,  $K_d$ 는 NAPL의 토양-물 흡착 계수,  $K_N$ 는 NAPL-물 분배계수이며 계산된 지연계수 ( $R_f$ )를 이용하여 NAPL의 포화도( $S_N$ )를 산출 할 수 있다(Nelson and Brusseau, 1996). 식 (7)은 분배추적자가 토양매질에 흡착될 경우에 적용가능하며 흡착이 없다고 가정( $K_d=0$ )하고 NAPL 포화도로 정리하면 식 (8)과 같다.

$$S_N = \frac{R_f - 1}{(K_N - 1) + R_f} \quad (8)$$

계산된 NAPL의 포화도( $S_N$ )와 보존추적자 체류시간( $\bar{t}_c$ )를 이용하여 추적자가 지나간 공극부피( $V_p$ ; tracer-swept pore volume)를 얻을 수 있다(Young et al., 1999). NAPL의 포화도( $S_N$ )와 추적자가 지나간 공극부피( $V_p$ )를 이

용하여 NAPL의 부피( $V_N$ )를 구할 수 있다.

$$V_P = \frac{m Q \bar{t}_c}{M(1-S_N)} \quad (9)$$

$$V_N = S_N V_P \quad (10)$$

여기서  $m$ 는 양수정에서 채취된 추적자 양,  $M$ 는 주입된 추적자 총 양,  $Q$ 는 주입된 양이다. 양수정에서 채취된 추적자의 양( $m$ )과 주입된 추적자의 총 양( $M$ )의 비는 추적자의 회수율( $R_f$ )을 나타낸다.

### 3. 연구 결과 및 토의

#### 3.1. 지하수 유동 방향에 대한 관정 배열의 영향

3.1.1. 지하수 유동 방향에 대한 관정 배열이 일치하는 경우

지하수 유동 방향에 대한 관정배열이 일치하는 경우 ( $0^\circ$ )에 실시한 분배추적자 시험의 농도이력곡선을 분석하였다(Fig. 3, 4, Table 2, 3). 추적자를  $1.36 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 양수율로 양수하였으며 추적자의 이동속도는 TCE 누출 전이 빠르며 이는 TCE 누출 후 Br<sup>-</sup>은 TCE 존재에 의해 공극률이 감소하고 분배추적자는 TCE에 분배되어 추적자의 속도가 느려진 것으로 판단된다(Fig. 4a). Nelson and Brusseau(1996)에 의해 제시된 지연계수를 측정된 결과 심도 9.0 cm, 11.0 cm에서 1보다 큰 값을 보였다. TCE 누출 전 추적자 실험은 토양의 일반적인 흡착을 파악하기 위한 실험이며 TCE 누출 전 자료를 통해 실험을 수행하는 칼럼내의 토양의 흡착을 무시한다. TCE 누출 후의 자료를 통해 지연계수를 산출하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 TCE 누출 전 분배추적자의 이동속도가 빨랐으며 이에 TCE 누출 전/후를 상대적으로 비교해보았다.

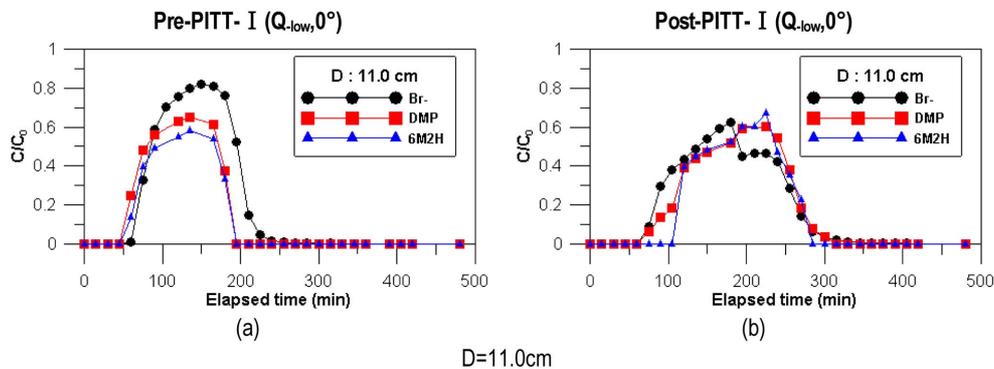


Fig. 3. Breakthrough curves obtained at the depth of 11.0 cm from the surface during Pre-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ ) and Post-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ ).

