

## 지중 유류오염량 추정을 위한 분배추적자 시험 및 해석방법

정찬덕<sup>1\*</sup> · 김용철<sup>2</sup> · 명우호<sup>1</sup> · 방성수<sup>3</sup> · 이규상<sup>1</sup> · 송성호<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국농어촌공사, 농어촌연구원 미래농어촌연구소

<sup>2</sup>한국지질자원연구원, 지하수관리센터

<sup>3</sup>한국농어촌공사, 토양환경복원단

## Partitioning Interwell Tracer Test and Analysis Method for Estimating Oil Pollutants in the Underground

Chan-Duck Jeong<sup>1\*</sup> · Yong-Cheol Kim<sup>2</sup> · Woo-Ho Myeong<sup>1</sup> · Sung-Su Bang<sup>3</sup>  
Gyu-Sang Lee<sup>1</sup> · Sung-Ho Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute, Future Rural Research Office

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Groundwater Environment Research Center

<sup>3</sup>Korea Rural Community Corporation, Soil & Environment Remediation Office

### ABSTRACT

From early 2000, many researchers in the groundwater and soil environment remediation project tried to calculate the pollution level and pollution remediation cost and reflect it in the design. In addition, by identifying the movement characteristics of oil pollutants in the underground environment, many researchers tried to derive design factors necessary for pollution purification. However, although the test should be conducted in an area contaminated with oil, the toxicity and risk are too great for testing by deliberately leaking pollutants that are harmful to the human body. And as oil-contaminated areas are promoted by military units such as returned US military bases, there is a limit to access by the general public. In addition, since the indoor simulation test and the field application test have been carried out separately from each other, it was difficult to compare and review various simulation tests. Therefore, in this study, PITT (Partitioning Interwell Tracer Test) and analysis methods were specifically presented through actual tests so that field workers could easily use them with the help of the military base and the Korea Rural Community Corporation Soil Environment Restoration Team. However, in order to directly reflect the distribution tracer test results in the pollution remediation design, it is necessary to reduce the analysis errors by comparing the analysis results of the existing soil pollution survey, physical exploration, and numerical modeling. In addition, it is judged to be cautious in the analysis because errors can easily occur due to various factors such as the type of oil at the polluted site, the hydraulic conductivity of the aquifer, and the skill of the researcher.

**Key words :** underground environment, oil pollution, PITT, pollution distribution, pollution amount

### 1. 서 론

주저자: 정찬덕, 농어촌연구원 미래농어촌연구소 수석연구원

공저자: 김용철, 한국지질자원연구원 지하수관리센터장

명우호, 농어촌연구원 미래농어촌연구소 책임연구원

방성수, 한국농어촌공사 토양환경복원단장

이규상, 농어촌연구원 미래농어촌연구소 부장

송성호, 농어촌연구원 미래농어촌연구소 소장

\*교신저자: 정찬덕, 농어촌연구원 미래농어촌연구소 수석연구원

Email: duckiangel@ekr.or.kr

Received : 2022. 06. 14 Reviewed : 2022. 06. 28

Accepted : 2022. 07. 20 Discussion until : 2022. 08. 31

추적자시험(tracer test)은 서로 떨어져 있는 지점까지의 연결성과 지하수에 노출된 오염물질이 어떤 흐름 경로를 통해 이송(advection)하고 분산(dispersion)하는지 등을 파악하기 위하여 주로 이용된다. 특히, 지하수에 노출된 오염물질의 이동 및 확산 예측에 필요한 종분산도(longitudinal dispersivity)를 추정하는 목적으로 많이 이용된다. 시험방법으로는 단공시험(single well test), 다공시험(well to well test), 자연구배시험(natural gradient test)

등 다양한 방법이 있다.

단공시험은 Mercardo(1966)가 제시한 방법으로 시험정에 일정한 농도를 갖는 추적자 용액을 일정한 유량으로 주입하고, 주입이 완료되는 즉시 흐름방향만 바뀌 동일 시험정에서 양수를 실시하여 일정간격에 따라 지하수의 추적자 농도를 측정한다. 이 시험을 통해서 대수층의 분산도(dispersivity;  $\alpha$ )와 유동속도( $v$ )를 산출할 수 있으며, 이때 얻어진 분산지수와 유속은 시험정 주변 대수층의 특성을 대표한다. 대수층 주변의 분산지수는 전체 주입량에 대한 시간에 따른 양수량의 비와 상대적인 농도 그래프를 이용하여 산정(Pickens and Grisak, 1981)한 이후 많은 연구자들에 의해 종분산지수나 종분산계수, 평균이송거리, 공극유속 등을 산정하는데 이용되어 왔다(Haggerty and Gorelick, 1998; Haggerty et al., 2001).

그러나 상기 종분산지수를 구하는 방법으로는 유류오염의 범위나 오염량을 추정하는 데는 한계가 있다. 그리고 유류로 오염된 지역의 토양 및 지하수 정화 설계에 반영하기 위해서는 오염물질의 종류, 농도, 오염물질의 분포범위, 오염량 등을 명확히 파악하는 것이 우선되어야 한다. 따라서 많은 연구자들은 유류오염물질(non-aqueous phase liquids; NAPLs)의 이동특성을 규명하는데 유용한 분배추적자 시험(Partitioning Interwell Tracer Test; PITT)을 주로 이용하였다(Jin et al., 1995; Dwarakanath et al., 1999; Kim, 2004; Kim et al., 2014).

PITT에 대한 이론은 Marin and Synge(1941)에 의해 기초가 만들어졌으며, Brusseau(1992)는 불혼합 부동액 상(phase)의 이동에 대한 영향을 이론적으로 처음 소개된 이후 지표하에서 NAPL의 포화도 측정을 위한 잔류 오일 포화도(residual oil saturation)를 결정하는 수단으로서 석유산업에서 많이 이용되었다(Allisin et al., 1991; Jin et al., 1995). 특히 Jin et al.(1995)은 두 가지 알코올(bromide sulfur hexafluoride)을 사용한 PCE(tetrachloroethene) 함량 평가를, Wilson and Mackay(1995)는 PCE 포화도 예측을 위해 각각 분배추적자 시험을 실시한 바 있다.

PITT 시험은 NAPL로 오염된 지하환경에서 많은 양의 NAPL을 추출하여 분석할 수 있기 때문에 NAPL의 오염량을 평가하고 오염정화 업무를 수행하는데 매우 유용한 방법이다(Neile et al., 1999). 또한 지중의 NAPL에 분배되는 분배 추적자(partitioning tracer)와 분배되지 않는 보존 추적자(conservative tracer)의 체류시간(residence time) 차이를 구하여, NAPL의 양(quantity)과 분포(distribution)를 추정할 수 있다. Yu et al.(1999) 등은 농도이

력곡선(breakthrough curves)을 이용하여 추적자의 평균 체류시간, 분산계수(dispersion coefficient), NAPL 포화도, NAPL 파괴 등을 추정하였다. 그러나 실내 분배추적자 시험과 달리 오염현장에서는 시험에 영향을 미칠 수 있는 대수층의 불균질성, 질리의 연결성, 오염원의 위치, 지하수 유동 방향 등 다양한 영향인자들이 존재하기 때문에 시험 결과를 해석하고 분석할 때 신중한 접근이 요구된다(Kim, 2004; Kim, 2012; Kim et al., 2014).

이번 연구에서는 주입공과 추출공에서의 인위적인 수두구배 차를 만들어 자연적인 유속이 발생하도록 하는 재순환 추적자시험(Recirculating tracer test)을 적용하였다. 주입공과 추출공의 수두가 일정하게 되는 정류 상태(steady state)에 도달하면, 추적자를 주입하기 시작하고 양수정에서는 일정 간격에 따라 시료를 채취하여 추적자 농도를 관측하였다. 또한 시험공 배열은 자연경사와 펌핑에 의한 인위적 수두경사 차이를 만들어 추적자의 체류시간을 측정하여 지중의 NAPL을 평가하였다.

