

## 강원 유류오염지역의 수리지질 특성 연구

최현미 · 이진용\*  
강원대학교 지질학과

### Hydrogeological Characterization of Petroleum Contaminated area in Kangwon

Hyun-Mi Choi · Jin-Yong Lee\*  
Department of Geology, Kangwon National University

#### ABSTRACT

Estimations of porosity and bulk density, particle size analysis of soli samples, tracer test and slug test were performed in a petroleum contaminated area of Kangwon for understanding characteristics of the aquifer. Porosities of the samples were estimated 0.158~0.257, and bulk densities were estimated as 1.73~2.10 g/cm<sup>3</sup>. Majority proportion of the soil samples was 0.5~1.0 mm size. In the soil texture triangle, all samples were distributed at sand area. Uniformity coefficients were estimated as 7.71~10.39, and thus all samples were poorly-sorted. In the tracer test, Darcy velocity was estimated to 4.8 × 10<sup>-6</sup> cm/day, effective porosity was 0.175, and longitudinal dispersivity was 0.1 m. According to the slug test, hydraulic conductivities of the test wells were estimated as 2.243 × 10<sup>-2</sup>~1.634 × 10<sup>-2</sup> cm/sec. These hydrogeologic parameters can be used for efficient remediation design of the petroleum contaminated area.

**Key words :** Petroleum contaminated area, Tracer test, Particle size analysis, Slug test, Hydraulic conductivity

#### 1. 서 론

유류 누유 사고로부터 발생한 탄화수소계 오염물질은 대부분 불포화층(vadose zone)과 모관수층(capillary fringe)에 나타나며 일부만 불포화대를 통과하여 포화대(saturated zone)에 도달하는데, 오염물질은 포화대에 도달하면 지하수 유동의 영향을 받으므로 포화대의 수리분산특성에 의한 유류오염물질 이동 영향이 크다고 할 수 있다(이준호 외, 2005; 정상용 외, 2006). 대수층 내로 유입된 오염물질은 화학반응(chemical reaction), 희석(dilution), 흡착(adsorption), 분산(dispersion), 이송(transportation), 휘발(volatilization), 생분해(biodegradation) 등에 의하여 저감이 가능하지만 혐기성 환경에서는 직접적인 미생물에 의한 오염물질 분해가 더디므로 대부분의 오염물질은 희석, 흡착, 분산, 이송되기 쉽다(이진용 · 이강근, 2003; Barker et al., 1987; McAllister and Chiang, 1994; Wiedemeier et al., 1996; Cho et al., 1997; Chapelle, 1999; Suarez and Rifai, 2002).

만약 지하수 내 오염물질이 이동하지 않고 더 이상 확산되지도 않는다면 오염물질의 처리는 비교적 용이할 것이다. 그러나 대수층 환경은 매우 복잡하기 때문에 오염물질의 처리와 오염물질 거동에 대한 예측은 어렵다. 대수층 환경이 복잡한 것은 대수층 매질의 구성성분, 공극의 연결성과 연장성, 지하수의 유동방향 등이 원인이며 또한 오염물질의 비중, 용해도, 친수성, 농도, 유입빈도와도 관련이 있다(이근상, 2002). 따라서 대상 지역 대수층과 오염물질의 물리·화학적 특성을 파악한다면 오염물질의 거동 예측은 물론 오염에 의한 피해를 최소화할 수 있으며 이러한 오염물질의 이송과 확산에 대한 정량적 연구에는 추적자시험과 같은 수리분산 특성시험에 의한 분산지수 산정이 적절하다(한정상, 1998; 강동환 외, 2006; Bear et al., 1993; Sahimi, 1995; Charbeneau, 2000).

본 연구에서는 유류오염지역 내 대수층에 대한 토양특성시험 및 추적자시험과 순간수위변화시험을 통하여 연구 지역 대수층 및 토양의 수리지질학적 특성을 파악하였다.

\*Corresponding author : hydrolee@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2010. 1. 27 심사일 : 2010. 2. 11 게재승인일 : 2010. 4. 7  
질의 및 토의 : 2010. 6. 30 까지

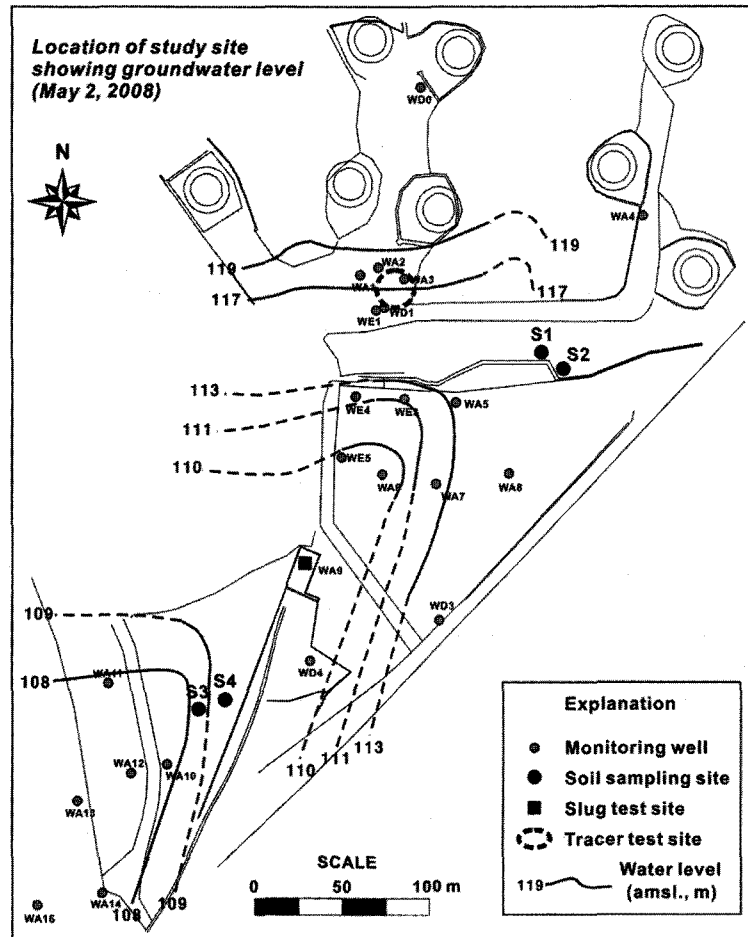


Fig. 1. Locations of groundwater monitoring wells and hydraulic test sites.