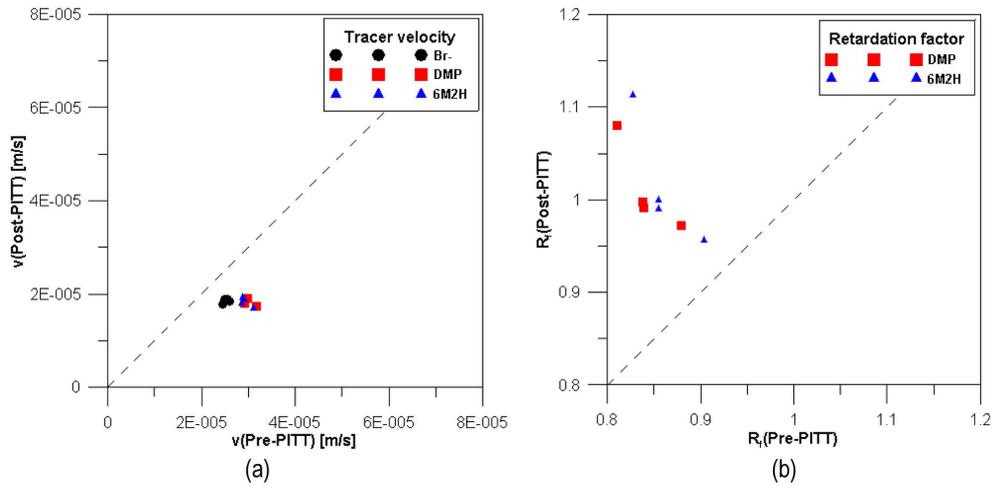


Fig. 4. A comparison of the linear velocity ( $v$ ) and retardation factor ( $R_f$ ) between Pre-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ ) and Post-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ ).

Table 2. Results of Pre-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ ) and Post-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ )

|             |                | Br <sup>-</sup>       |                       | DMP                   |                       | 6M2H                  |                       |
|-------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|             |                | Pre                   | Post                  | Pre                   | Post                  | Pre                   | Post                  |
| D = 9.0 cm  | v              | $2.50 \times 10^{-5}$ | $1.89 \times 10^{-5}$ | $2.98 \times 10^{-5}$ | $1.90 \times 10^{-5}$ | $2.92 \times 10^{-5}$ | $1.89 \times 10^{-5}$ |
|             | D              | $2.96 \times 10^{-7}$ | $2.11 \times 10^{-7}$ | $4.19 \times 10^{-7}$ | $1.98 \times 10^{-7}$ | $3.82 \times 10^{-7}$ | $1.87 \times 10^{-7}$ |
|             | R <sub>i</sub> | 113.60                | 90.43                 | 83.42                 | 104.99                | 70.17                 | 121.66                |
| D = 11.0 cm | v              | $2.57 \times 10^{-5}$ | $1.89 \times 10^{-5}$ | $3.17 \times 10^{-5}$ | $1.75 \times 10^{-5}$ | $3.10 \times 10^{-5}$ | $1.69 \times 10^{-5}$ |
|             | D              | $3.08 \times 10^{-7}$ | $2.44 \times 10^{-7}$ | $4.70 \times 10^{-7}$ | $1.60 \times 10^{-7}$ | $4.17 \times 10^{-7}$ | $1.08 \times 10^{-7}$ |
|             | R <sub>i</sub> | 107.14                | 97.83                 | 80.81                 | 95.82                 | 69.35                 | 88.56                 |

unit : v [m/s], D [m<sup>2</sup>/s], R<sub>i</sub> [%]

Table 3. Comparison of retardation factor ( $R_f$ ) between Pre-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ ) and Post-PITT-I ( $Q_{low}, 0^\circ$ )

|             | DMP                   |                       |   | 6M2H                  |                       |   |
|-------------|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|
|             | R <sub>f,Pre</sub>    | R <sub>f,Post</sub>   | R <sub>f,Post</sub> /R <sub>f,Pre</sub> | R <sub>f,Pre</sub>    | R <sub>f,Post</sub>   | R <sub>f,Post</sub> /R <sub>f,Pre</sub> |
| D = 7.0 cm  | $8.39 \times 10^{-1}$ | $9.91 \times 10^{-1}$ | $1.18 \times 10^0$                      | $8.54 \times 10^{-1}$ | $9.90 \times 10^{-1}$ | $1.16 \times 10^0$                      |
| D = 9.0 cm  | $8.38 \times 10^{-1}$ | $9.98 \times 10^{-1}$ | $1.19 \times 10^0$                      | $8.55 \times 10^{-1}$ | $1.00 \times 10^0$    | $1.17 \times 10^0$                      |
| D = 11.0 cm | $8.10 \times 10^{-1}$ | $1.08 \times 10^0$    | $1.33 \times 10^0$                      | $8.28 \times 10^{-1}$ | $1.11 \times 10^0$    | $1.35 \times 10^0$                      |
| D = 13.0 cm | $8.79 \times 10^{-1}$ | $9.72 \times 10^{-1}$ | $1.11 \times 10^0$                      | $9.04 \times 10^{-1}$ | $9.56 \times 10^{-1}$ | $1.06 \times 10^0$                      |

unit : R<sub>f</sub> [-]

계산된 지연계수 값은 모든 심도에서 1보다 큰 값을 나타내었으며(Fig. 4b) 이를 통해 산출된 NAPL의 포화도 및 부피는 Table 4에 기재하였다.