실내 모의시험에서는 모형수조 규격을 다르게 제작하여 실험을 반복함으로써 현장에서 발생할 수 있는 다양한 문제점 등을 사전에 체크하려고 노력하였고, 현장시험에서는 단공시험을 현장 적용시험 전에 예비시험 차원에서 실시함으로써 다시 한 번 전체적인 공정과 방법 등을 검토하였다. 그리고 실내 모의시험과 예비시험 결과를 토대로 실제 유류오염 정화사업현장에서 시추공을 이용한 실증시험을 실시함으로써 실제 유류로 인한 오염부피를 추정하고자 하였다. 결과적으로 시추공을 이용하여 간접적으로 분배추적자 시험을 통해 실내와 현장에서 반복적으로 실시함으로써 지중에서의 NAPL의 거동특성과 오염량 산정 방법을 실무자들이 활용할 수 있도록 간단하고 이해하기 쉽게 제시함으로써 오염정화현장에서 간접시험을 통해 실제 유류오염 정화 설계 등에 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 연구방법

PITT의 목적은 현장조사 및 분석을 통해 오염범위를 산정하는 토양오염조사와 달리, 간접적인 시험을 통해 오염된 토양과 대수층에서 NAPL의 오염범위를 파악하여 이를 오염정화 설계에 반영하기 위하여 실시한다. 이 연구에서는 분배추적자 실내 모의시험과 현장 적용시험을 반복적으로 실시한 후 실험방법과 실험결과 해석방법을 구체적으로 제시하였다.

## 2.1. 실내 모의시험

### 2.1.1. 모형수조 A

현장 적용시험 전에 실시한 실내 모의 분배추적자 시험은 주문진 표준사를 이용하여 2~3차례 반복하여 시험을 실시하였다. 주문진사는 강원도 강릉시 주문진을 향호리산으로 중사(0.8~1.2 mm), 세사(0.3~0.7 mm)를 구매하여 혼합하여 활용하였다.

초기 모형수조는 투명한 아크릴 재질로 길이 800 mm, 너비 40 mm, 높이 350 mm 규격으로 제작하여 실험에 활용하였다. 모형 좌측은 주입관을 활용하여 정류상태로 증류수 + 분배추적자를 주입하도록 설계하며, 우측은 지하수 흐름에 따라 매질을 통과한 분배추적자를 샘플링하는 추출관을 설치하였다. 1차 시험은 전체를 동일한 모래층으로 구성하며, 상부 5 cm는 점토로 채워 포화대 내의 지하수 흐름을 모사하였다. 좌측 주입관과 모래층 사이는 유공판(porous plate)을 삽입하여 흐름이 고르게 분포되도록 했으며, 좌측 아크릴관(reservoir)에는 직경 2 mm의 유리비드(glass bead)를 채워 주입되는 압력을 일정하게 분산 조절하였다(Fig. 1).

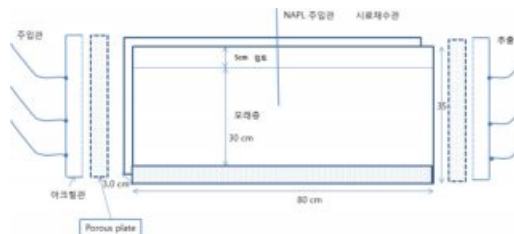
모형수조의 좌측과 우측에는 각각 분배추적자 용액 주입 펌프와 시료 채취를 위한 샘플링 관을 배치하였다. 모형시험에서 사용된 오염물질은 현장에서 가장 많이 오염된 경유를 Oil-red-O로 염색하여 사용하였다. 분배추적자

로 활용한 4-Methyl-2-Pentanol(이하 4M2P), 2-Ethyl-1-Butanol(이하 2E1B), 부탄올, 펜탄올 농도 분석은 Agilent사의 가스크로마토그래피(Gas Chromatography; GC) 장치에 알콜류 분석이 가능한 DB-1 칼럼을 장착한 후 불꽃이온화 검출기(Flame Ionization Detector; FID)를 이용하였다. 이때 알콜류 분석을 위한 시작온도는 45°C로 맞추고, 지속시간과 시료 주입량은 각각 1분과 1  $\mu$ l로 설정하였다.

### 2.1.2. 모형수조 B

두 번째 모의시험에서는 수조의 크기를 가로 600 mm, 세로 600 mm, 높이 290 mm로 제작하였다. 재질은 기존과 동일한 아크릴 재질로 상부 실리콘 덮개와 모형 안에는 주문진 표준사와 실제 오염정화 현장에서 채취한 오염토양으로 각각 시험을 실시하였다. 첫 번째 시험은 세사(0.3~0.7 mm)를 주입하였고, 두 번째는 실제 오염정화 현장에서 채취한 오염토양으로 시험을 실시하였다(Fig. 2).

보전 추적자는 두 시험 모두 KBr 40 g, 4M2P, 2E1B 각각 20 mL씩 50 L 증류수에 교반기를 활용하여 24시간 동안 교반 후 실험에 활용하였으며, 주입속도와 시료 채취 간격은 각각 36.7 mL/min와 30분으로 동일한 조건으로 설정하였다.

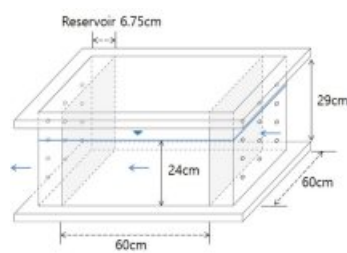


(a) Conceptual model design



(b) Real model tank

Fig. 1. Physical reservoir model A for experiments.



(a) Conceptual model design



(b) Real model tank



(c) Automatic sampler

Fig. 2. Physical reservoir model B for experiments and automatic sampler.

## 2.2. 현장 분배추적자 적용시험

이번 연구에서 실시한 분배추적자 현장 적용시험은 경상북도 칠곡군에 위치한 오염부지로서, 국방부와 한국농어촌공사의 협조하에 실제 유류 오염정화사업이 진행되고 있는 현장(연화지구)에서 이루어졌다. 연화지구는 과거 논으로 이용되다 1968년부터 군부대에서 사용할 유류저장 시설로 사용되었던 곳이다(Fig. 3).

현장 적용시험을 위한 시험공 설치는 NX( $\phi = 76$  mm) 구경으로 7개소를 설치하였는데, 지하수 유동방향을 상류

부에 주입공 3공(BH-1, 2, 3), 하류부에 추출공 3공(BH-4, 5, 6), 그리고 중심부에 관측공(OW)을 위치시켰다. 이때 공별 간격은 2.5 m, 상류부와 하류부 시추공과의 거리는 5 m로 설계하였다. 시추공 공벽 붕괴 방지를 위해 에어써징(air-surfing) 후 풍화암까지 철재 케이싱을 설치하였으며, 공내촬영을 위해 투명 아크릴 재질의 우물자재(간극 1 mm 크기)는 강력 유리테이프로 연결하였다. 이때 점토 등의 충전으로 인한 우물자재의 막힘 방지를 위해, 우물자재와 케이싱 사이의 공간에는 여과재를 넣고 케이

