

수평적으로 불균질한 단열암반층에서 단공주입양수 추적자시험에 의한 수리분산특성

강동환 · 정상용* · 김병우
부경대학교 환경지질과학과

The Characteristics of Hydrodynamic Dispersion in a Horizontally Heterogeneous Fractured Rock Through Single Well Injection Withdrawal Tracer Tests

Dong Hwan Kang · Sang Yong Chung* · Byung Woo Kim
Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

ABSTRACT

Single well injection withdrawal tracer tests with bromide were carried out at two wells developed in a horizontally heterogeneous fractured rock. The hydraulic conductivity of TW-1 well was 5 times larger than TW-2 well, and the average linear velocity of TW-2 well was 1.8 times faster than TW-1 well. The difference of hydrodynamic dispersions of two wells in the fractured rock was studied with the analysis of concentration breakthrough curves and cumulative mass recovery curves of bromide with withdrawal time, and the estimation of average travel distance, pore velocity, longitudinal dispersivity and longitudinal dispersion coefficient. The average travel distances of bromide were estimated to be 3.00 m in TW-1 well and 5.62 m in TW-2 well. The average pore velocities for the injection/withdrawal phase were estimated to be 4.31×10^{-4} m/sec in TW-1 well and 8.08×10^{-4} m/sec in TW-2 well. Average travel distance and pore velocity were higher in TW-2 well because of small effective porosity. Longitudinal dispersivities were estimated to be 28.73 cm in TW-1 well and 18.49 cm in TW-2 well, and bromide transport was 1.55 times faster in TW-1 well. Longitudinal dispersion coefficients were estimated to be 5.14×10^{-6} m²/sec in TW-1 well and 6.06×10^{-6} m²/sec in TW-2 well, and diffusion area was 1.18 times larger in TW-2 well.

Key words : Fractured rock, Single well injection withdrawal tracer test, Average travel distance, Pore velocity, Longitudinal dispersivity, Longitudinal dispersion coefficient

요 약 문

본 연구에서는 단열암반층에 굴착된 2개의 지하수공(TW-1, TW-2)에서 브롬이온을 이용한 단공주입양수 추적자시험 (Single Well Injection Withdrawal tracer test, SWIW tracer test)이 수행되었다. 이 두 지하수공에서는 대수층의 수리전도도와 지하수의 평균선형유속이 다른데, TW-1공에서 수리전도도가 5배 정도 크고, TW-2공에서는 평균선형 유속이 1.8배 정도 빠르다. 추적자시험으로부터 시간에 따른 브롬이온의 농도이력곡선과 누적질량회수곡선이 작성되어 분석되었으며, 또한 평균이송거리, 공극유속, 종분산지수와 종분산계수를 산정하여 단열암반층의 수평적인 불균질 성에 따른 수리분산 차이가 해석되었다. 브롬이온의 평균이송거리는 TW-1공에서 3.00 m, TW-2공에서 5.62 m이며, 주입/양수 단계에서 평균적인 공극유속은 TW-1공에서 4.31×10^{-4} m/sec, TW-2공에서 8.08×10^{-4} m/sec로 산정되었다. TW-2공에서 단열암반층의 유효공극율이 작아서 평균이송거리와 공극유속이 크게 나타났다. 단공주입양수 추적자시험에 의해 산정된 종분산지수는 TW-1공에서 28.73 cm, TW-2공에서는 18.49 cm로서, TW-1공에서 용질이송이

*Corresponding author : chungsy@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2006. 8. 3 게재승인일 : 2006. 11. 21
질의 및 토의 : 2007. 2. 28 까지

1.55배 정도 빠른 것으로 나타났다. 평균선형유속을 이용하여 구한 종분산계수는 TW-1공에서 $5.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, TW-2공에서 $6.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로서, TW-2공에서 브롬이온의 확산면적이 1.18배 정도 넓은 것으로 나타났다.

주제어 : 단열암반층, 단공주입양수 추적자시험, 평균이송거리, 공극유속, 종분산지수, 종분산계수

1. 서 론

고도의 산업발달 이면에는 인간의 활동에 수반된 다량의 폐기물들에 의한 인위적인 오염물이 증가하였으며, 이러한 오염물의 지하유출로 인한 토양층 및 암반층 내 지하수의 오염이 심각한 상태이다. 주 오염원들은 공단지역, 폐기물매립장, 주유소, 군부대 및 폐광산 부지 등이며, 이러한 부지 주변에서 토양 및 지하수의 오염은 사회적 문제로 심각하게 대두되고 있다.