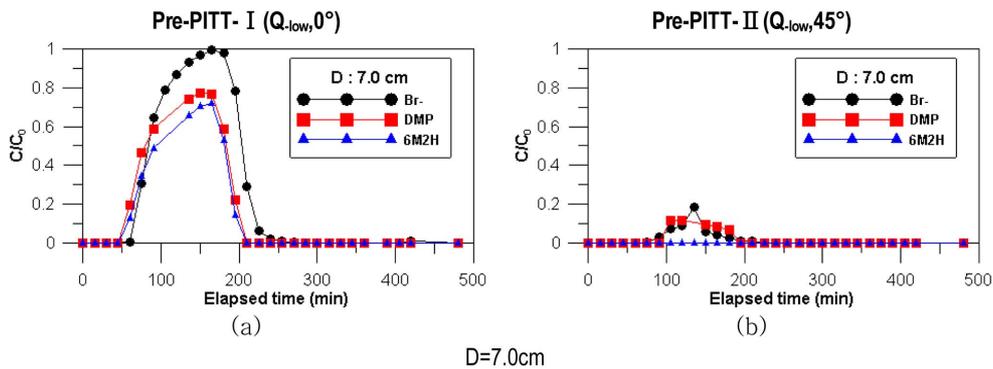
심도 11.0 cm에서 분배추적자 DMP, 6M2H에 의해 측정된 NAPL의 부피는 각각 4.37 ml[44.61%], 0.44 ml [4.51%]이었으며 TCE 주입 심도 10.0 cm임을 고려하였을 때 물보다 무거운 TCE가 아래로 하강한 것으로 판단된다. 그러나 주입과정에서 주입 비늘 주변을 따라 TCE가 상승하는 실험적 오류로 인해 13 cm보다는 7 cm, 9 cm에서

더 높은 TCE가 분포하고 있다. 현장실험에서도 심도별 오염원 분포를 파악하기 위해서는 다중심도 시료 채취를 하는 것이 중요하다. 또한, 측정된 NAPL의 총 부피는 DMP, 6M2H 각각 10.2 ml, 1.02 ml로 주입된 TCE 9.8 ml에 근거하여 DMP, 6M2H 각각의 경우 104.08%, 10.40%에 해당되며 실제 주입량과 유사하였다(Table 4). 심도 11.0 cm에서 DMP, 6M2H의 심도별 회수율은 각각 80.81%, 69.35%임을 고려하였을 때 회수율은 유사하나 심도별로 관찰된 NAPL의 효율은 10배 차이를 보였다.

**Table 4.** Estimated TCE saturation and volume using the relative retardation coefficient of Post-PITT-I (Q-low,0°) compared to Pre-PITT-I (Q-low,0°)

| Depth (cm)             | DMP                   |                               | 6M2H                  |                              |
|------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
|                        | Sn                    | Vn                            | Sn                    | Vn                           |
| D = 7.0                | $8.85 \times 10^{-3}$ | $2.00 \times 10^0$            | $8.19 \times 10^{-4}$ | $2.11 \times 10^{-1}$        |
| D = 9.0                | $9.28 \times 10^{-3}$ | $2.73 \times 10^0$            | $8.76 \times 10^{-4}$ | $2.96 \times 10^{-1}$        |
| D = 11.0               | $1.61 \times 10^{-2}$ | $4.37 \times 10^0$            | $1.78 \times 10^{-3}$ | $4.42 \times 10^{-1}$        |
| D = 13.0               | $5.15 \times 10^{-3}$ | $1.13 \times 10^0$            | $3.00 \times 10^{-4}$ | $7.65 \times 10^{-1}$        |
| Total estimated volume | -                     | $1.02 \times 10^1$ [104.08%]* | -                     | $1.02 \times 10^0$ [10.40%]* |

\*The estimated percentage compared to actual volume of the spilled TCE, 9.8 ml



**Fig. 5.** Breakthrough curves obtained at the depth of 7.0 cm from the surface during Pre-PITT-I (Q-low,0°) and Pre-PITT-II (Q-low,45°).

**Table 5.** A comparison between Pre-PITT-I (Q-low,0°) and Pre-PITT-II (Q-low,45°) with respect to the test-well arrangement

|            |                | Br <sup>-</sup>       |                       | DMP                   |                       | 6M2H                  |     |
|------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----|
|            |                | 0°                    | 45°                   | 0°                    | 45°                   | 0°                    | 45° |
| D = 9.0 cm | v              | $2.50 \times 10^{-5}$ | $2.45 \times 10^{-5}$ | $2.98 \times 10^{-5}$ | $2.81 \times 10^{-5}$ | $2.92 \times 10^{-5}$ | n.c |
|            | R <sub>i</sub> | 113.60                | 17.17                 | 83.42                 | 2.11                  | 70.17                 | n.c |

n.c : cannot calculated due to poor breakthrough curve  
unit : v [m/s], R<sub>i</sub> [%]

본 실험에서의 수두 구배, 오염물의 양 등의 조건에서 분배 추적자 DMP가 6M2H에 비해 효율이 높음을 확인하였다.