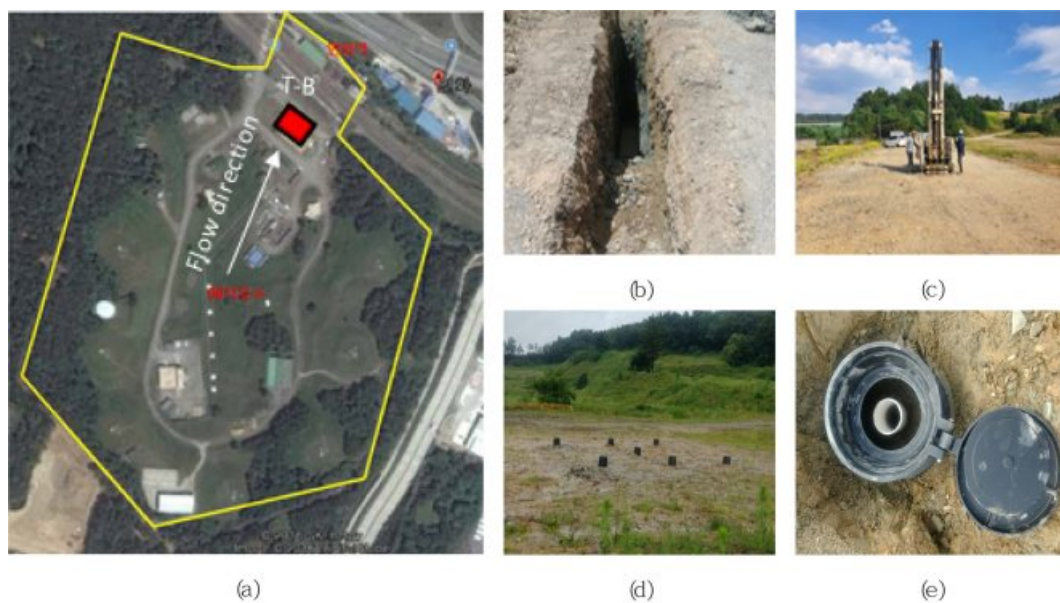


Fig. 3. Field Test-bed view; (a) Oil storage and Test-bed location map; (b) Trench (black is contaminated oil); (c) Borehole drilling; (d) Installed boreholes; (e) Borehole top of Test-bed.

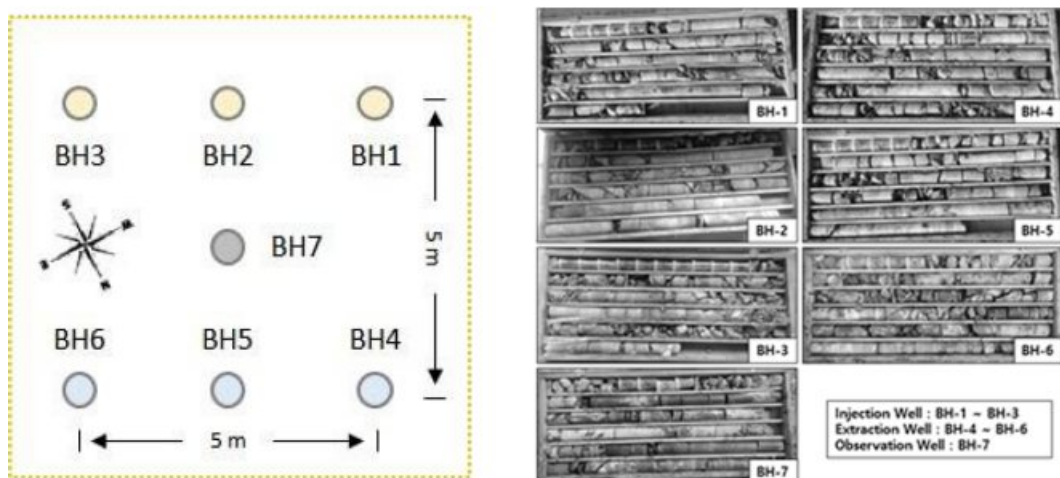


Fig. 4. Borehole location of test-bed and drilling core samples.



상은 철거하였다. 케이싱 제거 시 우물붕괴 및 케이싱 연결부 떨어짐을 방지하기 위하여 공자갈 주입과 케이싱 인양을 반복하면서 케이싱을 제거하였다. 시추코어 로깅 결과상부 3 m까지는 전석층(매립층), 3~6 m 구간은 실트질 모래(silty sand), 6 m 이후에는 실트질점토(silty clay), 풍화암층(weathered rock), 암반층(rock) 순으로 나타났다. 공별 지하수위는 2.7~3.2 m(Gl.m) 내외이고, 수리전도도는  $7.44 \times 10^{-4}$  cm/sec이다(Fig. 4). 지하수 유동은 남서쪽에서 북동쪽 방향으로 형성된 것으로 현장 조사결과 확인되었다.

또한 유류 오염물질이 분포하고 있을 것으로 추정되는 목표심도(지표하부 4.5~6.0 m 세립질 모래층 구간)에 추적자를 주입하기 위하여, 시험공 상부와 하부를 고무재질의 패커(pack)를 제작하여 공기압을 주입하여 상부와 하부를 밀봉(pack)하였다. 이때 패커는 분배추적자를 주입 및 추출할 수 있도록, 튜브(tube)와 고리, 체크밸브, 상·하부 패커에 공기를 주입할 수 있는 별도의 밸브로 구성하였다(Fig. 5).

시험공 설치 완료 후 곧바로 현장 적용시험을 실시하지 않고 시험중에 발생할 수 있는 다양한 문제점과 시험방법 등을 면밀히 검토하기 위해 BH-2, BH-6, OW 시험공을 유동방향으로 선정해 단공 예비시험을 실시하였다(Fig. 6).

시험에 사용할 추적자는 보전성 추적자(conservative tracer)인 KBr로 180 g을 물 200 l 에 희석하였으며, 분배

추적자는 4M2P, 2E1B, 1-Pentanol, 1-Butanol 4가지 알콜류(alcohols) 추적자를 각 80 ml 씩 희석하여 총 200 l 의 주입수를 제조하였다(Table 1).

이때 분배추적자와 NAPL의 교반시간에 따라 분배계수가 크게 달라지므로 최대한 정확한 농도가 측정되도록 24 시간동안 교반하였다. 1시간 간격으로 희석된 용액을 추출하여 농도를 분석한 결과, 1-Butanol을 제외한 나머지 알콜류 추적자는 최소 9시간 이상 교반해야 제대로 희석되는 것으로 나타났다(Fig. 7).

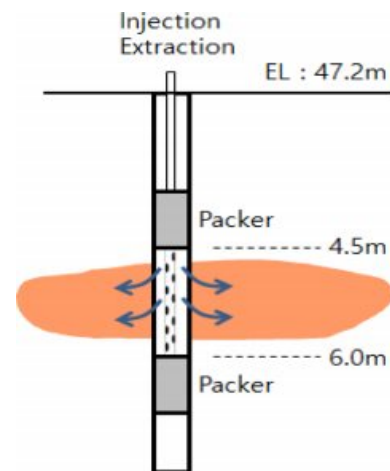


Fig. 6. Preliminary test design for distributing the tracer. The tracer spreads toward aquifer inside the double packer.

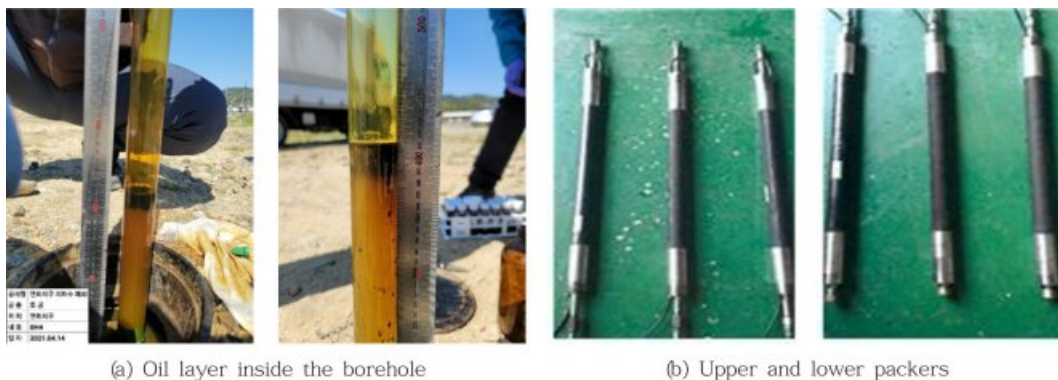


Fig. 5. Oil layer inside the borehole and double packer.