이와 같은 시험에서 파악한 수리지질학적 특성은 연구지역 대수층과 토양에서의 오염물질 거동 특성에 대한 이해에 도움이 될 것이며 연구지역 지하수의 오염물질 정화계획 수립에 중요한 정보로 활용될 수 있다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1. 연구지역

연구지역은 강원도에 위치하고 있는 유류오염지역으로 Fig. 1은 연구지역 내 관측정 및 추적자시험과 순간수위 변화시험 위치를 나타낸다. 지하수 흐름 방향은 2008년 5월에 측정한 지하수위를 이용하여 등수위도를 도시해 본 결과 주로 북쪽에서 남쪽방향으로 향하며 지형의 영향으로 남서쪽으로 꺾여 유동한다(Fig. 1). 지하수위는 북쪽에서 119 m 이상으로 높게 나타났고 남쪽으로 갈수록 점점 낮아져 108 m 이하까지 낮아진다. 연중 지하수위 변화는 1~3 m이다. 추적자 시험을 실시한 2008년 7~8월은 연구

지역 연 강수량(1,439.3 mm)의 62.1%인 894.8 mm의 비가 내려 우기의 수리지질학적 조건을 나타내며 이러한 강수변화는 계절별 수리지질학적 변화에 큰 영향을 주는 요인으로 작용한다(이진용 외, 2001).

연구지역의 지질은 선캠브리아기 퇴적암 기원 변성암을 기반암으로 쥬라기 화강암이 관입하였고 그 상부에 제 4기 충적층이 부정합으로 놓여있다(이대성 외, 1974). 연구지역 내 4개 지점에 대한 정밀시추조사 결과 지표물질은 자갈이 섞인 세립~조립의 모래로 이루어진 복토(0.0~5.7 m 범위)로 구성되어 있으며 그 하부에는 잔자갈 및 실트가 섞인 세립~조립질의 모래로 이루어진 봉적층(2.4~6.8 m)과 세립~조립질 모래로 구성된 퇴적층(4.3~5.4 m)이 각각 다른 지점에서 나타났다(한국농촌공사, 2007). 풍화토는 실트가 섞인 세립~조립질의 모래로 이루어져 있으며 5.4~14.5 m 범위에서 나타나며 풍화암은 매우 조밀한 세립~조립질 모래로 구성되어 있으며 7.0~14.5 m 범위에서부터 나타난다(한국농촌공사, 2007).

## 2.2. 연구방법

### 2.2.1. 토양특성시험

연구지역내 토양의 공극률과 용적밀도 측정, 입도분석을 위하여 4개의 토양시료를 채취하였다. 시료명은 채취 순서에 따라 S1~S4로 명명하였으며 연구지역내 트렌치 사면 두 곳에서 각각 2개씩 채취하였다(Fig. 1). 토양시료 채취 시 한쪽이 막혀있는 지름 7 cm, 높이 9.6~10 cm의 PVC 파이프를 토양 표면에 고무망치로 밀어 넣는 방법을 사용하였으며 토양이 교란되지 않도록 주의하였다. S1과 S2는 두 시료 모두 트렌치 사면의 바닥에서부터 1 m 높이에서 채취하였으며 S1의 경우 시료채취 시 내부에서 검은색의 유류가 배어있는 것을 발견하였고 풍화된 황토색의 조립질-세립질 모래 크기의 토양으로 피복되어 있었다. S3과 S4를 채취한 트렌치는 복토를 하지 않은 상태로 기존의 토양이 그대로 보존되어 있었다. S3은 트렌치 상부(지표면)로부터 0.75 m 심도에서 채취하였으며 황갈색의 조립질-세립질 모래 크기가 대부분이었고 자갈이 소량 포함되어 있었다. S4는 트렌치 상부(지표면)로부터 1.5 m 심도에서 채취하였으며 과거 이곳은 논으로 흑갈색의 점토이다.

채취한 시료는 PVC 파이프 표면 및 상단에 묻은 흙을 깨끗이 제거하여 실험실에서 용적밀도와 공극률을 측정한 뒤 각 시료의 토양입도분석을 실시하였다. 용적밀도는 Blake and Hartge(1986)의 방법에 따라 시료채취에 사용한 파이프의 부피와 시료의 질량을 이용하여 계산하였다(식 1). 공극률은 교란되지 않은 시료에 정량 스폰이트로 증류수를 주입해 공극을 증류수가 가득 채우도록 한 뒤 이 때 사용된 증류수의 양과 파이프의 부피를 이용하여 계산하였다(식 2).

$$\text{Bulk density} = \frac{\text{Weight of soil sample (g)}}{\text{Volume of soil sample (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

$$\text{Porosity} = \frac{\text{Volume of pores (ml)}}{\text{Volume of soil sample (cm}^3\text{)}} = \frac{Vs}{V} \quad (2)$$

토양입도분석의 경우 4개의 토양시료를 비이커에 담아 40°C의 건조로에 1차 건조시킨 뒤 과산화수소를 이용하여 유기물을 완전히 제거하였다. 칼곤(calgon) 용액처리로 토양입자가 서로 덩어리지지 않도록 하였으며, 1차와 같은 조건에서 2차 건조 후 실온에서 충분히 식혀 토양시료의 무게를 측정하였다. 체(sieve) 분석의 경우 체눈 크기 4.0, 2.0, 1.0, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 mm의 체를 이용하였으며 기계식 요동기(Ro-Tap)에 넣고 10분간 작동시켰다. 분리작업이 끝난 뒤 손실되는 시료가 없도록 주의하여 각

시료의 입도별 질량을 측정하였고 0.063 mm 이하 시료는 실트(silt)와 점토(clay) 크기로 자세한 입도분석을 위해 레이저 산란방식의 LPSA(Laser Particle Size Analyzer) 입도분석기(Mastersizer 2000)를 이용하였다.