3.1.2. 지하수 유동 방향에 대한 관정 배열이 어긋나는 경우

실험은 지하수 유동 방향과 관정배열에 차이를 두었으며  $1.36 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 양수하고 추적수를 사용하지 않는 등 모든 조건을 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다.

농도이력곡선 결과 일치하는 경우(0°)에 브롬이온의 심도별 표준 농도(C/C<sub>0</sub>) 값은 어긋나는 경우(45°)에는 비해 6배 높았으며 어긋나는 경우 추적자의 속도는 일치하는 경우보다 약간 느려지나 회수율은 현저히 감소되었다. 어긋나는 경우 Br<sup>-</sup>의 경우 113.60%에서 17.17%로 6배 감소하였고 DMP의 경우 83.42%에서 2.11%로 41배 감소

하였으며 6M2H의 경우 검출되지 않았다(Fig 5a, 5b, Table 5). 이는 지하수 유동 방향에 대한 주입정과 양수정의 관정배열이 일치하는 경우에는 양수정의 영향 반경에 추적자가 포함되지만, 지하수 유동 방향에 대한 관정배열이 어긋나는 경우에는 영향 반경에 분배추적자가 포함되지 못하고 영향 반경을 벗어난 범위에서 추적자가 지하수와 같이 흘러가므로 회수율이 현저히 감소된 것으로 판단된다(Fig. 5). 관정배열이 어긋나는 경우 관측정에서의 농도이력곡선이 불완전하여 속도, 분산계수, 지연계수 등의 매개변수를 계산할 수 없었다.

3.2. 지하수 유동 방향에 대한 관정 배열의 영향 저감 방법

3.2.1. 추적수 주입

추적수의 효과를 판단하기 위하여 분배추적자 시험을

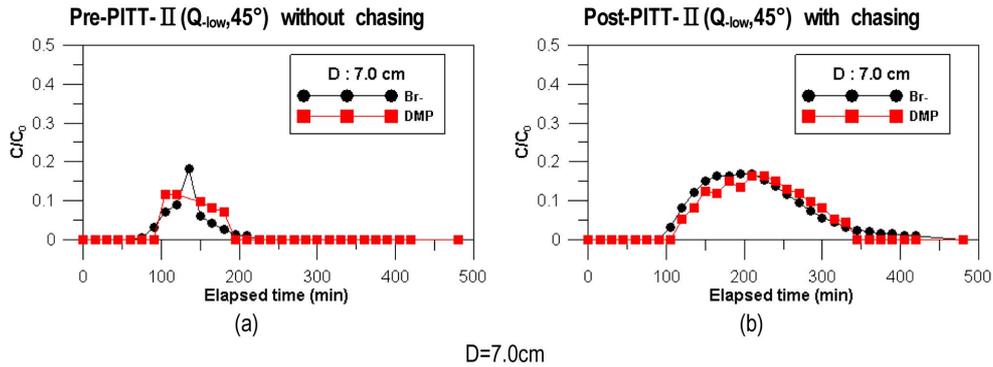


Fig. 6. Breakthrough curves obtained from experiment of with or without chasing tracer tests; a) Pre-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) without chasing, b) Post-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) with chasing.

Table 6. A comparison between Pre-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) without chasing and Post-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) with chasing with respect to the use of the chasing fluid

|          |                | Br <sup>-</sup>       |                       | DMP                   |                                  |
|----------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|
|          |                | without chasing       | with chasing          | without chasing       | with chasing                     |
| D=7.0 cm | v              | $2.83 \times 10^{-5}$ | $1.46 \times 10^{-5}$ | $2.71 \times 10^{-5}$ | $1.43 \times 10^{-5}$            |
|          | R <sub>i</sub> | 8.31                  | 29.89                 | 9.20                  | 26.62                            |
|          | V <sub>n</sub> | -                     | -                     | n.c                   | $7.48 \times 10^{-2}$<br>[0.76%] |

n.c : cannot calculated due to poor breakthrough curve  
 unit : v [m/s], R<sub>i</sub> [%], V<sub>n</sub> [ml]