Table 1. Characteristics of conservative tracer and partitioning tracer

Tracers	Molecular weight (g/mol)	Density (g/mL)	Injection quantity
KBr	119.00	2.74	180 g/200L
4-Methyl-2-Pentanol	102.18	0.808	80 mL/200L
2-Ethyl-1-Butanol	102.18	0.833	80 mL/200L
1-Butanol	74.12	0.810	80 mL/200L
1-Pentanol	88.15	0.811	80 mL/200L

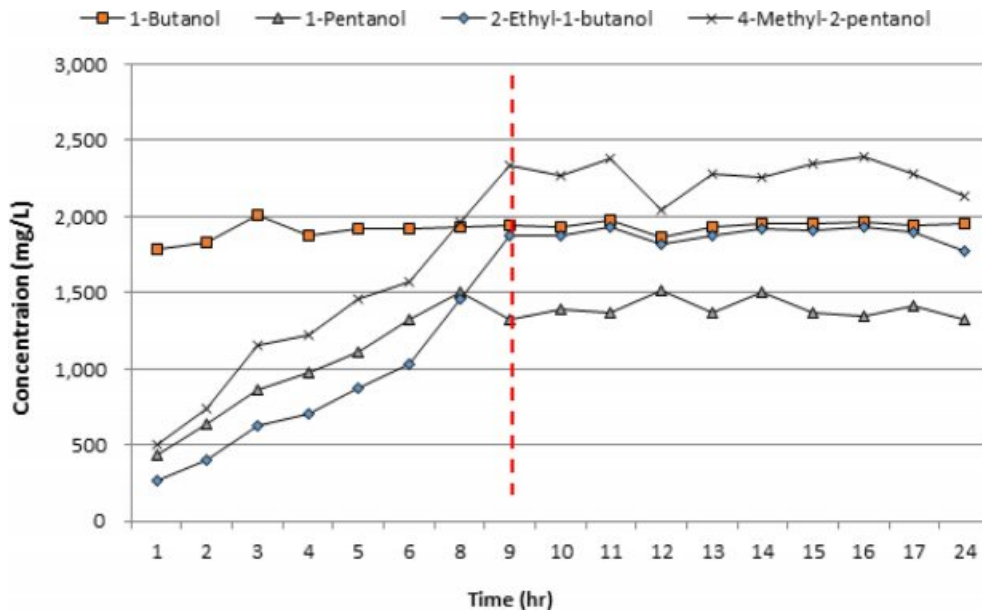
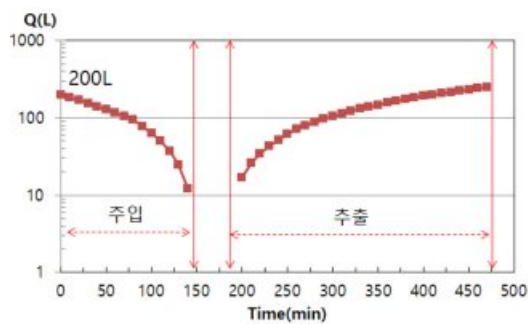
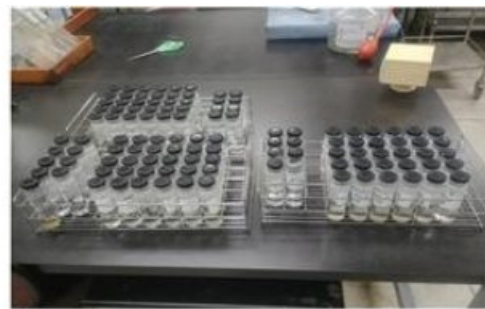


Fig. 7. Results of concentration change for each tracer according to stirring time.



(a) Injection-extraction graph



(b) Tracer samples

Fig. 8. Preliminary test conducted before the field test.

분배추적자를 희석한 용액은 저속정량 펌프(peristaltic pump)를 사용하여 압력을 일정하게 유지하면서 주입하였다. 분배추적자 확산을 위하여 주입이 완료된 시점에서 30분 경과 후 추출을 시작하였으며, 시료추출은 10분마다 실시하였다. 각 공별 30개의 시료를 채취하여 총 90개를 추출하였다(Fig. 8). 주입시간은 모든 시험공에서 동일한 압력으로 150분 동안 주입하였으며, 추출은 추적자의 확산을 고려하여 주입시간의 2배인 300분 동안 실시하였다.

BH-2의 경우 BH-6, BH-7 시험공과 달리 지하매질의 수리적 특성, 주입재 희석불량 등의 요인으로 추적자 농도( $C/C_0$ )가 60% 미만으로 추출되어 많은 양의 추적자가 회수되지 않았다. 따라서 지하수 유동방향에 따라 확산 또는 이동된 것으로 판단되어, 현장 적용시험 시 상류부에

위치한 3개의 시험공(BH-1, BH-2, BH-3)에 각각 주입량을 200 l 로 늘려 9시간 이상 실시하였다.

### 2.3. 연구결과 해석

PITT 시험에 대한 해석은 모멘트 법(moment method)을 활용하여 오염물질의 이동과 오염범위, 오염량 등을 분석하였다. 모멘트 법은 농도이력곡선을 분석하여 추적자의 평균 체류시간과 분산 정도를 파악하기 위해 Yu et al.(1999)이 제시한 방법으로서 기본적인 물리적 모델을 필요하지 않는다. 일반적인 모멘트 법 산정 공식은 다음과 같다.

$$m_n = \int_0^\infty t^n C(z, t) dt \quad (2)$$

여기서,  $m_n$ 에서  $n$ 번째 시간모멘트,  $C$ 는 농도,  $t$ 는 시간(min)이다. 그러나 더 높은 차원의 모멘트와 큰 펄스의 경우 적분은 오류가 큰 곡선의 꼬리부분에 너무 많은 가중치를 두는 경향이 있다. 따라서 Yu et al.(1999) 등이 제시한 추적자의 평균 체류시간, 분산계수(dispersion coefficient), NAPL 포화도, NAPL 부피 등을 추정하기 위하여 다음과 같은 단순한 모멘트 식을 사용하여 해석하였다.

$$M_1 = \frac{\int_0^\infty tC(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt}, \quad \mu_2 = \frac{\int_0^\infty (t-M_1)^2 C(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad (3)$$

여기서,  $t$ 는 추적자 채취시간,  $C(t)$ 는 시간에 따른 추적자의 농도이다. 또한 일차 모멘트( $M_1$ )와 이차 중심모멘트( $\mu_2$ )를 이용해 지하수 유속( $v$ )과 분산계수( $D$ )를 구할 수 있다.

$$v = \frac{z}{M_1 - \frac{t_0}{2}}, \quad D = \left( \mu_2 - \frac{t_0^3}{12} \right) \frac{v^3}{2z} \quad (4)$$

여기서,  $z$ 는 추적자 주입정과 추출정 사이의 거리,  $t_0$ 는 추적자 주입시간이다.

주입된 분배추적자와 보존추적자의 일부는 추출정에서 회수되는데, 이때 주입된 추적자 양과 회수된 추적자 양의 비를 회수율( $R_r$ , recovery rate)이라 한다.

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

여기서,  $Q(t)$ 는 양수량,  $C(t)$ 는 검출된 추적자 농도,  $t$ 는 시간,  $Q_{inj}$ 는 주입량,  $C_{inj}$ 는 주입된 추적자 농도,  $t_{inj}$ 는 추적자가 회수된 용액의 주입시간이다. 농도이력곡선에서 추적자 체류시간은 다음 식으로 구한다.

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

여기서,  $t_s$ 는 추적자 주입시간,  $t_f$ 는 분배추적자 시험시간,  $C(t)$ 는 경과시간에 따라 채취된 추적자 농도이다. 또한 보존추적자와 분배추적자의 체류시간에 대한 비를 나타내는 지연계수( $R_f$ )는 다음 식에 의해 산정하였다.

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

여기서,  $t_c$ 는 보존추적자 체류시간,  $\bar{t}$ 는 분배추적자 체류시간,  $\rho_b$ 는 용적밀도,  $\theta_w$ 는 수분함유량,  $K_d$ 는 NAPL의 토양-물 흡착계수,  $K_N$ 는 NAPL-물 분배계수이다. 따라서 지연계수( $R_f$ )를 이용하여 NAPL의 포화도( $S_N$ )를 다음과 같이 산정할 수 있다.