토양입도분석 결과는 균등계수(uniformity coefficient,  $C_u$ )를 계산함으로써 토양의 분급을 판단할 수 있다.  $C_u$ 는 중량 기준 10% 이하 입자의 크기  $d_{10}$ 에 대한 60% 이하 입자의 크기  $d_{60}$ 의 비로 나타낸다(식 3). 분급은  $C_u$ 가 4 이하이면 우수(well-sorted), 6 이상이면 불량(poorly-sorted)한 것으로 판정하며 입자크기 곡선의 10%에 해당하는 크기를 유효 입자크기(effective grain size)  $d_e$  라고 한다(Hillel, 1982; Wray, 1986; Mohammad et al., 1997).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3)$$

### 2.2.2. 추적자시험

자연구배 추적자시험을 2008년 7월 24일부터 8월 2일 까지 두 개의 추적자시험 사이트에서 동시에 실시하였다. 두 사이트는 서로 15 m 정도 떨어져 있으며 지하수 흐름 방향으로 보아 시험기간 동안 서로 영향을 주지 않을 것으로 판단하였다. 1번 시험 사이트의 경우 1개의 주입정과 5개의 관측정이 있고 2번 시험 사이트는 1개의 주입정과 2개의 관측정이 있으며 각 관정의 위치 및 관정 간 거리는 Fig. 2에 표시하였다. 주입정 및 관측정의 제원은 Table 1에 나타내었다. 1번 시험 사이트의 수두구배는 0.034였으며 2번 시험 사이트의 수두구배는 0.002로 계산되었다. 시험부지 내 대수층의 평균 수리전도도는 한국농촌공사(2007)에서 조사한 결과  $3.01 \times 10^{-4}$  cm/sec이었으며 이를 바탕으로 시험을 계획하였다.

추적자시험을 실시하기 전 각 주입정 및 관측정의 지하수위와 브롬이온(Br<sup>-</sup>) 농도, 전기전도도(EC)의 배경농도를 측정하였다. 브롬이온농도 측정은 오리온사의 이온선택성 전극(ISE) 및 미터기를 사용하였고 전기전도도 측정에는 호리바사의 전극 및 미터기를 이용하였다. 추적자물질은 브롬이온을 이용하였으며 각 시험 당 16,630 mg/L 농도의 브롬이온 용액 60 L을 주입정에 주입하였다(Table 2). 브롬이온 용액 60 L을 사이펀 원리로 주입정에 모두 주입하는 데에는 약 20~30분 정도 소요되었으며 완전히 주입이 끝난 후부터 1 시간 간격으로 일회용 배일러를 이용하여 관측정에서 지하수를 채취하였다. 연구지역이 일반인 출입금지 구역인 관계로 저녁 6시부터 아침 9시까지 추적자물질에 대한 농도 측정이 불가능하였다.

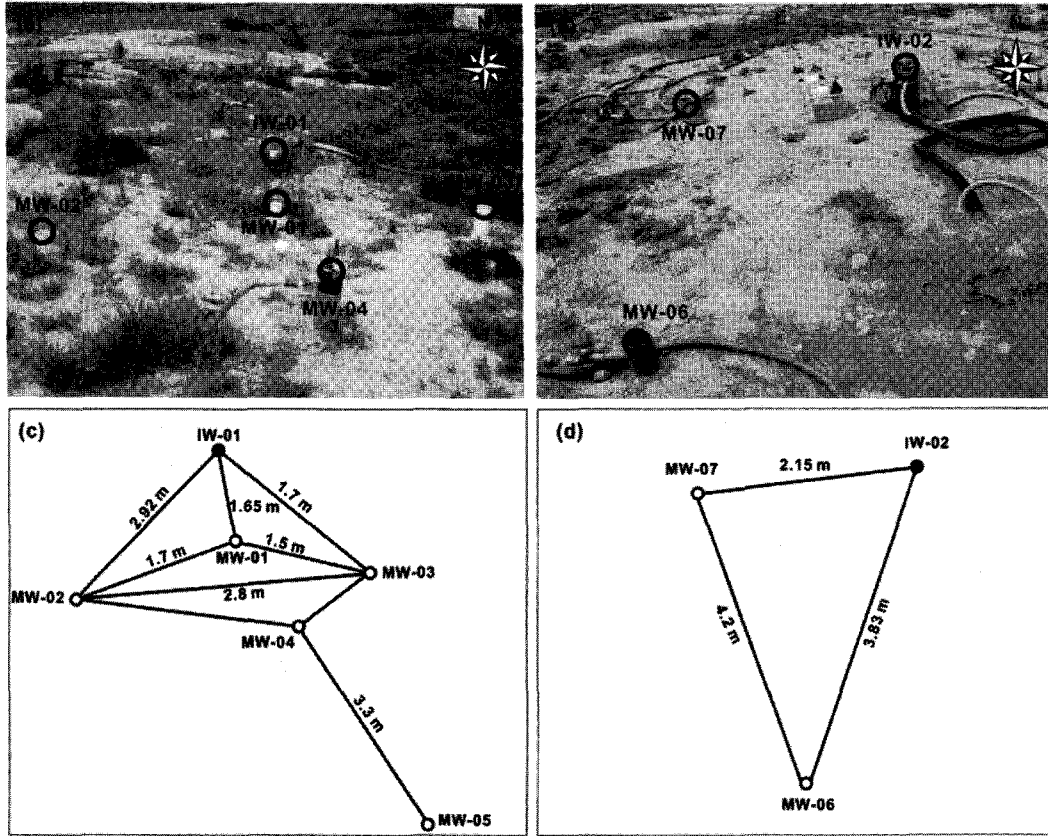


Fig. 2. Location of the tracer test sites and layouts of the test wells.