현재 국내에서는 군부대에서의 유류오염토양정화사업(농업기반공사, 2002), 폐광산 주변의 토양/지하수 정화공법 실증시험(농업기반공사, 2004), 폐기물매립장에서의 침출수 유출경로규명((사)한국지하수토양환경학회, 2003) 및 폐기물매립장 침출수 누출실태 및 대책((주)범우, 2005) 등의 사업이 수행된 바 있다.

토양층 및 암반층에서 지하수의 오염복원을 위해서는 오염물질의 이송과 확산에 대한 정량적인 연구가 요구되어 지며, 이를 위해서는 추적자시험에 의한 분산지수의 산정이 필요하다(한정상, 1998; Bear et al., 1993; Charbeneau, 2000; Sahimi, 1995).

단공주입양수 추적자시험에 의해 추정된 종분산지수는 적용규모가 제한적인 단점이 있으나, 시험 비용이 적고, 소요시간이 짧아서 경제적이고, 또한 추적자가 회수될 수 있어서 국·내외에서 널리 수행되고 있다. 단공주입양수 추적자시험은 단열암반층의 종분산지수 추정(Mercado, 1966; Pickens and Grisak, 1981), 대수층 내에서의 오염물 흡착능과 화학적인 반응을 규명(Haggerty et al., 1998, Snodgrass and Kitanidis, 1998)에 이용되었으며, 또한 핵폐기물저장소에서 방사핵종의 유출을 가정한 단열암반층에서의 방사핵종 확산특성을 연구하는데 이용되었다(Haggerty et al., 2001; Meigs and Beauheim, 2001).

1990년대 중반 이전에는 단공주입양수 추적자시험 자료를 이용한 단열암반층 내 종분산지수의 산정과 수리분산 연구에 이중공극모델(dual porosity model)이 적용되었으나(Neretnieks, 1980, 1993), 1990년대 중반 이후의 연구에서는 다비율확산모델(multirate diffusion model)이 더욱 적합한 것으로 제시되고 있다(Haggerty and Gorelick, 1995, 1998).

본 연구에서는 울산시에 위치하는 지정폐기물 매립장지

역의 호온펠스 단열암반층(두께 4 m)에서 수행된 단공주입양수 추적자시험에 의해 시간에 따른 브롬이온의 농도 이력곡선이 산출되었다. 이러한 농도이력 자료를 Haggerty and Gorelick(1998), Haggerty et al.(2001) 및 Pickens and Grisak(1981)의 연구에 적용하여 브롬이온의 평균이송거리, 공극유속, 종분산지수 및 종분산계수를 산정하였다. 2개 지점에서 산정된 수리분산 상수를 비교·분석하여 단열암반층의 수평적인 불균질성에 따른 수리분산 차이를 정량적으로 규명하고자 하였다.

2. 연구지역의 수리지질

연구지역의 지질은 호온펠스와 대정리화강암으로 구성되어 있다. 연구지역을 포함한 광역지질은 백악기 경상누층군의 울산층에 해당되는 적색·회색 셰일, 사암 및 응회질사암이 분포하고 있으며, 광범위한 화성활동으로 인하여 접촉변성작용을 받은 호온펠스가 주변에 폭넓게 분포하고 있다. 백악기 경상누층군에 속하는 대정리각섬석화강섬록암이 울산층을 관입하여 호온펠스화 되었으며, 상위에 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다(대한지질학회, 1999; 박양대와 윤행대, 1968). 단공주입양수 추적자시험이 수행된 시험공의 단열암반층은 대정리각섬석화강섬록암의 접촉변성작용을 받아 형성된 호온펠스로 구성되어 있다((주)범우, 2005).

본 연구가 수행된 매립지역은 지정폐기물 매립장으로서 울산광역시의 외항강 남서쪽 위치하고 있다. 매립장의 규모와 용적은 $85 \text{ m} \times 125 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 와 $113,005 \text{ m}^3$ 이며, 관리형 매립시설로서 매일, 중간, 최종 복토가 수행되고 있다. 폐기물 매립장은 지정폐기물 차수시설 설치기준에 의거하여 설계되었으며, 매립장 차수구조는 상부로부터 보호층(배수층), 차수재, 점토차수층으로 구성되어 있다.