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

또한 NAPL의 포화도( $S_N$ )와 보존추적자 체류시간( $t_c$ )을 이용하여 추적자가 흘러지나간 공극의 부피( $V_P$ )를 구할 수 있으며, NAPL의 포화도( $S_N$ )와 공극의 부피( $V_P$ )를 이용해 NAPL의 부피( $V_N$ )를 구할 수 있다.

$$V_P = \frac{m}{M_1 - S_N}, \quad V_N = S_N V_P \quad (9)$$

여기서  $m$ 은 추출정에서 채취한 추적자의 양,  $M$ 은 주입된 추적자의 총량,  $Q$ 는 주입된 용액의 총량이다. 추출정에서 채취된 추적자의 양( $m$ )과 주입된 추적자의 총량( $M$ )의 비는 추적자의 회수율( $R_r$ )을 나타낸다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 모형수조 A 시험

분배추적자가 이동과정에서 유류로 오염된 지역으로 분배되는 과정과 천연 유기물질 등에 의한 흡착이 없다면 보존성 추적자와 유사한 농도이력곡선을 보일 것으로 예상되었으나, 이번 예비시험에서는 차이가 크지 않은 농도이력곡선을 나타냈다. 이는 실험자의 분배추적자를 주입 수와의 회석과 분석 오류로 판단된다. 또한 1-Pentanol 값이 반복 실험에도 불구하고 매우 낮게 추출되어 현장 적용시험에서는 주입 추적자 항목에서 제외하였다.

예비시험 결과, 주입이 시작된 이후 계속해서 농도가 줄어듦에 따라 시험시작 후 140분이 경과된 이후부터는 보존성 추적자와 분배성추적자의 농도는 KBr은 233 mg/L에서 26 mg/L로, 4M2P는 48 mg/L에서 1 mg/L로, 2E1B 158 mg/L에서 7 mg/L로, 1-Butanol 321 mg/L에서 11 mg/L으로 크게 줄어들었으며, 시험시간 140분 이후부터는 분배추적자간 농도차가 비슷한 양상을 나타냈다. 이때 1-Pentanol은 60분 이후부터는 검출이 안 됨에 따라, 다공시험에서는 분배추적자 주입항목에서 제외하였다(Fig. 9). 또한 추적자와 주입수 회석 시 인위적인 회석보다는 교반기를 이용해 9시간 이상 회석함으로써 보다 정확하고 균질한 농도값을 얻을 수 있었다(Fig. 10).

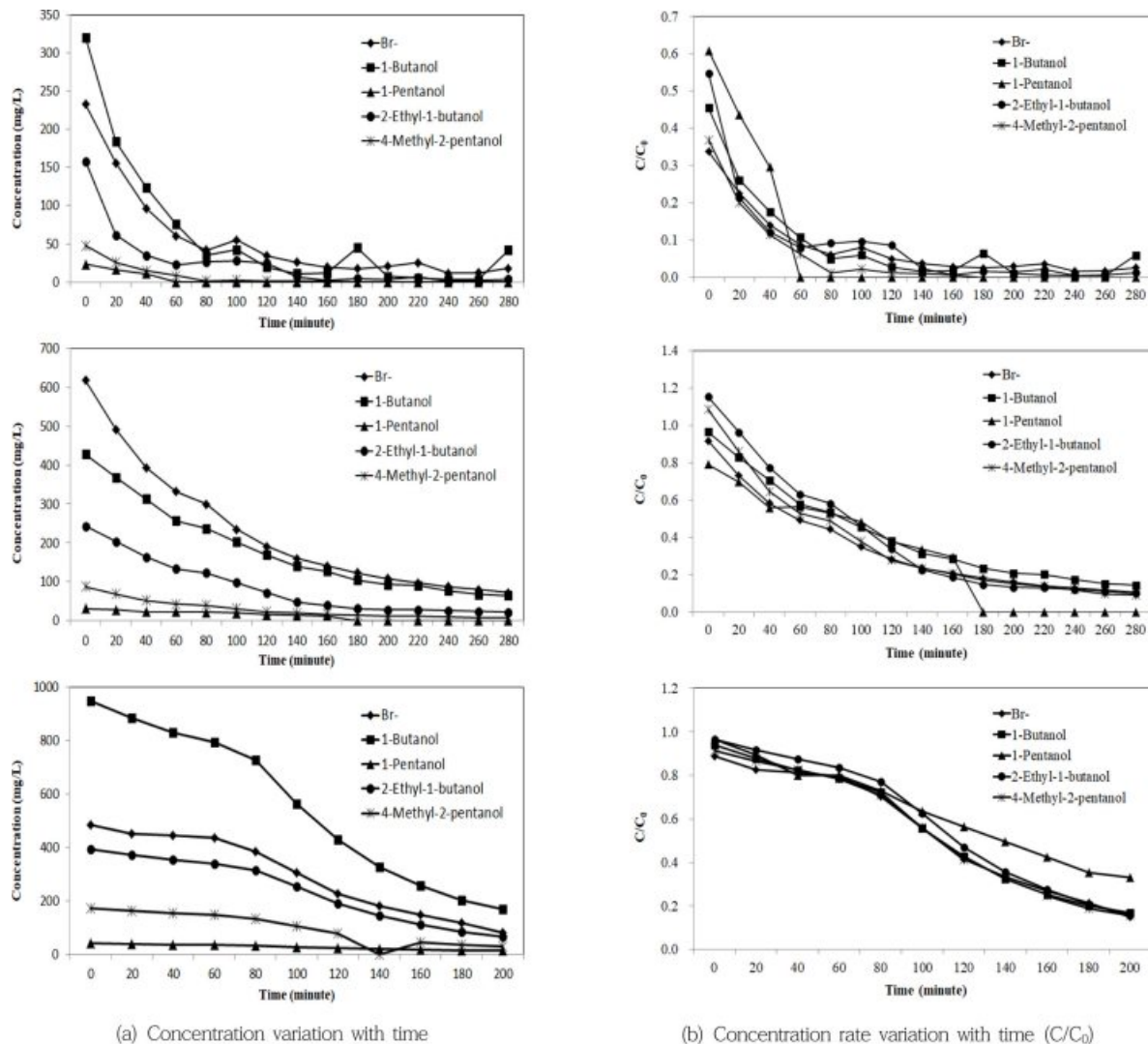


Fig. 9. Preliminary results of breakthrough curve for partitioning tracer test.

실험결과 62.4 ml를 주입한 PITT시험에서 NAPL의 포화도( $S_n$ )는 4M2P의 경우 1차 0.0033, 2차 0.0094, 2E1B의 경우는 1차에서 0.0044, 2차 0.0059로 각각 분석되었다. 또한 150 ml를 주입한 PITT시험에서 NAPL 포화도( $S_n$ )는 4M2P의 경우 1차 0.0116, 2차 0.0119, 2E1B의 경우는 1차 0.0074, 2차 0.0054로 분석되었다(Table 2, Table 3).

### 3.2. 모형수조 B 시험

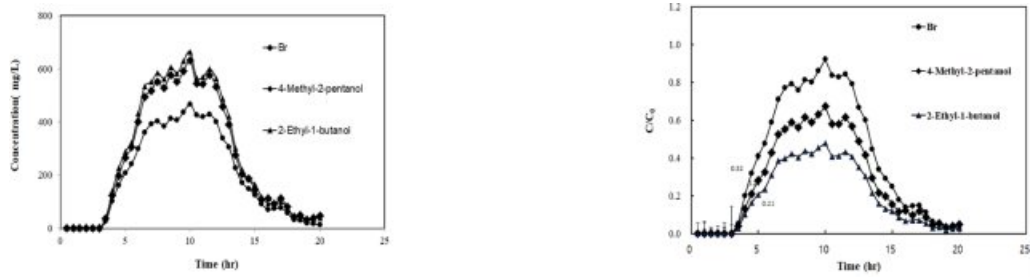
주입제는 주문진사(중사, 세사)를 혼합하여 채우고 동일한 공극률과 투수성을 확보한 후 실험하였다. 상부는 자유면 대수층과 같이 오픈 상태로 두었으며, 보전추적자는 KBr을 40 g, 4M2P, 2E1B 각각 20 mL씩 50 L 증류수에

교반기를 활용하여 24시간 동안 교반 후 실험에 활용하였다. 이때 주입속도는 36.7 mL/min, 시료채취는 30분 간격으로 설정하였다.