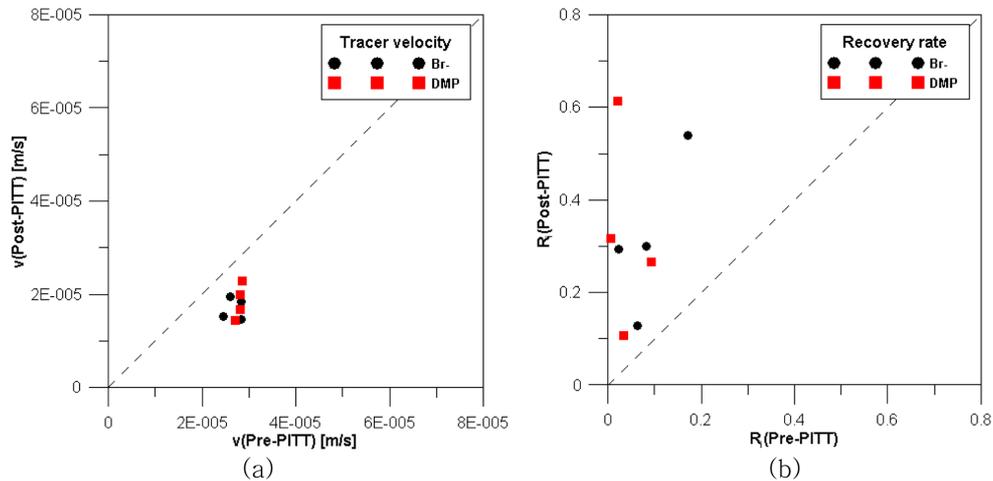


Fig. 7. Comparison of a) Tracer velocity, b) Recovery rate, between the tracer tests of Pre-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) without chasing and Post-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) with chasing.

실시하였다.  $1.36 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 양수하여 추적수 주입 전과 후를 비교하였다(Fig. 6). 앞서 분배추적자 6M2H의 경우 주입된 TCE 양에 비해 NAPL의 부피가 미량 검출되었으며 회수율에 비해 NAPL 산출의 효율이 떨어진다고 판단하여 실험에서 제외하였다. 농도이력곡선을 통해 추적수의 주입은 추적자의 농도검출이 용이하게 도와주는 것

을 확인하였다(Fig. 6). 모멘트법에 의한 분석 결과, 추적자의 속도는 추적수 주입 전이 후에 비해 2배 빨랐으며 (Table 6) 이는 Br<sup>-</sup>은 TCE와 추적수에 의해 공극률이 감소하고 분배추적자는 TCE에 분배된 효과라고 판단된다 (Fig. 7a). 추적자의 회수율은 심도 7.0 cm에서 추적수 주입 전에 비해 주입 후에 3~4배 증가하였다(Fig. 7b, Table 6).

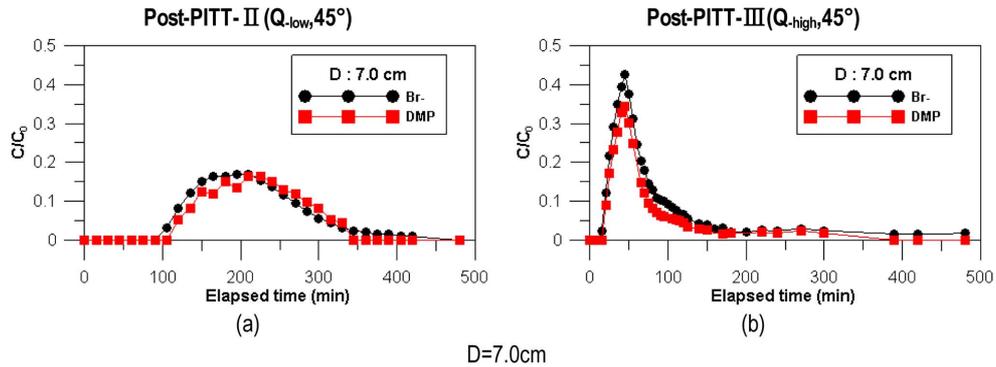


Fig. 8. Comparison of the breakthrough curves obtained from different pumping rates (low/high); a) Post-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ). b) Post-PITT-III ( $Q_{high}, 45^\circ$ ).