본 매립장에서의 단공주입양수 추적자시험은 매립장 침출수의 유출로 인해 오염이 진행되고 있는 남쪽 방향의 TW-1공과 매립장 입구부에 위치한 서쪽 방향의 TW-2공에서 수행되었다(Fig. 1). 추적자시험공의 제원은 Table 1에 정리되어 있다. 매립장의 저면은 지표면하 20 m 정도이고, 시험공의 단열암반층은 지표면하 24 m 정도까지는 파쇄대가 발달된 호온펠스로 구성되어 있다. 따라서, 매립장에서 단열암반층으로 침출수의 유출 시 지표면하 20~24 m 구

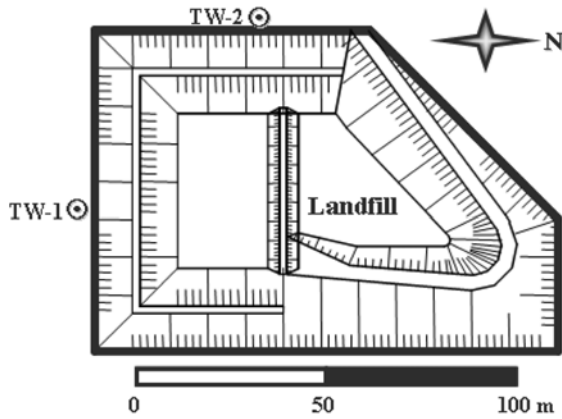


Fig. 1. Location of tracer test wells at the study area.

Table 1. Design of tracer test wells (unit: meter)

Design	Well No.	TW-1	TW-2
Elevation		37.6	37.6
Well diameter		0.15	0.15
Well depth(GL-)		24	24
Casing depth(GL-)		20	20
Screen(GL-)		20 ~ 24	20 ~ 24

GL-: below the ground surface.

간에서 오염물의 확산이 우세하게 발생할 것으로 판단되었다. 이러한 조건을 근거하여 지표면하 20 ~ 24 m 구간의 단열암반층에서 단공주입양수 추적자시험이 수행되었다.

추적자시험공에서 지하수 유향/유속 측정기(Geoflow model 200)에 의한 지하수 흐름방향과 평균선형유속이 측정되었다. 매립장의 전체적인 지하수 흐름방향은 북에서 남쪽 방향으로 형성되어 있으며, 지하수 흐름방향으로의 평균선형유속(average linear velocity)은 TW-1공에서 1.79×10^{-5} m/sec, TW-2공에서 3.28×10^{-5} m/sec로서 TW-2공에서 1.8배 정도 빠른 것으로 나타났다. 현장투수시험에 의해 산정된 수리전도도는 TW-1공에서 1.67×10^{-6} m/sec, TW-2공에서 3.29×10^{-7} m/sec로서 TW-1공의 투수성이 5배 정도 높은 것으로 나타났다(주범우, 2005).

3. 단공주입양수 추적자시험

3.1. 기본 이론

단공주입양수 추적자시험이 수행되는 대수층 내에서의 수리지질학적인 기본 가정은 다음과 같다(Haggerty et al., 2001).

- ① 광역적인 수리경사는 무시한다.

- ② 대수층은 두께가 일정한 피압대수층이며, 등방·균질한 수평층이다. 또한, 지하수의 흐름은 방사상흐름이며, 시험공을 중심으로 대칭적인 흐름을 형성한다.

단공주입양수 추적자시험의 기본 가정 및 해석은 피압대수층(confined aquifer)에 적용되지만, 자유면 대수층(unconfined aquifer)에도 적합한 것으로 보고되었다(Harvey et al., 1994).

단공주입양수 추적자시험 시 주입/양수 단계를 수행하는 동안 방사상 발산/수렴 흐름(radially divergent/convergent flow)의 영향범위 내에서 지하수의 평균선형유속은 공극유속(pore velocity)으로 정의되며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Haggerty et al., 2001).

$$v = \frac{Q_{inj}}{2\pi r b \theta} \tag{1}$$

여기서 Q_{inj} 는 주입율 [$L^3 T^{-1}$], r 은 방사상거리(시험공으로부터 멀어지는 방향이 (+)) [L], θ 는 유효공극율[무차원], b 는 대수층 두께 [L]이다.

Hoopes and Harleman(1967)은 우물로부터 평면의 방사상흐름이 형성된 흐름조건에서 부정류(transient) 상태의 농도분포를 묘사하는 일반적인 방정식 (2)를 제시하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial r} = \alpha_L v \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{D^*}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \tag{2}$$

여기서 C 는 농도 [ML^{-3}], t 는 시간 [T], v 는 평균공극유속 [LT^{-1}], α_L 는 종분산지수 [L], r 은 방사상거리 [L], D^* 는 분자확산계수(molecular diffusion coefficient) [$L^2 T^{-1}$]이다.

