

## 단공주입양수 추적자시험을 이용한 폐기물매립장 주변의 침출수 확산 연구

강동환 · 정상용 · 김병우  
부경대학교 환경지질과학과  
ak1k1k1@mail1.pknu.ac.kr

### 요약문

폐기물매립장에서 발생하는 침출수의 확산정도를 정량적으로 추정하기 위해 매립장 주변에 설치되어 있는 2개 지하수공(BWM-1, BWM-2)에서 단공주입양수 추적자시험이 실시되었다. 브롬(Br<sup>-</sup>) 이온이 추적자로 이용되었으며, 추적자시험은 주입단계, 체이서단계 및 양수단계의 과정으로 실시되었다. 시험대상 구간은 지표면하 20~24m에 해당하는 파쇄암반층이며, 주입율과 양수율은 추적자시험 이전에 실시되어진 양수시험 자료에 의해 산정되었다. BWM-1 지하수공의 단공주입양수 추적자시험에 의해 추정된 종분산지수는 공극율이 0.01, 0.05, 0.1 및 0.5인 경우에 각각 9.50, 4.25, 3.00, 1.34 cm 이다. 시험대수층의 공극율은 대략 0.05~0.20의 범위이며, 따라서 종분산지수는 2~4cm인 것으로 추정된다. BWM-2 지하수공의 단공주입양수 추적자시험에 의해 추정된 종분산지수는 공극율 0.01, 0.05, 0.1 및 0.5인 경우에 각각 3.32, 1.49, 1.05, 0.47cm 이다. 시험대수층의 공극율은 대략 0.05~0.20의 범위이며, 따라서 종분산지수는 1~2cm인 것으로 추정된다. 폐기물매립장에서 침출수가 유출할 경우, BWM-2 지하수공 주변의 파쇄암반층이 BWM-1 지하수공 주변의 파쇄암반층보다 침출수 확산이 2배 정도 빠르게 발생할 것으로 추정되었다.

주요어 : 단공주입양수 추적자시험, 종분산지수, 침출수 확산.

### 1. 서 론

현재 국내에서 실시된 현장추적자시험은 일반적인 지질매체의 수리상수 추정, 댐안정성 검토, 유류오염지역에서의 토양오염복원을 위한 포화대와 불포화대내에서의 수리분산특성 등이 연구되었다(이진용 외, 2001; 농업기반공사, 2002). 또한 자연 상태의 지하수 수질성분을 모니터링 하여 수리분산 모델링을 통한 해수침투 범위와 경로를 규명하는 연구도 수행되어 진 바 있다(심병완, 2003; 심병완 외, 2002, 2003). 추적자시험을 이용한 지질매체내에서의 수리분산특성 연구는 다양한 방법과 목적으로 모든 지질환경에 적용되어 질 수 있다. 단공주입양수 추적자시험은 주로 시험공 주변대수층의 종분산지수 추정, 대수층 내에서의 오염물 흡착능과 화학적인 반응을 등의 연구에 이용되어 지고 있다(Pickens et al., 1981, Haggerty et al., 1998, Snodgrass et al., 1998). 단공주입양수 추적자시험에 의해 추정된 종분산지수값의 규모가 시험공 주변의 수 m 정도에 한정되어 지지만, 시험비용과 소요시간의 경제성과 추적자의 회수가 가능하여 국·내외에서 널리 실시되어 지고 있다. 본 연구에서는 폐기물매립장에서 유출되어지는 침출수가 주변대수층으로 확산되는 정도를 단공주입양수 추적자시험을

통해 정량적으로 추정하였으며, 향후에는 흡착(sorption) 반응에 의한 침출수확산의 지연(retardation) 정도를 연구하고자 한다. 또한, 본 연구는 매립장 침출수에 의한 주변지하수의 오염 및 확산 정도를 추정하고 예측함에 있어 시간과 비용적인 측면에서 매우 유용한 사례가 될 것으로 판단된다.

## 2. 본 론

### 2.1. 기본 이론

단공주입양수 추적자시험은 Mercardo(1966)가 사암대수층에서 주입된 추적자용액의 확산 형태를 연구하기 위해서 처음으로 제시한 방법이다. 지하수 흐름조건은 방사상의 발산과 수렴이고, 자연적인 지하수 흐름 속도를 무시할 정도로 크다고 가정한다. 단공주입양수 추적자시험의 수행과정은 아래의 순서와 같다.