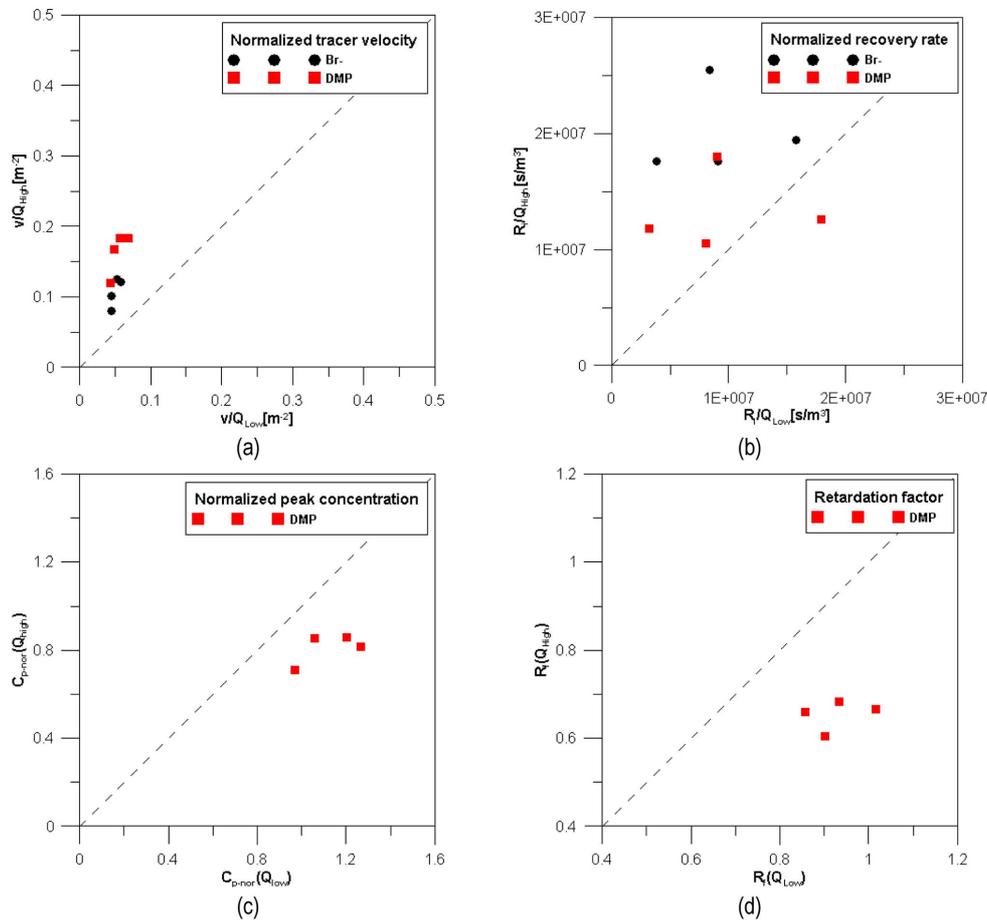


Fig. 9. Comparison of a) Normalized tracer velocity, b) Normalized recovery rate, c) Normalized peak concentration and d) Retardation factor between the tracer tests of Post-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) and Pre-PITT-II ( $Q_{high}, 45^\circ$ ).

3.2.2. 양수율 증가

양수율 증가에 의한 영향을 파악하기 위해 Post-PITT-II( $Q_{low}, 45^\circ$ )과 Post-PITT-III( $Q_{high}, 45^\circ$ )을 비교하였다(Fig. 8, Fig. 9). 양수율 증가에 의한 뚜렷한 변화를 확인하기

위해 양수율을  $1.02 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정하였다. 농도이력곡선을 통해 양수율 증가에 의해 농도의 변화율은 단시간에 급변함을 알 수 있다(Fig. 8). 양수율을 증가시키면 일반적으로 추적자의 속도가 빨라지고 회수율이 증가하므로

양수율 증가에 의한 영향을 최소화시키기 위해 추적자의 속도와 회수율을 각 심도별 단위 양수율로 보정하여 표준 속도( $v/Q$ ; Normalized tracer velocity), 표준 회수율( $R/Q$ ; Normalized recovery rate)을 구하였다. 양수율을 증가시키 기 전 추적자의 농도의 변화율은 점진적이나 양수율을 증 가시키면 농도 변화양상이 뚜렷하고 표준 속도는 빨라지 고 표준 회수율은 증가하였다(Fig 9a, 9b). Darcy 법칙의 식을 적용하여 양수율에 따른 표준 속도를 통한 추적자가 지나간 공극 면적( $A$ ; tracer-swept pore area)을 산출하였으며 표준 속도 기울기를 구하여 계수를 산출하였다(Fig. 10).

$$A_{LowQ} = 2.608 \cdot A_{HighQ} (R^2 = 0.964) \quad (11)$$

여기서  $A_{LowQ}$ ,  $A_{HighQ}$  는 각각 양수율 증가 전/후 추적 자가 지나간 공극 면적이다. 양수율이 증가되면 수위하강 폭이 커지게 되어 추적자는 더 좁은 면적을 지나가게 된 다. 또한 분배추적자의 침투 농도를  $Br$ 의 침투 농도로 보정하여 표준 침투 농도( $C_{p-nor}$ ; Normalized peak

concentration)를 구하였다. 양수율을 증가시키면 각도에 대한 영향이 감소되어 TCE에 대한 접촉 면적이 넓어지므 로 회수되는 분배추적자의 농도가 감소하며 표준 침투 농 도도 감소한다(Fig. 9c). 양수율 증가에 의해 분배추적자 가 TCE에 분배되는 시간이 감소하여 지연계수가 상대적 으로 감소되었다(Fig. 9d, Table 7). 따라서 지하수 유동 방향과 관정배열의 각도에 대한 영향을 감소시키기 위해 양수율을 증가시키는 것은 추적자의 농도 검출에는 용이 하나 TCE에 대한 분배시간의 부족으로 인해 최적의 지연 계수 산출이 어렵다.