Table 1. Well completions for the tracer test

Test	Well No.	Well depth ( <sup>a</sup> GL, m)	Depth to water (m)	Screen (GL, m)	Well diameter (mm)	Hydraulic gradient
#1	<sup>b</sup> IW-01	8.54	6.69	1.34~4.34/5.84~8.84	75	0.034
	<sup>c</sup> MW-01	9.66	5.86	10.38~11.38	75	
	MW-02	9.12	5.83	2.85~5.85/7.35~10.35	75	
	MW-03	10.1	6.30	2.6~5.6/7.1~10.1	75	
	MW-04	<sup>d</sup> -	6.70	-	-	
	MW-05	-	6.35	-	-	
#2	IW-02	9.48	6.43	7~9	200	0.002
	MW-06	9.5	6.56	7~9	100	
	MW-07	9.8	6.42	7~9	100	

<sup>a</sup>GL: Below ground surface

<sup>b</sup>IW: Injection well

<sup>c</sup>MW: Monitoring well

<sup>d</sup>-: Not available

Table 2. Conditions for the natural gradient tracer tests

Conditions	Test #1	Test #2
Tracer	Br <sup>-</sup> as KBr	
Mass of tracer	1,500 g of KBr	
Volume of injected solution	60 L	
Injection concentration	16,630 mg/L	

2.2.3. 순간수위변화시험

순간수위변화시험은 2008년 10월 2일에 WA9 관정에서 2회 실시하였으며 시험 위치는 Fig. 1에 표시하였다. 순간수위변화시험은 해당 시험관정 내 대수층의 수리전도도를 산정하기 위한 것으로 시험공의 물을 순간적으로 뽑아낸 뒤 경과시간에 따른 수위회복을 관찰하는 방법을 이용하

**Table 3.** Estimated porosities and bulk densities for the soil samples

Soil sample	Diameter of pipe (cm)	Height of pipe (cm)	Volume of soil sample (cm <sup>3</sup> )	Volume of pores (mL)	Weight of soil (g)	Porosity	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
S1	7	10	384.65	61	767.25	0.158	1.99
S2	7	9.6	369.264	95	640.67	0.257	1.73
S3	7	9.6	369.264	95	695.82	0.257	1.88
S4	7	9.7	373.100	64	781.71	0.171	2.10

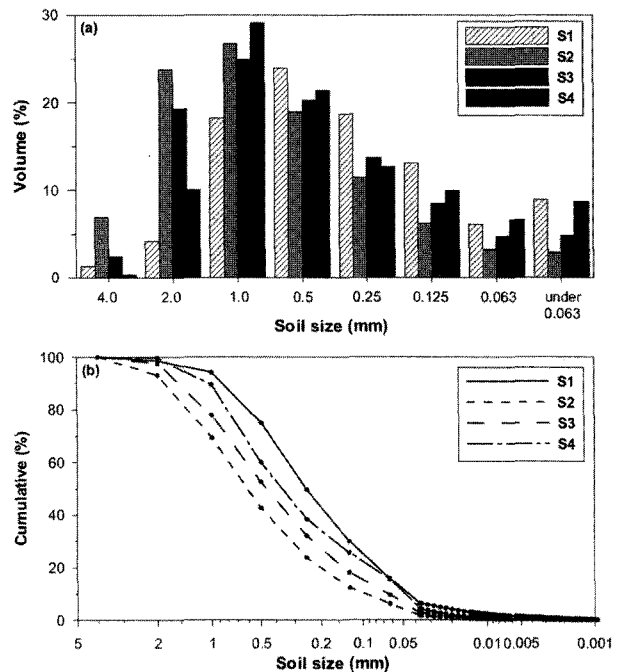
였다. 물을 뽑아내는데 사용한 베일러는 외부 길이는 92 cm, 외부 지름은 4 cm, 내부 부피 1.16 L이며 시험 전 관 정 내에 삽입하여 물을 가득 채운 뒤 레벨로거(levellogger)로 수위가 안정되는 것을 확인하였다. 레벨로거는 Solinst사의 MODEL 3001을 사용하였으며 이를 케이블로 연결한 레벨로더(levelloader)로 수위변화를 모니터링 하였다. 수위가 안정되었을 때 순간적으로 베일러를 제거하였으며 일정한 양의 물이 제거된 후 다시 수위가 안정될 때까지의 수위 변화 결과를 이용하여 수리전도도를 산정하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 토양특성시험

4개의 토양시료에 대한 공극률과 용적밀도 계산결과 공극률의 경우 S1은 0.158, S2는 0.257, S3은 0.257, S4는 0.171로 계산되었으며, S2와 S3에서 가장 큰 공극률이 나타났다(Table 3). 용적밀도의 경우 S1이 1.99 g/cm<sup>3</sup>, S2는 1.73 g/cm<sup>3</sup>, S3은 1.88 g/cm<sup>3</sup>, S4는 2.10 g/cm<sup>3</sup>로 계산되었으며 S4가 2.10 g/cm<sup>3</sup>로 가장 높았다(Table 3). S1과 S2의 경우 기존 토양과 복토가 섞인 토양으로 기존 토양보다 밀도가 낮은 모래가 많이 함유되어 있으며 복토되지 않은 토양에서 채취한 S3과 S4는 S1과 S2보다 공극률과 용적밀도가 높다. 체와 정밀입도분석기(LPSA)를 이용한 토양입도분석 결과는 각 입도별 개별함량과 누적함량별로 구분하여 그래프로 도시하였다(Fig. 3).