① 추적자용액 주입단계(tracer solution injection step) : 한 관정에 일정한 농도를 갖는 추적자용액을 일정한 속도로 우물체적(well volume)의 2~3배 정도의 양을 주입한다. 추적자용액의 주입율은 대수층의 수리전도도를 고려하여 결정한다.

② 일반수 주입단계(chaser injection step) : 추적자용액의 주입이 완료됨과 동시에 추적자 성분이 함유되지 않은 일반수를 우물체적만큼 추적자용액 주입속도와 동일하게 주입한다. 이 과정은 지하수공 내에 잔류되어 있는 추적자를 대수층으로 유입시키는 단계이다.

③ 양수단계(extraction step) : 체이서 주입이 완료됨과 동시에 주입율과 동일하게 양수하면서 추적자의 농도를 측정하는 단계이다.

단공주입양수 추적자시험의 결과 해석은 다음과 같다. 전체 대수층 두께에 대한 중분산지수( $\alpha_L$ )는 양수 단계에서의 농도변화 자료에서 얻은 전체 주입량에 대한 양수량의 상대적인 농도 그래프를 이용하여 아래의 식을 이용하여 산출한다(Pickens and Grisak, 1981).

$$\alpha_L = \frac{3U_I^{1/2}[\Delta(U_P/U_I)]^2}{32\pi^{3/2}(b\theta)^{1/2}} \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 전체 주입부피[ $m^3$ ],  $U_P$ 는 시간에 따른 양수부피[ $m^3$ ],  $b$ 는 대수층 두께[m],  $\theta$ 는 공극율,  $\Delta(U_P/U_I)$ 는  $0.5C_0$ 에서의 접선과  $C/C_0=0.0$ 과  $1.0$ 인 선과의 교차점 사이의 무차원 양수량 증가분이다.

### 2.2. 단공주입양수 추적자시험

울산 범우폐기물매립장 내에 설치되어 있는 BWM-1, 2 지하수공의 제원과 단공주입양수 추적자시험시의 시험조건이 표 1에 정리되어 있다. BWM-1, 2 시험공에서의 추적자시험시 주입농도와 양수시간을 제외하고는 모든 조건이 동일하다. 용액의 주입 구간은 스크린이 설치되어 있는 지표면하 20~24m 구간이며, 시추조사 자료에 의하면 파쇄암반층에 해당된다. 추적자용액의 주입이 완료됨과 동시에 추적자 성분이 함유되지 않은 물을 주입율과 동일하게 15분 정도 주입하였다. 양수율은 주입율과 동일하게 조절하였으며, 샘플시료는 180분 동안 연속적으로 양수하면서 1분 → 2분 → 4분 간격으로 채수하였다. 현장에서는 전기전도도의 측정 자료를 참고하여 시료채수 간격을 조절하였으며, 또한 시험중료 여부도 판단하였다. 단공주입양수 추적자시험의 과정은 추적자용액의 제조 → 추적자용액 주입 → 일반수 주입 → 양수 → 시료 샘플링 → 추적자농도 측정 순으로 실시되었다.

표 1. 지하수공의 제원과 단공주입양수 추적자시험 조건

지하수공 공변		BWM-1	BWM-2
시험공 제원	내경(m)	0.15	
	개발심도(m)	GL- 24.0	
	케이싱심도(m)	GL- 20.0	
추적자시험 조건	시험구간(m)	GL- 20.0~24.0	
	주입구간(m)	GL- 20.5~21.5	
	양수구간(m)	GL- 19.5~20.0	
	추적자	Bromide(Br <sup>-</sup> )	
	주입농도(mg/L)	6,000	7,000
	주입율(L/min)	5	
	추적자주입(min)	40	
	일반수주입(min)	18	
	양수율(L/min)	5	
	양수시간(min)	180	160