#### 4. 결 론

TCE 누출 후 수행한 추적자 시험에서 분배추적자 시험 의 지연계수가 1보다 작지만 누출 이전의 지연계수에 대 한 비를 상대적인 지연계수라 정의하고, 이를 통해 계산 한 상대 지연계수를 이용하여 TCE의 포화도 및 총량을 추정할 수 있었다. 이러한 방법은 실제 현장에서 오염물 의 총량이 아니더라도 상대적인 양을 추정하는데 실용적 으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

관정배열과 지하수 유동방향이 어긋나는 경우 추적수 주입, 양수율 증가를 통해 관정배열과 지하수 유동방향에 대한 영향이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 양수율을 증가시키면 분배추적자의 TCE에 대한 분배시간의 부족으 로 정확한 NAPL의 포화도 및 부피를 산출하지 못하였다. 반면 추적수 사용이 NAPL 산출에는 제한적이지만 보다 완전한 농도이력곡선을 얻었으며 오차는 커지나 NAPL 포 화도를 추정할 수 있었다. 여기서 실험한 물리모형의 실험조건에서는 지하수 흐름에 어긋난 관정배열에서 추적자 시험의 성공도를 높이기 위해서 양수율을 증가시키는 것 보다 추적수를 주입하는 것이 더 효과적이지만, 이와 다 른 실험조건이나 실제 현장에서도 양수율을 증가시키는 것이 효과적이지 않다고 볼 수는 없다.

본 연구에서는 실험적인 제약으로 인해서 지하수 유동 방향과 관정배열이 어긋나는 경우를 45도로 국한하여 실

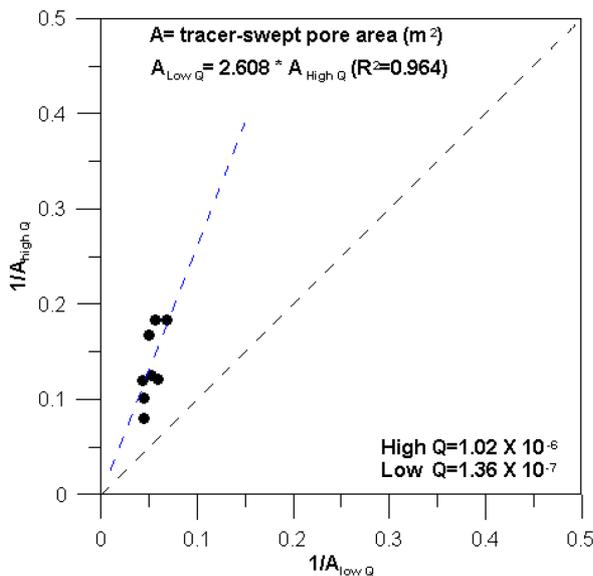


Fig. 10. The relationship of tracer-swept pore area calculated from tracer responses of the low rate tracer test and the high rate tracer test.

Table 7. A comparison between Post-PITT-II ( $Q_{low}, 45^\circ$ ) and Pre-PITT-III ( $Q_{high}, 45^\circ$ ) with respect to the pumping rate

|            |       | Br                    |                       | DMP                   |                       |
|------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|            |       | $Q_{low}$             | $Q_{high}$            | $Q_{low}$             | $Q_{high}$            |
| D = 7.0 cm | v     | $1.46 \times 10^{-5}$ | $2.89 \times 10^{-5}$ | $1.43 \times 10^{-5}$ | $4.08 \times 10^{-5}$ |
|            | $R_i$ | 28.89                 | 63.55                 | 26.62                 | 37.98                 |
|            | $R_f$ | -                     | -                     | $1.02 \times 10^0$    | $7.07 \times 10^{-1}$ |

unit : v [m/s],  $R_i$  [%],  $R_f$  [-]