시험대수층 두께에 해당하는 종분산지수(α_L)는 단공주입양수 추적자시험 중 양수단계에서의 시간에 따른 농도 변화자료를 이용한 U_p/U_I 대 C/C_0 의 그래프에서 식 (3)을 이용하여 추정할 수 있다(Mercado, 1966; Pickens and Grisak, 1981).

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

여기서 U_I 는 전체 주입부피 [L^3], U_p 는 시간에 따른 양수부피 [L^3], b 는 대수층 두께 [L], θ 는 유효공극율, $\Delta(U_p/U_I)$ 는 $0.5C_0$ 에서의 접선과 $C/C_0 = 0.0, 1.0$ 인 지점이 교차할 때의 U_p/U_I 값들의 차이로서 무차원양수부피증가분(dimensionless withdrawal volume increment)으로 정의된다. Gelhar and Collins(1971)는 단공주입양수 추적자시험 시 양수하는 동안 양수정에서의 상대농도(C/C_0)에 대한 해를 구하였다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\frac{U_P}{U_I} - 1}{\frac{16\alpha_L}{3R} \left(2 - \left| 1 - \frac{U_P}{U_I} \right|^{1/2} \left(1 - \frac{U_P}{U_I} \right) \right)^{1/2}} \right] \quad (4)$$

여기서 R 은 주입완료 시점에서 추적자의 평균이송거리 (average travel distance) $[L]$ 이며, 식 (5)와 같이 정의되어진다(Pickens and Grisak, 1981).

$$R = \left(\frac{Qt}{\pi b \theta} \right)^{1/2} \quad (5)$$

3.2. 추적자시험 내용 및 조건

본 연구에서의 단공주입양수 추적자시험은 추적자용액의 주입단계(tracer solution injection step), 현장수 주입 단계(chaser injection step) 및 양수단계(withdrawal step)의 순으로 수행된다. 먼저, 추적자용액 주입단계에서는 시험공에 일정한 농도의 브롬이온용액이 일정한 속도로 우물체적(well volume)의 2~3배 정도 주입되었다. 두 번째, 현장수 주입단계에서는 브롬이온용액의 주입이 완료됨과 동시에 브롬이온이 함유되지 않은 현장수를 우물체적만큼 주입속도와 동일하게 주입한다. 이러한 과정은 시험공 내에 잔류되어 있는 브롬이온을 대수층으로 확산시키기 위한 것이다. 마지막으로, 양수단계에서는 현장수 주입이 완료됨과 동시에 주입속도와 동일하게 양수하면서 경과시간에 따른 브롬이온농도를 관측한다.

TW-1과 TW-2공에서 수행된 단공주입양수 추적자시험의 조건은 Table 2에 정리되어 있다. TW-1과 TW-2공에서의 추적자시험 시 주입농도와 양수시간을 제외하고는 모든 조건이 동일하다. 단공주입양수 추적자시험의 완료

시까지의 양수량은 브롬이온용액과 현장수 주입량의 2.7~3.0배 정도이었다. 양수단계에서 브롬이온농도는 pH/ISE meter(Istek, 750P)에 의해 측정되었으며, 브롬이온농도의 감소율이 낮아질수록 관측간격은 1분 → 2분 → 4분으로 증가되었다.

3.3. 브롬이온의 농도이력 및 누적질량회수

TW-1과 TW-2공에서 수행된 단공주입양수 추적자시험 시 양수단계에서 회수된 브롬이온의 시간에 따른 상대농도이력곡선이 Fig. 2에 작성되어 있다. 브롬이온의 최고농도는 TW-1공에서 양수시작 후 8분(Fig. 2(a)에서는 68분), TW-2공에서는 16분(Fig. 2(b)에서는 76분)이 경과한 시점에서 나타났다. 최고농도 도달시점 이후, 브롬이온의 농도는 TW-1공에서는 약 130분 동안(Fig. 2(a)에서의 시간은 66~196분) 급격하게 감소하다가 이후에는 완만하게 감소하였다. TW-2공에서는 약 82분 동안(Fig. 2(b)에서의 시간은 74~156분) 급격하게 감소하였으며, 이후에는 완만

Table 2. Conditions applied to SWIW tracer tests

Test wells	TW-1	TW-2
Injection interval(GL-, m)	20.0~24.0	
Pumping interval(GL-, m)	20.0~21.0	
Tracer and Injection mass(kg)	Bromide(Br ⁻), 2.014	
Injection concentration(mg/L)	6,000	7,000
Injection rate(L/min)	5	
Tracer injection time(min)	40	
Chaser injection time(min)	18	
Pumping rate(L/min)	5	
Pumping period(min)	180	160