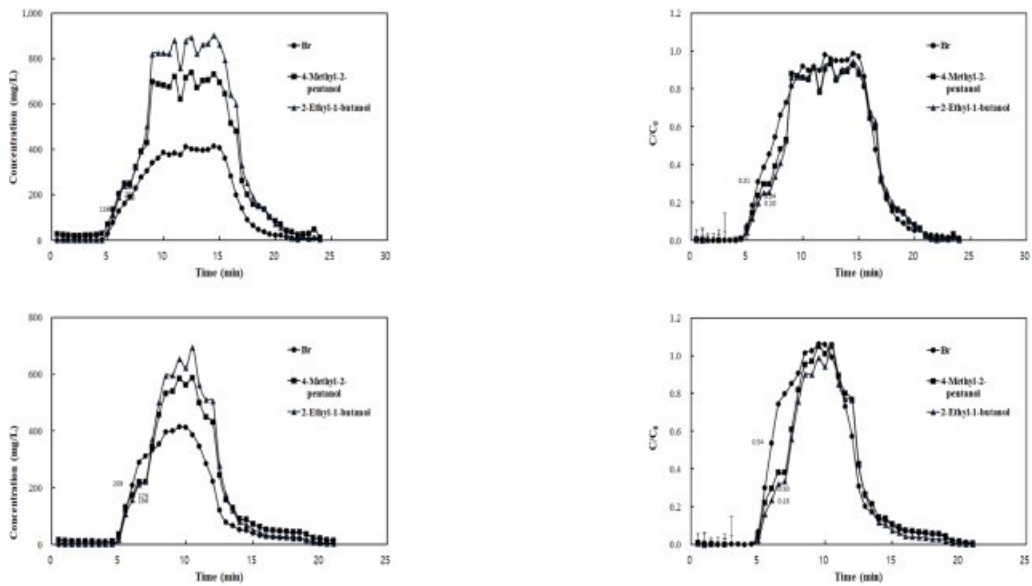
1차 실험 결과 추출한 시료는 GC 분석을 통해 분석하였으나, 모의수조 A에 비해 10배 이상 투수성이 낮아 상대적으로 많은 시간이 소요되어 추적자 농도가 최고점에 도달하였으나, 전체 추적자가 시료를 통과하지 않은 상태에서 실험이 종료되어 향후 추적자 주입 후 모형수조를 통과하여 reservoir 도달 시까지의 시간을 감안하여 시료 채취 간격과 시험시간을 늘리고 자동시료 샘플링 기기(Aquacell P2-Multiform)를 투입하여 문제를 해결하였다(Fig. 11).

2차 시험에서는 시료 추출간격을 60분, 실험시간을 2배

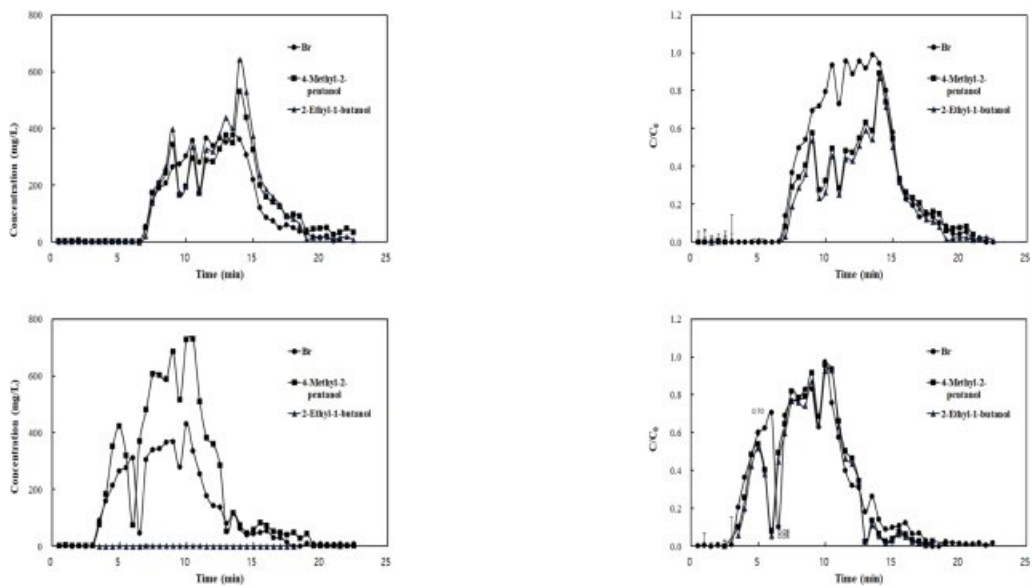




(a) tracer test results without NAPL



(b) tracer test results with NAPL 62.4 mL



(c) tracer test results with NAPL 150 mL

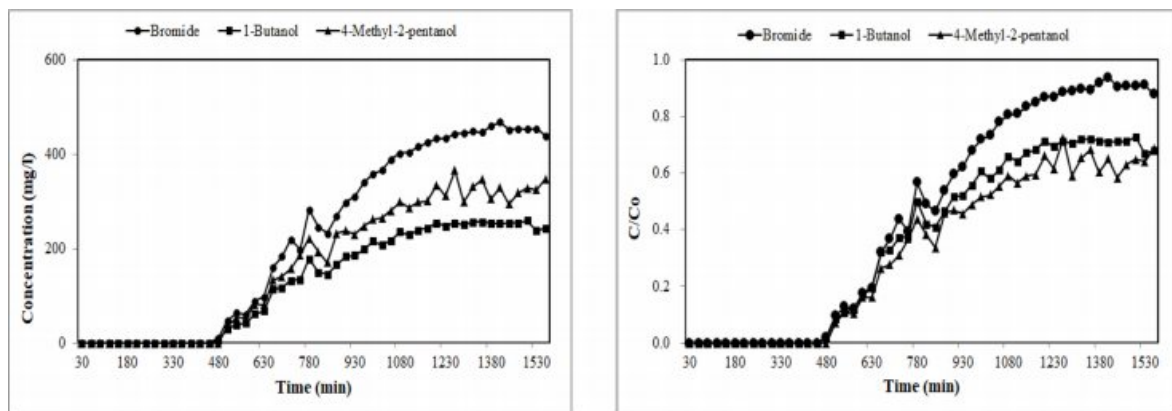
Fig. 10. Partitioning tracer test results on the physical reservoir model A.

**Table 2.** The Results of PITT with NAPL 62.4 ml

	Br		4M2P		2E1B	
	First	Second	First	Second	First	Second
K <sub>p</sub>	-	-	10.20	10.20	12.59	12.59
t (min)	439.9	330.3	454.9	362.3	464.5	354.9
v (cm/min)	1.909.E-01	2.543.E-01	1.847.E-01	2.318.E-01	1.808.E-01	2.367.E-01
R <sub>f</sub>	-	-	1.0340	1.0970	1.0558	1.0745
S <sub>n</sub>	-	-	0.0033	0.0094	0.0044	0.0059
V <sub>p</sub>			8,037	3,869	9,268	4,020
V <sub>N</sub>			26.7	36.4	40.9	23.7

**Table 3.** The Results of PITT with NAPL 150 ml

	Br		4M2P		2E1B	
	First	Second	First	Second	First	Second
K <sub>p</sub>	-	-	10.20	10.20	12.59	12.59
t (min)	384.8	245.9	430.9	276.0	420.7	262.6
v (cm/min)	2.183.E-01	3.417.E-01	1.949.E-01	3.043.E-01	1.997.E-01	3.199.E-01
R <sub>f</sub>	-	-	1.1197	1.1227	1.0933	1.0681
S <sub>n</sub>	-	-	0.0116	0.0119	0.0074	0.0054
V <sub>p</sub>			1,755	3,380	1,605	3,693
V <sub>N</sub>			20.4	40.2	11.8	19.9

**Fig. 11.** Breakthrough curves of partitioning tracer test results on the physical model B (the first test).**Table 4.** Partitioning tracer test results on the physical model B(the second test) with NAPL 300 mL

	Br	4M2P	2E1B
K <sub>p</sub>	-	10.20	12.59
t (min)	819.5	842.0	817.1
v (cm/min)	7.322.E-02	7.126.E-02	7.343.E-02
R <sub>f</sub>	-	1.0276	0.9971
S <sub>n</sub>	-	0.0027	- 0.0002
V <sub>p</sub>		175,620	-
V <sub>N</sub>		473	-



Fig. 12. Experiment conducted using contaminated soil in the Yeonwha district.