### 2.3. 단공주입양수 추적자시험의 결과해석

#### 가) BWM-1공에서의 시험결과 해석

BWM-1공에서 실시되어진 단공주입양수 추적자시험에 의한  $U_p/U_i$ 의 비율과 브롬이온의 농도값을 분석한 결과, 양수시작 8분 경과 후에 최고농도(5,610mg/L)에 도달하였으며, 8~19분 동안은 브롬이온의 농도값이 급격하게 감소하였고 약 160분 후부터는 브롬이온의 농도가 안정화되어 180분에 시험을 완료하였다. 본 현장시험에서 산출된  $U_p/U_i$  대  $C/C_0$  함수그래프의 지수함수방정식은  $Y = 1.06883911 \times e^{-0.5627150046X}$ 로 산정되었으며, 결정계수( $R^2$ )는 0.989341로 매우 높게 나타났다(그림 1(a)). 양수량/주입량 비에 대한 브롬이온의 상대농도함수그래프를 이용하여 구한 무차원 양수부피증가분( $\Delta(U_p/U_i)$ )은 3.55로 나타났다. 그리고, 주입량은 0.2 $m^3$ , 시험구간의 대수층 두께는 4m, 공극율은 0.01, 0.05, 0.1 및 0.5의 값을 적용하여 종분산지수를 추정하였다. 이상의 값들을 적용하여 구한 종분산지수는 각각 9.50, 4.25, 3.00, 1.34cm로 산정되었다. 공극율이 증가할수록 종분산지수는 낮게 나타났다. 시험구간의 시험시추자료((주)범우, 2005)에 의하면 본 시험대수층의 공극율은 대략 0.05~0.20의 범위에 해당할 것으로 판단된다. 이 범위에 해당하는 종분산지수는 2~4cm 정도의 낮은 값에 해당하므로, 대수층 내로 폐기물매립장에서의 오염물 유입 시 분산성은 낮을 것으로 판단된다. 또한, 시험시추조사((주) 범우, 2005)에 의하면 시험구간이 파쇄암반층에는 점토질물질이 충전되어 있어 투수성이 매우 낮아 침출수의 확산을 상당히 지연시킬 것으로 판단되어 진다.

#### 나) BWM-2공에서의 시험결과 해석

BWM-2공에서 실시되어진 단공주입양수 추적자시험에 의한  $U_p/U_i$ 의 비율과 브롬이온의 농도값을 분석한 결과, 양수시작 16분 경과 후에 최고농도(6,530mg/l)에 도달하였으며, 16~90분 동안은 브롬이온의 농도값이 급격하게 감소하였고, 약 100분 후부터는 브롬이온의 농도가 안정화되어 160분 후에 시험을 완료하였다. 본 현장시험에서 산출된  $U_p/U_i$  대  $C/C_0$  함수그래프의 지수함수방정식은  $Y = 1.333370357 \times e^{-0.9620837395X}$ 로 산정되었으며, 결정계수( $R^2$ )는 0.949206으로 매우 높게 나타났다(그림 1(b)). 양수량/주입량 비에 대한 브롬이온의 상대농도함수그래프를 이용하여 구한 무차원 양수부피증가분( $\Delta(U_p/U_i)$ )은 2.10이다. 그리고, 주입량은 0.2 $m^3$ , 시험구간의 대수층 두께는 4m, 공극율은 0.01, 0.05, 0.1 및 0.5의 값을 적용하여 종분산지수를 추정하였다. 이상의 값들을 적용하여 구한 종분산지수는 각각 3.32, 1.49, 1.05, 0.47cm로 산정되었다. 공극율이 증가할수록 종분산지수는 낮게 나타났다. 시험시추자료((주)범우, 2005)에 의하면 본 시험대수층의 공극율은 대략 0.05~0.20의 범위

에 해당하며, 이 범위에 해당하는 중분산지수는 1~2cm 정도의 낮은 값이다. 따라서, 폐기물매립장에서 대수층 내로의 침출수 유입 시 분산성은 낮을 것으로 판단된다. BWM-1 지하수공이 위치한 대수층에 비해 BWM-2 지하수공이 위치한 대수층에서의 침출수 확산의 지연정도가 2배 정도 높은 것으로 나타났다.