S1의 경우 0.5 mm 크기의 모래의 함량비율이 25.41%로 가장 높았으며 S2, S3, S4는 1.0 mm의 함량비율이 25.3~29.44% 범위를 차지하여 가장 높았다. 실트와 점토



**Fig. 3.** Particle size distributions of the soil samples.

크기인 0.063 mm 이하 시료 비율은 S1이 9.48%, S4는 8.86%로 가장 높았으며 S2가 2.91%로 가장 낮았다. 자갈크기인 4.0 mm 이상 시료 비율은 S2가 6.89%로 가장 높았으며 S4가 0.34%로 가장 낮았다. 토양시료의 모래, 실트와 점토 크기의 함량을 토양 조직 삼각도(soil texture triangle)에 도시한 결과 4개의 시료 모두 모래영역에 표시되었다(Fig. 4). 각 시료의 균등계수는 S1이 7.71, S2가 8.22, S3이 9.64, S4가 10.39로 산정되었으며 모든 시료의 균등계수가 6 이상으로서 분류이 불량 또는 매우 불량한 것으로 나타났다(Table 4).

**Table 4.** Estimations of uniformity coefficient and effective grain size

Soil sample	d <sub>60</sub> (mm)	d <sub>10</sub> (mm)	Uniformity coefficient (C <sub>u</sub> )	Effective grain size (d <sub>e</sub> , mm)
S1	0.347	0.045	7.71	0.045
S2	0.798	0.097	8.22	0.097
S3	0.617	0.064	9.64	0.064
S4	0.499	0.048	10.39	0.048

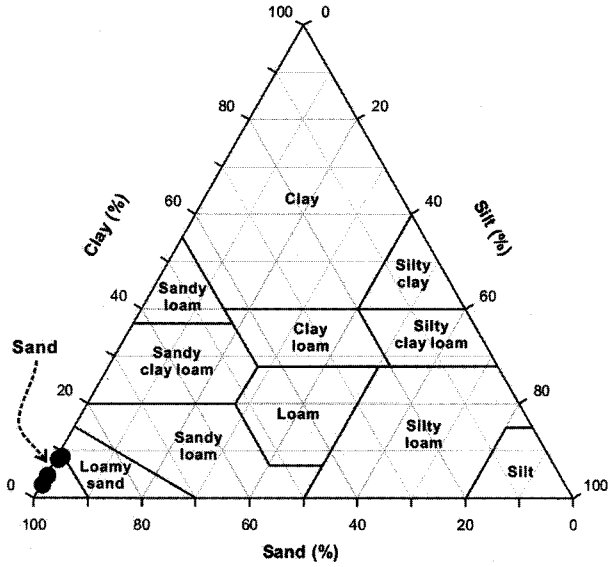


Fig. 4. Distributions of the soil samples in the soil texture triangle.

3.2. 추적자시험

2개 시험 사이트에서 측정된 브롬이온농도 및 EC의 변화를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었으며 시험 기간 중 두 차례 비가 내렸던 기간은 점선으로 표시하였다. 일반인의 출입이 제한되는 시간에는 불가피하게 농도 측정을 할 수 없었으며 이와 같은 사정으로 생긴 결측은 무시하고 CATTI 프로그램(Sauty and Kinzelbach, 1992)을 이용하여 다르시 속도(Darcy velocity), 유효공극률(effective porosity) 및 종분산지수(longitudinal dispersivity)를 산정하였다.

1번 시험 사이트의 4개 관측정에 대한 농도이력곡선을 도시한 결과 MW-02 관정에서 EC와 브롬이온 농도변화가 뚜렷하게 나타났으며 MW-01, 03, 05관정에서는 EC와 브롬이온농도가 배경농도와 큰 차이가 없이 불규칙하게 측정되었다(Fig. 5). MW-02 관정의 경우 배경농도 측정에서 브롬이온농도는 3.3 mg/L, EC는 132  $\mu$ S/cm이었고 추적자 물질 주입 후 6시간까지는 브롬이온농도 19.6 mg/L, EC 154  $\mu$ S/cm로 증가하였으며 23시간 후에는 브롬이온농도가 249 mg/L, EC는 425  $\mu$ S/cm로 증가하여 의미 있는 추적자 농도변화를 보였다. 2번 시험 사이트의 2개 관측정에 대한 농도이력곡선을 도시한 결과(Fig. 6) 두 관정 모두 뚜렷한 브롬이온농도와 EC의 증가·감소경향을 찾을 수 없었으며 1번 사이트의 MW-02를 제외한 관측정과 비슷한 경향으로 나타났다. 두 관측정은 브롬이온농도와 EC의 변화가 있었으나 소폭으로 증가·감소했을 뿐 추적자물질의 도달을 명확히 판단할 수 없었고 두 향