험을 진행하여 제한적인 결과를 제시하고 있으나, 현장에서 흔히 생길 수 있는 지하수 흐름방향에 어긋나게 배열된 관정에서 수행하는 여러 가지 관정간 수리분산시험에서 고려해야 하는 점을 처음으로 시사했다는 데 의미가 있다. 향후 다양한 각도에 대한 관정 배열의 경우와 각각의 경우에 추적수와 양수율의 영향에 대하여 수치적인 방법으로 연구한다면 보다 일반화된 연구결과를 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업인 ‘지구환경 변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발(11-3414)’ 과제의 지원과 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Annable, M.D., Rao, P.S.C., Hatfield, K., Graham, W.D., Wood, A.L., and Enfield, C.G., 1998, Partitioning tracers for measuring residual NAPL : field-scale test results, *J. Environ. Eng.*, **124**(6), 498-503.
- Brusseu, M.L., Nelson, N.T., and Cain, R.B., 1999, The partitioning tracer method for in-situ detection and quantification of immiscible liquids in the subsurface, In Brusseau, M.L., Sabatini, D.A., Gierke, J.S., Annable, M.D.(Eds.), *Innovative Subsurface Remediation, Field Testing of Physical, Chemical, and Characterization Technologies*. ACS Symposium Series 725, American Chemical Society, Washington, DC, 208-225.
- Deeds, N.E., Pope, G.A., and McKinney, D.C., 1999, Vadose zone characterization at a contaminated field site using partitioning interwell tracer technology, *Environ. Sci. Technol.*, **33**(16), 2745-2751.
- Dwarakanath, V., Deeds, N., and Pope, G.A., 1999, Analysis of partitioning interwell tracer tests, *Environ. Sci. Technol.*, **33**(21), 3829-3836.
- Guvanasen, V. and Guvanasen, V.M., 1987, An approximate semianalytical solution for tracer injection tests in a confined aquifer with a radially converging flow field and finite volume of tracer and chase fluid, *Water Resour. Res.*, **23**(8), 1607-1619.
- Jin, M., Delshad, M., Dwarakanath, V., McKinney, D.C., Pope, G.A., Sepehrmoori, K., and Tilburg, C.E., 1995, Partitioning tracer test for detection, estimation, and remediation performance assessment of subsurface nonaqueous phase liquids, *Water Resour. Res.*, **31**(5), 1201-1211.
- 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, *Geosci. J.*, **14**(3), 313-320.
- Kang, D.H., Chung, S.Y., and Kim, B.W., 2005, Study on the leachate dispersion around a waste landfill site using single-well push-pull tracer test, *Proceedings of 2005 Spring Meeting of Korea society of soil and groundwater environment, Kongju National University*, 105-109.
- Kim, B.A., 2012, Experimental study of the effect of test-well arrangement for partitioning interwell tracer test on the estimation of NAPL saturation, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
- Kim, Y.C., Saenton, S., Moreno-Babero, E., and Illangasekare, T.H., 2006, Partitioning tracer tests for DANPL distribution characterization in a heterogeneous aquifer, *Econ. Environ. Geol.*, 204-206.
- Kim, Y.C., 2004, Experimental study on tracer methods and DNAPL mass transfer characteristics using various aquifer models, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Lee, D.G., Moon, H.S., and Lee, K.K., 2013, Investigation for TCE migration and mass discharge changes by water table rising in porous media, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(2), 27-35.
- Lee, J.Y., Park, Y.J., Kim, T.H., Kim, Y.C., Cheon, J.Y., Ryu, D.R., Park, K.W., and Kim, S.J., 1999, Guideline for field hydraulic tests, Lab. of Hydrogeological environment, Seoul National University, 43-59.
- Mayer, A.S. and Hassanizadeh, S.M., 2005, Soil and Groundwater Contamination : Nonaqueous Phase Liquids-principles and observations, Water Resources Monograph, Washington, D.C., 5-9.
- Nelson, N.T. and Brusseau, M.L., 1996, Field study of the partitioning tracer method for detection of dense nonaqueous phase liquid in a trichloroethene-contaminated aquifer. *Environ. Sci. Technol.*, **30**(9), 2859-2863.
- Park, G.H., Park, M.H., Shin, H.S., and Ko, S.O., 2006, Applicability of partitioning tracer test to quantify the saturation degree of diesel in unsaturated soil, *Proceedings of 2006 Spring Meeting of Korea society of soil and groundwater environment, Dongguk University*, 20-28.
- Park, Y., Lee, J.Y., Na, W.J., Kim, R.H., Choi, P.S., and Jun, S.C., 2013, A review on identification methods for TCE contamination sources using stable isotope compositions, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(3), 1-10.
- Rhee, S.S., Cho, S.Y., Oh, M.H., and Park, J.B., 2007, Estimating partition coefficients of partitioning tracers between water and BTEX mixtures, *J. Soil Groundw. Environ.*, **12**(2), 47-54.

Wang, F., Annable, M.D., and Jawitz, J.W., 2013, Field-scale prediction of enhanced DNAPL dissolution based on partitioning tracers, *J. Contam. Hydrol.*, **152**, 147-158.

Wonju City, 2003, Detailed investigation report on contaminated soil and groundwater in the Woosan Industrial Complex and Joongang-dong area in Wonju City, Wonju City and Environmental Management Corporation (EMC), Korea, 141.

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, *Groundw. Monit. Res.*, **19**(1), 84-94.

Yu, C., Warrick, W., and Conklin, M.H., 1999, A moment method for analyzing breakthrough curves of step inputs. *Water Resour. Res.*, **35**(11), 3567-3572.