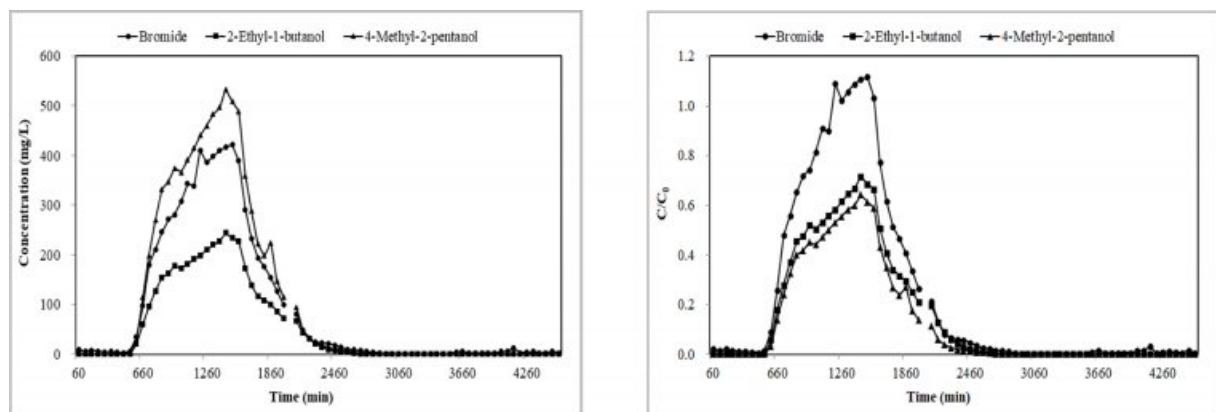


Fig. 13. Breakthrough curves of partitioning tracer test results on the physical model B (the second test).

이상 늘렸으며, 인위적인 오차를 방지하기 위하여 샘플링도 자동시료추출기를 투입하여 진행하였다. 주입재료는 군부대와 한국농어촌공사 토양환경복원단의 협조를 얻어 연화지구 오염정화 현장토양을 직접 채취하여 모형수조에 채움으로써 최대한 현장조건과 비슷한 환경을 모사하였고, 현장토양은 그늘에 말려서 최대한 수분을 건조시킨 후 200 mesh 체로 걸러 작은 유기물 등은 제거한 후 모형수

조에 채웠다. 또한 NAPL은 300 mL를 현장토양과 혼합하여 모형수조 중앙에 주입하였다(Fig. 12). 분배추적자 실내 모형수조 B의 2차 시험 결과는 Table 4에 제시된 바와 같이 4M2P에서 유효한 NAPL 포화도( $S_n$ )가 0.0027로 분석되었으며, 2E1B는 - 값으로 나타났다(Fig. 13, Table 4). 4M2P의 포화도( $S_n$ )를 적용했을 때 NAPL의 부피( $V_N$ )는 473 L로 산정되었다.

### 3.3. 현장 적용시험

반복적인 실내 모형수조 시험을 통해 도출된 여러 가지 실험상의 문제점 등을 개선하여 현장 TB에서 PITT 적용 시험을 실시하였다. 표고가 높은 상류부에 BH-1, BH-2, BH-3호공을 배치하여 주입공으로 사용하였고, 하류부에 BH-4, BH-5, BH-6호공을 배치하여 추출공으로 활용하였다. 주입한 추적자는 KBr 160 g, 4M2P, 2E1B, 1-P, 1-B 각각 80 mg/L씩 물에 희석하여 주입하였으며, 주입속도는 285.7 mL/min로 설정하였다. 주입공과 추출공 사이 거리는 5 m 간격이며, 주입공간, 추출공간 거리는 2.5 m이

다(Fig. 14).

실험 전과 종료 후 시험공의 지하수위를 측정한 결과 주입공은 지하수위 변화를 보이지 않으나, 하류부의 추출공 BH-4, BH-5, BH-6에서는 시험종료 후 11~13 cm 범위 증가하였다(Table 5).

분배추적자 시험결과 Moment 법을 이용하여 NAPL의 오염포화도( $S_n$ )와 오염부피( $V_N$ )를 산정하였다. BH-1호공에서 BH-4호공 방향으로 주입된 분배추적자는 4M2P가 86.4%, 2E1B가 43.1%의 회수율을 보이며, NAPL 포화도는 4M2P가 0.0296725, 2E1B는 - 값을 보였다.

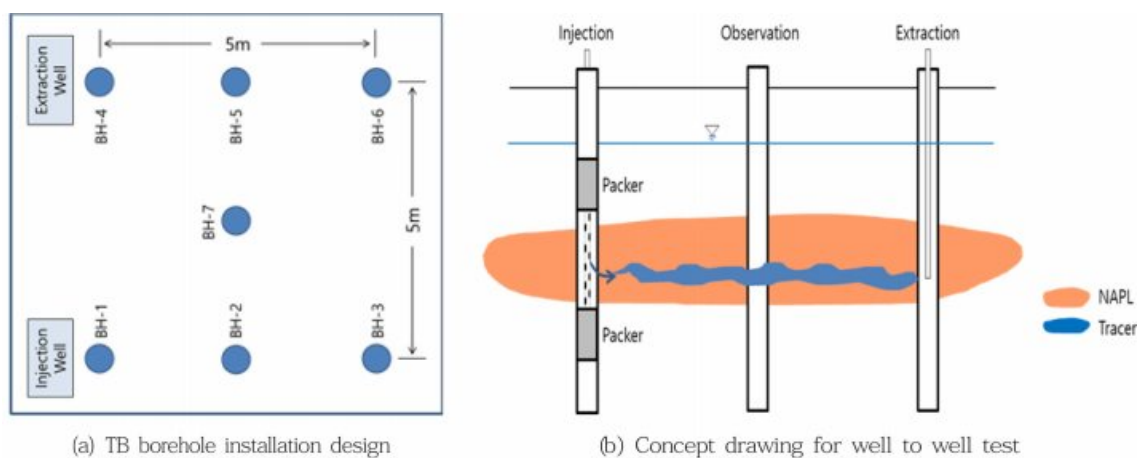


Fig. 14. PITT test plan at test-bed in oil pollution remediation site.

Table 5. Groundwater level of boreholes (unit : m)

		Injection well			Extraction well		
		BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6
Groundwater level (Gl.m)	before	3.02	3.06	3.06	2.96	2.97	3.04
	after	3.02	3.05	3.06	3.07	3.10	3.15
	differ.	0.0	0.01	0.00	0.11	0.13	0.11

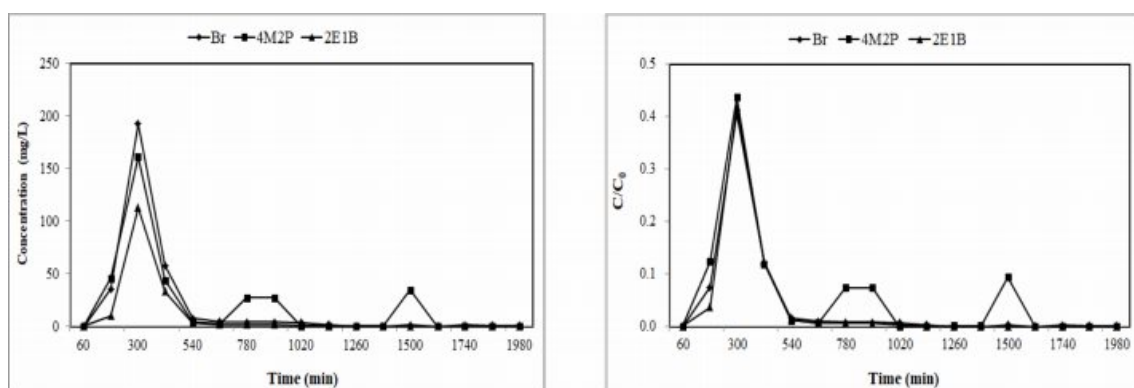


Fig. 15. Tracer field application test: BH-1 → BH-4.