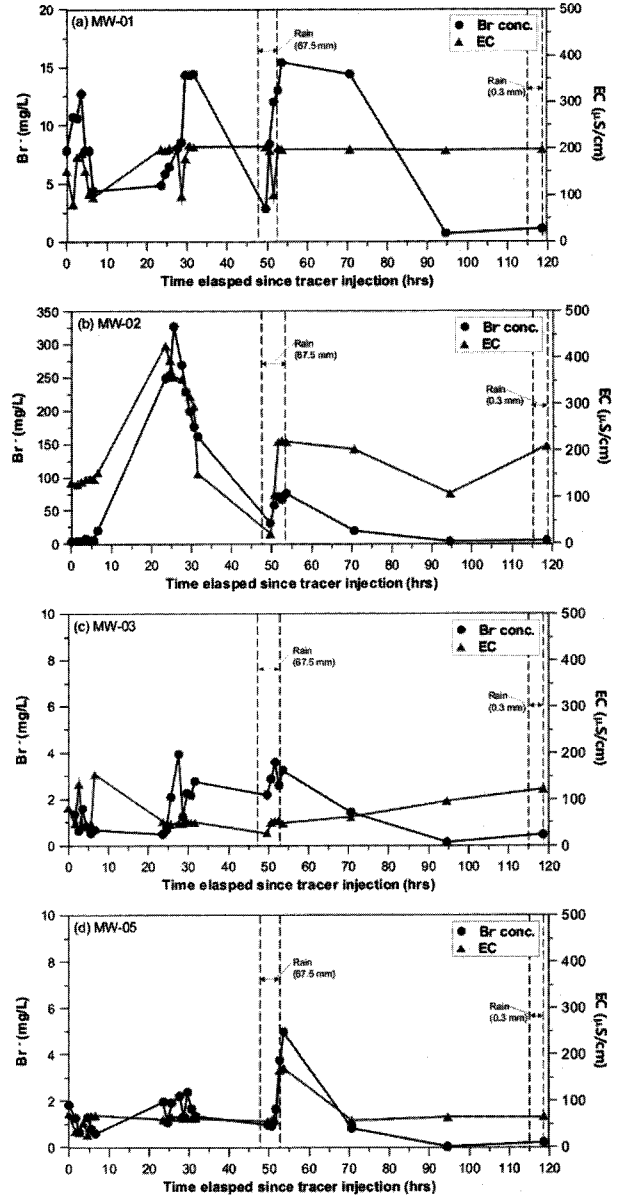


Fig. 5. Results of the tracer test in the test site #1.

목간의 상관성을 찾기 어렵다.

각 시험 사이트에서의 선형유속(linear velocity)을 계산한 결과 1번 시험 사이트에서는 2.94 cm/day, 2번 시험 사이트에서는 0.17 cm/day로 계산되었으며 MW-02 관정에서 관측한 자료를 이용하여 다르시 속도, 유효공극률과 종분산지수를 산정한 결과 다르시 속도는  $4.8 \times 10^{-6}$  cm/day, 유효공극률은 0.175이고 종분산지수는 0.1m로 나타났다(Table 5).

다른 관측정에 비해 MW-02 관정에서 농도이력곡선이 가장 잘 나타난 것은 주입정과 MW-02 관정 간의 방향이 시험지역의 지하수 유동방향과 가장 잘 맞았기 때문이

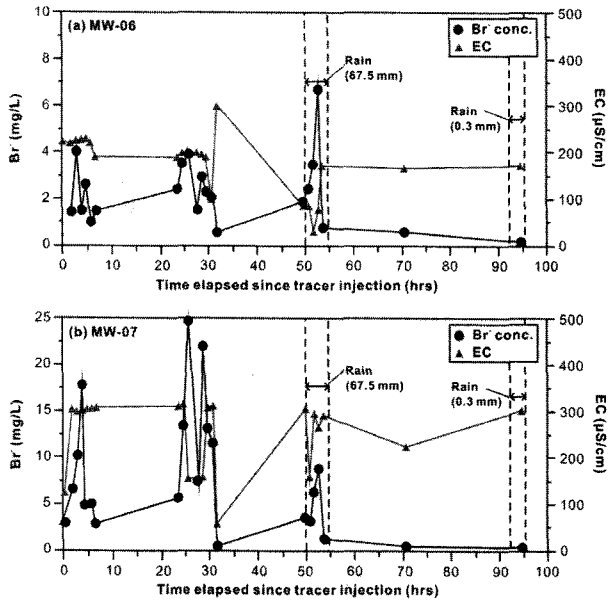


Fig. 6. Results of the tracer test in the test site #2.

Table 5. Estimated hydrogeologic properties from the tracer test

Darcian velocity (cm/day)	Effective porosity	Longitudinal dispersivity (m)
$4.8 \times 10^{-6}$	0.175	0.1

며 다른 관측점에서 나타난 브롬이온 농도와 EC의 변화는 횡적 확산에 의한 것이다. 추적자 물질 주입 후 48-52시간째 비가 내려 일부 관점에서 브롬이온 농도와 EC의 일시적인 상승이 나타났는데 이는 빗물이 대수층에 충전되는 과정에서 추적자 물질의 희분산도를 높였기 때문으로 사료된다. 보다 정확한 수리상수 산정을 위해서는 강우가 없는 기간에 수차례 시험을 반복하는 것이 필요하다(이진용 외, 1999, 2001; Lee and Lee, 1999).

추적자시험에서 염소이온을 추적자물질로 사용하는 경우 밀도효과(effect of density)의 영향을 줄이기 위해 주입농도가 3,000 ppm을 넘지 않도록 하는 것이 바람직하다(Davis et al., 1985). 본 연구에서 사용한 주입 브롬이온 농도는 16,630 mg/L로 Davis et al.(1985)의 언급을 고려하였을 때 밀도영향이 우려되는 고농도이다. 그러나 실제 시험 과정에서 측정된 브롬이온의 농도는 최고 249 mg/L로 주입농도에 비해 크게 낮은 농도로 측정되었으며 이러한 결과로 보아 주입정을 제외한 관측점에서 밀도영향은 작을 것으로 사료된다.