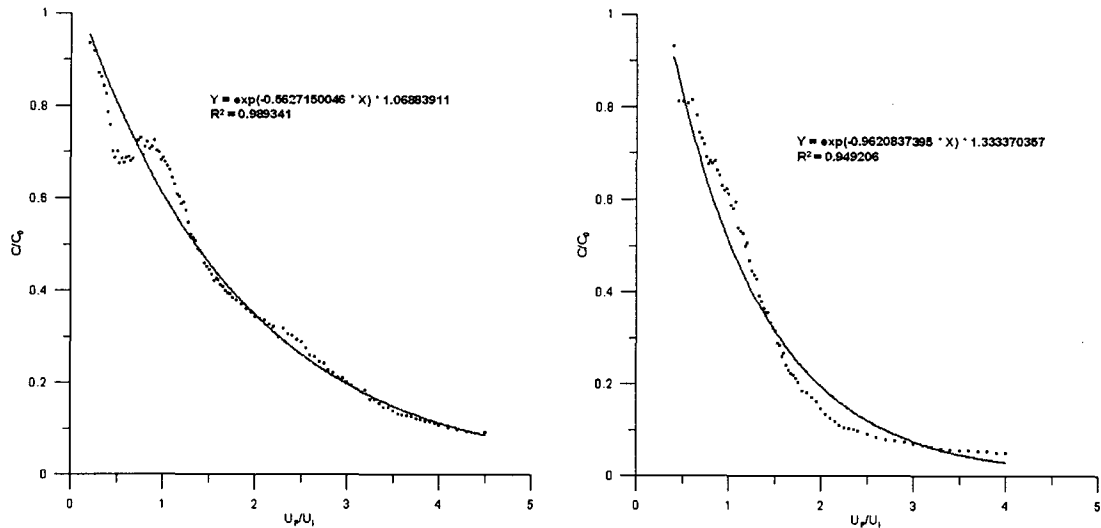


그림 1. 양수량/주입량 비에 대한 상대농도함수그래프(좌: BWM-1, 우: BWM-2).

### 3. 결론

1) BWM-1 지하수공에서 실시한 단공주입양수 추적자시험 결과, 양수량/주입량 비에 대한 브롬이온의 상대농도함수그래프를 이용하여 구한 무차원 양수부피증가분( $\Delta(U_p/U_i)$ )은 3.55로 나타났으며, 주입량 0.2 $m^3$ , 대수층 두께 4m, 공극율 0.01, 0.05, 0.1 및 0.5의 값을 적용하여 추정된 중분산지수는 각각 9.50, 4.25, 3.00, 1.34cm 이다. 시험대수층의 공극율은 대략 0.05~0.20의 범위에 해당하며, 이 범위에 해당하는 중분산지수는 2~4cm 정도의 낮은 값에 해당된다. 대수층 내로 폐기물매립장에서의 오염물 유입 시 분산성은 낮을 것으로 판단된다. 또한, 시험구간의 파쇄암반층에는 점토질물질이 충전되어 있어 투수성이 매우 낮아 침출수의 확산을 상당히 지연시킬 것으로 판단되어 진다.

2) BWM-2 지하수공에서 실시된 단공주입양수 추적자시험 결과, 양수량/주입량 비에 대한 브롬이온의 상대농도함수그래프를 이용하여 구한 무차원 양수부피증가분( $\Delta(U_p/U_i)$ )은 2.10으로 산정되었으며, 주입량 0.2 $m^3$ , 대수층 두께 4m, 공극율 0.01, 0.05, 0.1 및 0.5의 값을 적용하여 추정된 중분산지수는 각각 3.32, 1.49, 1.05, 0.47cm이다. 시험대수층의 공극율은 대략 0.05~0.20의 범위에 해당하며, 이 범위에 해당하는 중분산지수는 1~2cm 정도의 낮은 값이다. 따라서, 폐기물매립장에서 대수층 내로의 침출수 유입 시 분산성은 낮을 것으로 판단된다. BWM-1 지하수공이 위치한 대수층에 비해 BWM-2 지하수공이 위치한 대수층에서의 침출수 확산의 지연정도가 2배 정도 높은 것으로 나타났다.

### 4. 참고문헌

- 1) 농업기반공사, 육군 『구2정비창』 오염부지 정화사업 공법실증시험, 833p, 2002.
- 2) 심병완, 정상용, 지구물리 탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수침투 특성, 지하수토양환경학회지, 7(3), p.3-17, 2002.
- 3) 심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 수리동역학적 모델링에서 분산지수에 따른 해수침투 범위의 변화, 지하수토양환경학회, 7(4), p.59-67, 2002.

- 4) 심병완, 부산 동남해안 지역의 수리동역학적 해수침투 특성 연구, 박사학위논문, 123p, 부경대학교, 2003.
- 5) 이진용, 천정용, 이강근, 이민호, 윤정기, 다공질 천층 대수층에서의 추적자 이동 연구, 지질학회지, 37(2), p.309-316, 2001.
- 6) (주)범우, (주)범우 폐기물 매립장 침출수 누출실태 및 대책에 관한 연구 보고서, 202p, 2005.
- 7) Pickens, J. F. and Grisak, G. E., Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, Water Resources Research, 17(4), p.1191-1211, 1981.
- 8) Haggerty, R., Schroth, M. H., and Istok, J. D., Simplified Method of "Push-Pull" Test Data Analysis for Determining In Situ Reaction Rate Coefficients, Ground Water, 36(2), p.314-324, 1998.
- 9) Snodgrass, M. F., and Kitanidis P. K., A Method to Infer In Situ Reaction Rates from Push-Pull Experiments, Ground Water, 36(4), p.645-650, 1998.