**Table 6.** Tracer field application test: BH-1 → BH-4

	Br	4M2P	2E1B
Kp	-	10.20	12.59
t (min)	184.4	242.0	162.7
v (cm/min)	2.711.E+00	2.066.E+00	3.072.E+00
R <sub>f</sub>	-	1.3119	0.8823
S <sub>n</sub>	-	0.0296	- 0.0094
V <sub>p</sub>		32,840	-
V <sub>N</sub> = S <sub>n</sub> × V <sub>p</sub>		974	-

오염포화도가 +값을 보이는 4M2P의 오염부피는 974 L로 산정되어, 시험결과가 실제 오염현황과 부합하다면 매우 많은 유류가 유출된 것으로 판단된다. 실제로 오염현장 토양굴착 시 BH-1호공과 BH-4호공에서 기름띠가 각각 2~3 cm, 4~5 cm 두께로 관측되었다. 또한 BH-2호공에서 BH-5호공 방향, BH-3호공에서 BH-6호공 방향에서는 NAPL의 오염포화도가 - 값으로 나타났다. 특히 이곳은 BH-1호공과 BH-4호공처럼 유류오염이 발견되지 않은 곳이다. Test-bed 크기가 5 m × 5 m 규모이고, 공간 간격이 2.5 m이므로 BH-1호공과 BH-4호공간 거리는 5 m, 즉 시험으로 분석된 것으로 추정가능한 범위는 주입공-추출공 거리 5 m × 추적자 확산 범위(추정) 5 m × 시험구간 3 m (지표하 3.0~6 m, 실트질모래) 공극률 0.35%를 적용하여 오염부피를 개략 산정해보면 777 L이다. 모멘트 법으로 산정한 오염부피가 더 많이 산정된 것으로 판단되나, 실험 결과만 놓고 볼 때, BH-1호공에서 BH-4호공 방향으로 유류가 약 974 L의 오염부피로 확산 및 이동이 이루어진 것으로 볼 수 있다(Fig. 15, Table 6).

#### 4. 결 언

분배추적자 실내 모의시험을 동일한 조건에서 여러 차례 반복하면서 초기농도, R<sub>f</sub>, S<sub>n</sub>도 분석자, 연구자에 따라 조금씩 차이를 보였다. 또한 분배추적자에 따라 다른 결과가 도출되는 점을 고려할 때, 실제 오염현장에서의 분배추적자 실증시험 결과만으로 현장의 오염부피(V<sub>N</sub>)를 설계에 적용하기는 어려울 것으로 판단된다. 왜냐하면 농도 이력곡선이 불완전할 경우, 질량 전달 제약 조건이 극단적일 경우, 알콜류를 사용함에 따른 교반, 실험과정, 추출 및 분석과정에서 분배추적자 질량 손실 등의 오류가 쉽게 발생할 수 있기 때문에 해석에 신중해야할 것으로 판단된다. 이외에도 분배추적자 시험을 통한 오염량을 추정하기 위해서는 시험과정과 절차를 명확히 인지하고 실험에 임해야 하며, 기존의 토양오염조사와 물리탐사, 수치모델링

등의 분석결과를 상호 비교하여 분석오차를 줄여나가야 할 것으로 판단된다. 결과적으로 실내 모의시험과 현장 적용시험의 결과값은 오염현장의 유류 종류, 대수층의 수리전도도, 연구자의 숙련도 등 다양한 요인에 의해 영향을 받을 것으로 판단된다. 그렇기 때문에 보다 많은 현장 분배추적자 시험을 실시하고 많은 경험과 기술이 축적될 때 비로소 오염량 추정값을 오염정화 설계에 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 결국 본 연구에서 수행한 실내 모의시험과 현장에서의 단공시험과 적용시험만으로는 설계에 반영할 수준의 시험의 신뢰성 있는 결과를 도출하기에는 한계가 있었다고 본다. 다만, 반복적인 시험을 통해 도출한 여러 가지 실험상의 주의할 점, 실험절차, 해석상의 한계 등은 향후 지중오염물질의 거동특성을 명확히 규명하는데 참고할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 주요 오염지역인 군부대 등의 협조를 얻어 현장의 휘발유, 경유 등을 직접 추출하여 각각의 분배계수를 직접 측정하여 실험을 수행한다면, 실제 유류 오염현장에서 적용가능 한 보다 나은 평가기법을 개발할 수 있을 것이다.

#### 사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 환경산업기술원의 지중 환경오염위해관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 2018002440004).

#### References

- Allison, S.B., Pope, G.A., and Sepehrmoori, K., 1991, Analysis of field tracers for reservoir description. *J. Petrol. Sci. Eng.*, **5**(2), 173-186.
- Cooke, C.E., 1971, U.S. Patent Number 3, 590, 923.
- Deans, H.A., 1971, U.S. Patent Number 3, 623, 842.
- Dwarakanath, V., Deeds, N., and Pope, G.A., 1999, Analysis of partitioning interwell tracer tests, *Environ. Sci. Tech.*, **33**(21),

3829-3836.

Haggerty, R. and Gorelick, S.M., 1998, Modeling mass transfer processes in soil columns with pore-scale heterogeneity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62**(1), 62-74.

Haggerty, R., Fleming, S.W., Meigs, L.C., and McKenna, S.A., 2001, Tracer tests in a fractured dolomite, 2. Analysis of mass transfer in single-well injection-withdrawal tests, *Water Resour. Res.*, **37**(5), 1129-1142.

Jin, M., Delshad, M., Dwarakanath, V., McKinney, D.C., Pope, G.A., Sepehrmoori, K., Tilburg, C.E., and Jackson, R.E., 1995, Partitioning tracer test for detection, estimation and remediation performance assessment of subsurface nonaqueous phase liquids, *Water Resour. Res.*, **31**(5), 1201-1211.

Kim, B.A., 2012, Experimental study of the effect of test-well arrangement for partitioning inter-well tracer test on the estimation of NAPL saturation, Chonnam National University, Gwangju, Korea.

Kim, B.A., Kim, Y.C., Yeo, I.W., and Ko, K.S., 2014, An experimental study of the effect of the test-well arrangement on the partitioning interwell tracer test for the estimation of the NAPL saturation, *J. Soil Groundw. Environ.*, **19**(3), 111-122.

Kim, Y.C., 2004, Experimental study on tracer methods and

DNAPL mass transfer characteristics using various aquifer models, Seoul National University, Seoul, Korea.

Martin, A.J.P. and Synge, R.L.M., 1941, A new form of chromatogram employing two liquid phases, *Biochem. J.*, **35**(12), 1358-1368.

Mercado, A., 1966, Recharge and mixing tests at Yavne 20 well field, Underground Water Storage Study Tech. Rep. 12, Publ. 611, 62 pp., TAHAL-Water Planning for Israel Ltd., Tel Aviv.

Neil, E.D., Gary, A.P., and Daene, C.M., 1999, Vadose zone characterization at a contaminated field site using partitioning interwell tracer technology, *Environ. Sci. Tech.*, **33**(16), 2745-2751.

Pickens, J.F. and Grisak, G.E., 1981, Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, *Water Resour. Res.*, **17**(4), 1191-1211.

Wilson, R.D. and McKay, D.M., 1995, Direct detection of residual nonaqueous phase liquid in the saturated zone using SF6 as a partitioning tracer, *Environ. Sci. Tech.*, **29**(5), 1255-1258.

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