### 3.3. 순간수위변화시험

순간수위변화시험 결과를 AQTESOLV의 Bouwer-Rice

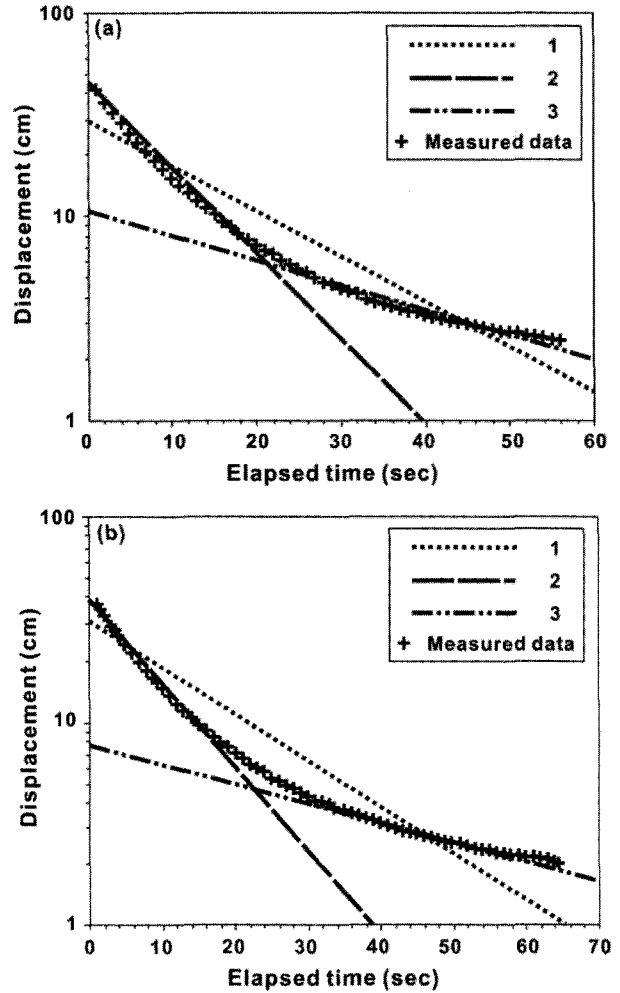


Fig. 7. Results of the slug tests. (a): Test #1, (b): Test #2.

방법으로 해석하여 그래프에 도시하였다(Fig. 7). 2회의 시험결과를 경과시간에 따라 세 부분으로 나누어 각각의 수리전도도를 산정한 결과 첫 번째 시험에서의 1번 그래프(전체평균 수리전도도는  $1.04 \times 10^{-2}$  cm/sec)이었으며 2번 그래프(베일러를 제거한 직후)의 수리전도도는  $5.87 \times 10^{-3}$  cm/sec, 3번 그래프(시험의 종결부)에서는  $2.243 \times 10^{-2}$  cm/sec로 나타났다(Table 6). 두 번째 시험에서의 1번 그래프(전체평균 수리전도도는  $9.201 \times 10^{-3}$  cm/sec)이었으며 2번 그래프(베일러를 제거한 직후)에는  $4.69 \times 10^{-3}$  cm/sec, 3번 그래프(시험 종결부)에서는  $1.634 \times 10^{-2}$  cm/sec로 계산되었다(Table 6). 일반적으로 순간수위변화시험에서 산정하는 평균 수리전도도에서 경과시간 초기의 값은 관정인 접 물질의 영향을 많이 받은 것이므로 사용하지 않고 경과시간이 긴 구간에서의 평균변위를 사용하므로 전산적인 수치는 각 시험에서 계산한 3번 그래프(시험 종결부)의 수리전도도 산정값을 취하도록 하였다(Lee and Lee, 1999).

**Table 6.** Estimated hydraulic conductivities from the slug tests

Test No.	Solution	Aquifer model	Graph No.	K (cm/sec)
#1	Bouwer-Rice	Unconfined	1	$1.04 \times 10^{-2}$
			2	$5.87 \times 10^{-3}$
			3	$2.243 \times 10^{-2}$
#2	Bouwer-Rice	Unconfined	1	$9.201 \times 10^{-3}$
			2	$4.69 \times 10^{-3}$
			3	$1.634 \times 10^{-2}$

위에서 계산된 수리전도도는 Bedient and Huber(1992)의 미고결 퇴적층 별 수리전도도와 비교해 보았을 때 본 시험 관측점 내 대수층 지층이 자갈( $3.0 \sim 3 \times 10^{-2}$  cm/sec)과 조립질 모래( $6 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-5}$  cm/sec), 중립질 모래( $6 \times 10^{-2} \sim 9 \times 10^{-5}$  cm/sec), 세립질 모래( $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-5}$  cm/sec) 등으로 이루어졌을 것으로 추정할 수 있으며 투수성이 매우 좋은 것으로 판단된다(Bedient and Huber, 1992). 한국농촌공사(2007)가 측정한 WA9 관정의 수리전도도는  $1.03 \times 10^{-3}$  cm/sec이었으며 연구지역의 전체 평균 수리전도도는  $3.01 \times 10^{-4}$  cm/sec로서 본 연구에서 측정한 수리전도도가 기존의 측정 결과보다 15~74배 정도 높게 추정되었다. 이와 같은 수리전도도의 차이는 연구지역에서 오염물질 정화작업을 위해 설치한 트렌치 및 복토작업 등이 대수층에 일부 영향을 주었기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 강원지역의 유류오염지역에서 토양특성 시험, 추적자시험, 순간수위변화시험을 실시하였다. 이와 같은 수리지질학적 시험을 통해 대수층과 토양을 통하여 이동할 수 있는 유류오염물질의 거동 특성에 대한 이해를 높이고자 하였다. 지하수위 측정 결과 연구지역내 지하수는 지형적 영향을 받아 연구지역 중심을 따라 북쪽에서 남쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 4개 지점에서 채취한 토양시료의 공극률은 0.158~0.257 범위로 그리고 용적 밀도는 1.73~2.10 g/cm<sup>3</sup>로 측정되었다. 또 토양입도 분석 결과 0.5 mm와 1.0 mm 크기의 모래의 함량비율이 가장 높았으며 두 입도가 각 토양시료 내에서 차지하는 비율은 42.69~50.50% 범위로 나타났다. 토양 조직 삼각도를 도시한 결과 4개의 시료 모두 모래영역에 표시되었으며 균등계수는 7.71~10.39로 분류이 다소 불량한 것으로 나타났다.

