

## 현장 규모 biobarrier의 수리학적 특성과 기초 설계

최영학 · 오재일, 왕수균\*, 배범한\*\*

중앙대학교 건설환경공학과, \*이화여자대학교 환경문제연구소 \*\*경원대 토목환경공학과 (yramt22@orgio.net)

### <요약문>

Subsurface biobarrier technology has potential applications to contain contaminated groundwater and/or to degrade toxic pollutants in groundwater. Effective biobarrier formation is need to assess of hydrogeologic characteristics and to conduct practical operation strategies and design based on this prior to design biobarrier. Thus, in this study, we examined hydrogeologic characteristics in biobarrier construction site. Hydraulic conductivities which calculated from slug test data have shown difference with each well as  $1.20 \times 10^{-3} \sim 6.00 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ . Tracer test is a method in which concentration of tracer solution during withdrawal in each well by vacuum extraction system is measured with time. Tracer solution was continuously injected by constant head tank. Measured tracer concentration versus time data were fitted to analytical solution of convection dispersion equation (CDE). The fitting data of CDE to the measured data at each extraction well yielded were 0.61cm/min(pore velocity), 5.38  $\text{cm}^2/\text{min}$ (dispersion coefficient) for discharge rate of 0.47 l/min and 1.75cm/min(pore velocity), 36.34  $\text{cm}^2/\text{min}$ (dispersion coefficient) for discharge rate of 0.93 l/min. As a result, we acquired fundamental parameters which need to design biobarrier and operation strategies.

**key word** : biobarrier, hydraulic conductivity, tracer test, hydrogeologic characteristics.

### 1. 서론

미생물의 성장을 통한 지반내의 투수 계수를 감소시켜 오염원을 차단하는 biobarrier기술은 원위치 생물학적 복원기술(in situ bioremediation)과 유사한 특징을 갖고 있다. 이러한 원위치 생물학적 복원기술을 수행하는 데 있어서 미생물 성장에 필요한 효과적인 영양액 수송을 위해서는 사전에 해당 적용 지반에 관련한 수리학적 특성 분석을 통한 설계/운전 전략을 수립할 수 있는 방안이 필요하다. 따라서, 본 연구는 biobarrier 설치 이전에 해당 지역에서 수리학적 특성에 대해 파악하고, 이것을 바탕으로 biobarrier 형성에 관련한 설계/운전에 대한 기초적인 인자를 확보하고자 한다.

## 2. 연구 지역 및 방법

### 2.1 연구 지역 특성

현장 규모 biobarrier를 설치하기 위한 지역은 인천의 G사 공장 부지로써 주유 탱크에서 유출된 유류 오염물에 대해서 토양 복원 공사가 진행되고 있는 지역으로 복원 방법은 불포화토에 흡착된 휘발성 유기 오염물 제거를 위한 토양 추출법(soil vapor extraction)과 포화토에 형성된 유기 오염물 제거를 위해 양수 처리법(pump and treat)이 적용되고 있다. 현장 규모 biobarrier 설치 지점은 외부로 유류 오염물질의 확산을 막기 위한 차수 목적으로 토양 복원공사가 수행되고 있는 영향 지역에서 떨어진 지점에 Fig. 1과 같이 biobarrier는 길이 5m, 깊이 4.5m 간격 1m로 주입정과 추출정을 설치하였으며, 투수 계수 변화와 영양액의 특성을 파악하기 위한 관측정은 지하수 흐름방향으로 설치하였다. 해당 지역의 토양은 주로 굽은 자갈, 모래, 세립질 모래, 점토로 형성되어 있는데, 시추한 지점의 간격이 1m임에도 불구하고, 지층의 연속성이 확인되지 않는 특성을 보였다. 이것은 G사의 공장 부지를 건설할 당시 인공적으로 토양을 매립함에 따라서 형성된 것으로 사료된다.

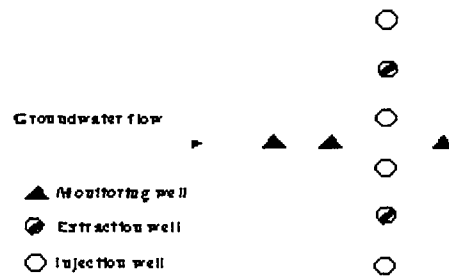


Fig. 1 System configuration for biobarrier study

### 2.2 연구 방법

본 연구에서 biobarrier가 설치되는 지점의 투수 계수를 확인하기 위해 각 well별로 순간충격시험 방법(slug test)을 수행하였으며, 200ml 부피의 slug를 주입하여, 일정 시간 간격으로 water level sensor를 이용하여 수위변화를 확인하였다. Biobarrier의 형성과 추적자 시험을 위한 주입/추출 system에서 주입정은 100l의 marriotte bottle 형식으로 주입정내에서 정수두를 형성하여, 일정유량으로 공급되게 하였으며, 추출정은 well의 직경(2.54cm)이 작아 적절한 집수 면적을 확보 할 수 없기 때문에 기존의 양수 펌프를 이용하지 않고, 토양 추출법에서 dual phase extraction 기술에서 진공을 이용하여 지하수를 추출하는 추출정을 적용하였다.<sup>(1)</sup> 추적자 시험은 Br<sup>-</sup> 이온(80mg/L)을 사용하였고, 추출정에서 가장 가까운 주입정에서 주입하여, 일정 시간 간격으로 추출정에서 채취한 지하수 시료를 Ion-chromatography (Dionex, DX-80)을 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 지하수위 특성

Biobarrier 형성 이전에 지하수위의 특성을 확인하기 위하여, 강우시와 비강우시에 약 한달 간격으로 water level sensor를 이용하여 지하수위를 측정하였으며, Fig. 2와 같다.

강우시와 비강우시에는 지하수위가 약 80cm 정도 수위 변화를 보였으나, 전반적으로 지하수의 전체적인 형상은 크게 변하지 않았다. 비강우시에도 well 별로 수두 경사가 형성되어 있는데, 이는 오염 토양 복원 지역에서 수행하는 pump and treat system에서의 지속적인 양수로 인하여, 해당 지역으로 수두 경사가 형성된 것으로 판단된다.

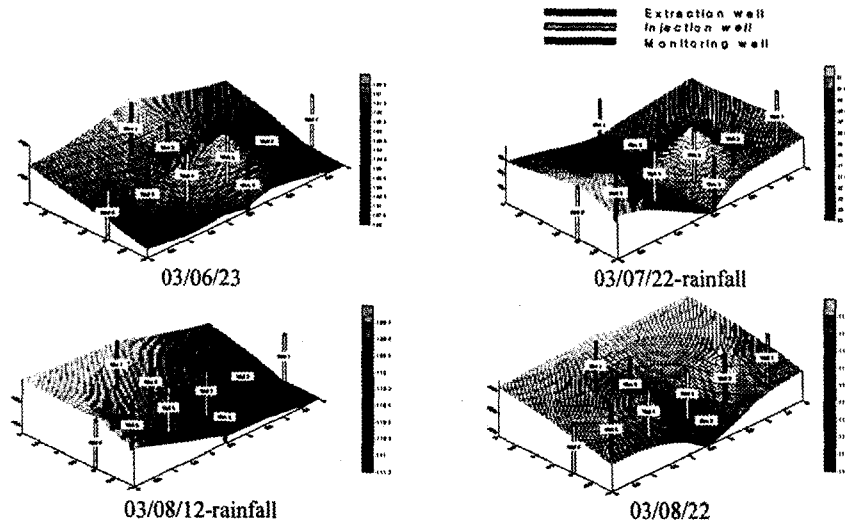


Fig. 2 Profiles of groundwater level during biobarrier study periods

### 3.2 지반 투수 계수 분석

아래 Table 1.은 각 well별로 순간충격시험 방법(slug test)을 이용하여 측정한 투수 계수를 나타내었다. 순간 충격 시험 방법을 통해 확인한 수위 변화 결과는 Hvorslev method를 적용하였으며, 이와 관련한 식은 아래와 같다.<sup>(2)</sup>

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_0}$$

여기서, K: Hydraulic conductivity (cm/sec)

r: Radius of well casing (cm)

R: Radius of well screen (cm)

L: Length of well screen (cm)

$T_0$ : Time where recovery equals 0.37 of initial water level(sec)

Table. 1에서 well의 표기는 주입/추출정의 경우 지하수 흐름 방향에서 좌측으로 각각 순서대로 기재하였으며, 관측정의 경우는 지하수 흐름 방향으로 순서대로 기재하였다.

Table 1. Hydraulic conductivities at each well

Well 1	Well 2	Well 3	Well 4	Well 5	Well 6	Obs 1	Obs 2	Obs 3
$2.67 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-3}$	$6.00 \times 10^{-5}$	$7.40 \times 10^{-4}$	$4.00 \times 10^{-4}$	N/A	$2.15 \times 10^{-3}$	$3.29 \times 10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-3}$

각 well 별 투수계수는 biobarrier 설치 구간이 좁은 영역임에도 불구하고, 매우 상이하게 나타남을 알 수 있는데, 앞서 설명한 바와 같이 G사의 공장 부지 건설 당시 매립토의 불균일성이 원인인 것으로 사료된다. 특히 투수 계수가 낮게 관찰되는 well의 경우 영양액의 주입이 효과적으로 이루어지지 못할 것으로 판단되므로, 이에 대한 적절한 영양액의 주입방법이 고려 되어야 할 것으로 사료된다.