추적자시험과 순간수위변화시험 결과 연구지역의 다르시 속도는  $4.8 \times 10^{-6}$  cm/day, 유효공극률은 0.175, 종분산지수는 0.1 m, 수리전도도는  $2.243 \times 10^{-2}$  cm/sec와  $1.634 \times 10^{-2}$  cm/sec로 나타났다. 상기의 수리지질학적 시험 결과

를 종합하면 연구지역의 대수층은 대부분 투수성이 매우 좋은 자갈, 조립질 모래, 중립질 모래, 세립질 모래 등으로 이루어졌음을 알 수 있으며, 다르시 속도와 종분산지수, 수리전도도에 영향을 주는 것으로 사료된다. 따라서 연구지역의 대수층은 지하수뿐만 아니라 유류오염물질의 이동이 비교적 쉬울 것으로 사료되므로 유류오염물질의 확산 방지 및 오염물질 정화를 위한 적극적인 조치가 요구된다.

#### 사 사

본 논문은 한국지하수토양학회에서 수행한 “○○주변지역 지하수의 자연저감 평가” 연구(H-Plus Eco 및 한국농어촌공사 지원)의 일부입니다. 시료채취, 현장시험 및 분석에 도움을 준 김재웅에게 고마움을 전합니다. 본 논문의 발간은 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업(173-092-010)”에서 지원받았습니다.

#### 참 고 문 헌

- 강동환, 정상용, 김병우, 2006, 수평적으로 불균질한 단열암반층에서 단공주입양수 추적자시험에 의한 수리분산특성, 지하수토양환경, 11(6), 53-60.
- 이근상, 2002, 지하수 수리와 환경, 구미서관, 서울, p. 414.
- 이대성, 남기상, 이하영, 양승영, 1974, 한국지질도(1:50,000), ○도폭 및 설명서, 국립지질조사소, p. 18.
- 이명재, 이진용, 목종구, 여인옥, 이강근, 박유철, 안경환, 원종호, 2007, 다중 추적자 시험을 통한 폐공의 지하수 오염가능성 평가, 지질학회지, 43(2), 241-252.
- 이준호, 박갑성, 2005, 고온 공기분사공정법에서의 유해 오염물질 TPH, VOCs의 대수환경층 거동, 대한환경공학회지, 7, 28-34.
- 이진용, 이강근, 2003, 지반환경내 염화유기용제의 자연저감 고찰, 지질학회지, 39(4), 545-555.
- 이진용, 이강근, 정형재, 배광옥, 1999, 순간수위변화 및 양수시험을 통한 수리상수 추정 및 문제점 분석, 지하수토양환경, 6(1), 14-22.



- 이진용, 천정용, 이강근, 이민효, 윤정기, 2001, 다공질 천층 대수층에서의 추적자 이동 연구, *지질학회지*, **37**(2), 309-316.
- 정상용, 강동환, 이민희, 손주형, 2006, 복합토양층의 불포화대와 포화대에서 연속주입 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구, *지하수토양환경*, **11**(4), 48-56.
- 한국농촌공사, 2007, ○○지역 토양오염정화사업 정밀조사 및 실시설계 보고서, p. 1-140.
- 한국지하수토양환경학회, 2009, ○○주변지역 지하수의 자연저감 평가 최종보고서, p. 139.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, p. 1071.
- Barker, J.F., Patrick, J.F., and Major, D., 1987, Natural attenuation of aromatic hydrocarbons in a shallow sand aquifer, *Ground Water Monit. Rev.*, **7**, 64-71.
- Bear, J., Tsang, C.F., and de Marsily, G., 1993, Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Academic Press Inc., p. 560.
- Bedient, P.B. and Huber, W.C., 1992, Hydrology and Floodplain Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, USA, p. 692.
- Blake, G.R. and Hartge, K.H., 1986, Bulk density, Methods of soil analysis, Part 1, 2nd ed., Agron., Monogr., 9, ASA and SSSA, Madison, WI, 363-375.
- Chapelle, F.H., 1999, Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated ground water: the perspectives of history and hydrology, *Ground Water*, **37**, 122-132.
- Charbeneau, R.J., 2000, Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport, Prentice-Hall, Inc., p. 593.
- Cho, J.S., Wilson, J.T., DiGiulio, D.C., Vardy, J.A., and Choi, W., 1997, Implementation of natural attenuation at a JP-4 jet fuel release after active remediation, *Biogradation*, **8**, 265-273.
- Davis, S.N., Campbell, D.J., Bentley, H.W., and Flynn, T.J., 1985, Ground Water Tracers, NGWA, p. 200.
- Hillel, D., 1982, Introduction to soil physics, Academic Press, Orlando, FL, p. 78.
- 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**(5), 692-700.
- McAllister, P.M. and Chiang, C.Y., 1994, A practical approach to evaluate natural attenuation of contaminants in ground water, *Ground Water Monit. Rem.*, **14**, 161-173.
- Mohammad, A.H., Ahmad, J., and Hamid, R.K., 1997, Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran, *Plant and Soil*, **190**, 301-308.
- Sahimi, M., 1995, Flow and transport in porous media and fractured rock, VCH, p. 483.
- Sauty, J.P. and Kinzelbach, W., 1992, CATTI: Computer aided tracer test interpretation, International Groundwater Modeling Center, Golden, Colorado.
- Suarez, M.P. and Rifai, H.S., 2002, Evaluation of BTEX remediation by natural attenuation at a coastal facility, *Ground Water Monit. Rem.*, **22**, 62-77.
- Wiedemeier, T.H., Wilson, J.T., Kampbell, D.H., Miller, R.N., and Hansen, J.E., 1996, Approximation of biodegradation rate constants for monoaromatic hydrocarbons (BTEX) in ground water, *Ground Water Monit. Rem.*, **16**, 186-194.
- Wray, W.K., 1986, Measuring engineering properties of soil. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, p. 276.