### 3.3 Tracer test 결과

Biobarrier 형성 시 영양액의 주입 및 거동 특성을 사전에 예측하기 위하여 tracer test를 수행하였다.

시간에 따른 상대적인 추적자의 농도와 이류-확산 방정식(Convection-dispersion equation)에 의해 fitting 한 결과를 아래 Fig. 3 과 같이 표현하였다.<sup>(3)</sup> 또한 Table 2.는 이류-확산 방정식을 기본으로 산정한 물질이동 관련 상수를 나타내었다. 전반적으로 추출점에서 검출된 추적자는 추출점 주변의 지하수가 유입되어 상당량 희석되어 낮은 농도로 나타났으며, 추출 유량과 실제 유속을 비교 했을때, 두 번째 추출정 (well 5)에서 상대적으로 지하수의 이동속도가 높은 것으로 확인되었다. 두 번째 추출정 주변은 첫 번째 추출정에 비해 상대적으로 투수계수가 낮은 특성을 갖고 있지만, 낮은 공극률이 이동속도에 영향을 준 것으로 판단된다.

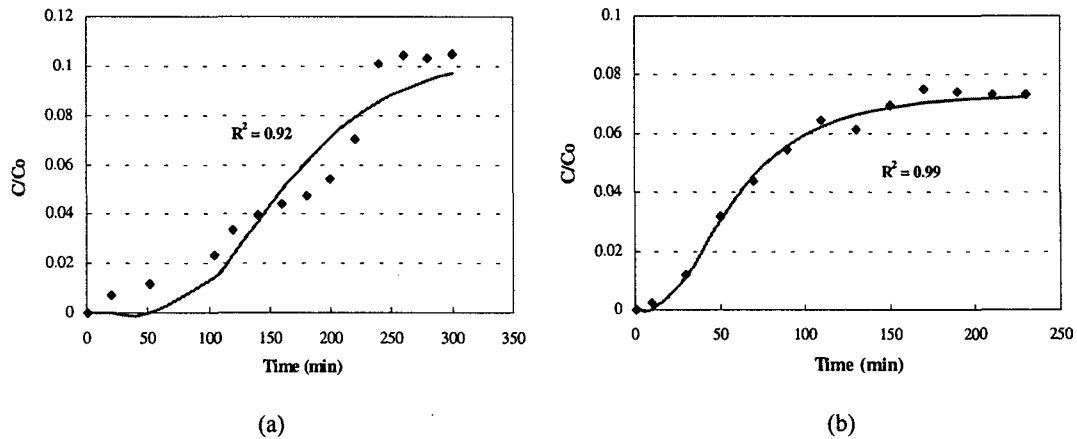


Fig 3. Measured and fitted tracer concentration for each extraction well (extraction well 2 (a), extraction well 5 (b))

Table 2. Estimating transport parameters

Well No.	Pumping rate (l/min)	Pore water velocity (cm/min)	Retardation factor	Dispersion coefficient (cm <sup>2</sup> /min)	Longitudinal dispersivity (cm)	Breakthrough time (min)
Well 2	0.47	0.61	1	5.38	8.82	164.65
Well 5	0.93	1.75	1	36.34	20.77	53.62

기존 연구에서 biobarrier 형성을 위한 영양액(탄소원:acetate, 질소원:nitrate)의 거동 특성은 추적자의 이동, 즉 지하수의 흐름과 유사한 특성을 확인하였다<sup>(4)</sup>. 따라서, 본 tracer test결과는 영양액의 거동과 유사할 것으로 판단되며, 이는 지하수관련 모델을 통하여 적절한 pumping rate 및 기타 설계인자를 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다.

#### 4. 참고문헌

1. US. EPA, "How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites; A guide for corrective action plan reviewer" Chapter XI: Dual phase extraction, Solid waste and emergency response, EPA 510-B-95-007, (1995)
2. Fetter C.W. Applied hydrogeology, Prentice-Hall Inc.(1994)
3. Jon M. Wraith and Dani Or, "Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software" *J. Nat. Resour. Life Sci. Educ*, 27, pp.13~19 (1998).
4. 최영화, 오재일, 배범한, 이태호, 류희욱, "탈질 환경에서 투과매질 내 생물벽체 형성", 대한환경공학회, 25(5), pp616~623, (2003)