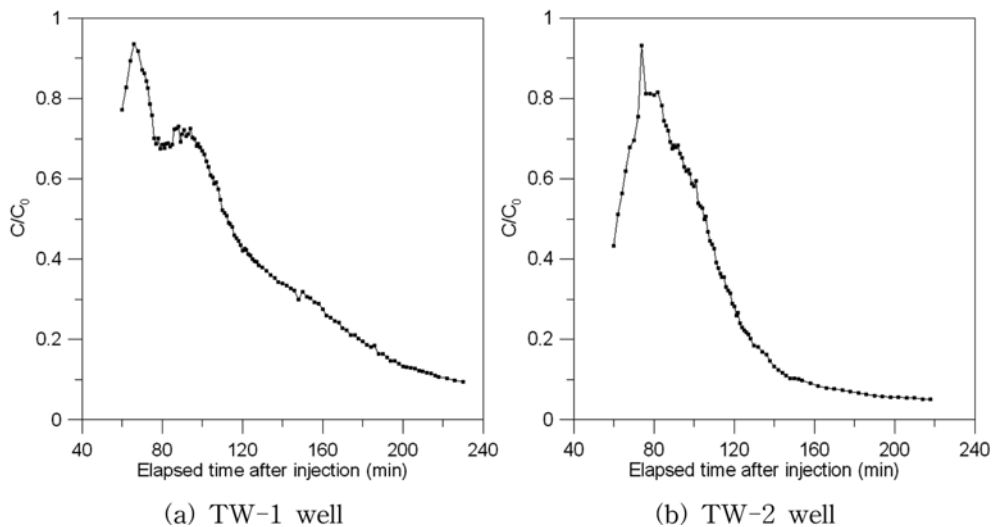


Fig. 2. Bromide recovery curves for withdrawal phase.

하게 감소하다가 거의 수렴하는 변화양상을 나타내었다.

브롬이온의 회수농도가 급격하게 감소하는 구간의 기울기는 TW-2공이 TW-1공에 비해 높게 나타났다. 브롬이온의 농도감소 기울기는 주입단계에서 시험공 주변의 대수층으로 확산되었던 브롬이온의 회수정도를 의미하는 것이며, TW-2공의 단열암반층에서 공극유속이 커서 농도감소 기울기가 높게 나타났다.

TW-1공의 농도이력곡선에서 양수 후 15분까지는 농도가 감소하다가, 양수 후 35분까지 약 20분 동안 브롬이온의 농도가 약간 증가하였다. 이는 시험공 주변대수층에서 시험공으로의 수리단열(hydraulic fracture)을 통한 지하수 유입 시 형성되는 흐름형태가 방사상흐름에서 선형흐름으로 변화되었기 때문이다(Goltz and Roberts, 1987; Rao et al., 1982). 이러한 흐름형태의 변화는 추적자시험 시 양수단계에서 지하수위 강하로 인해 지하수가 유출되는 층이 토양·풍화토층에서 단열암반층으로 변화하는데서 기인된 것이다. TW-2공에서도 유사한 흐름양상이 발생하였으나, TW-1공에 비해서는 미미하였다.

농도이력곡선에서 꼬리(tailing)는 이류(advection)에 의한 확산정도의 다양성, 또는 암반 내 기질확산(matrix diffusion)에 의한 것이다(Haggerty et al., 2001). 양수단계에서 회수된 브롬이온의 농도이력곡선에서 꼬리는 TW-2공이 TW-1공에 비해 길게 나타났다. 이는 TW-2공 주변의 단열암반층 내에 투수성이 낮은 이류공극(advection pore)을 통한 브롬이온의 이송이 많았기 때문인 것으로 판단된다.

TW-1과 TW-2공에서 수행된 단공주입양수 추적자시험 시 양수단계에서 브롬이온의 누적질량회수곡선(cumulative

mass recovered curve)이 Fig. 3에 작성되어 있다. x-축은 추적자용액의 주입시작 이후의 경과시간이며, y-축은 주입된 브롬이온의 질량에 대한 양수에 의해 회수된 브롬이온의 질량비이다. 브롬이온의 누적질량이 0.6 일 때까지의 경과시간은 TW-1공에서 양수 후 57분(Fig. 3(a)에서는 115분), TW-2공에서는 53분(Fig. 3(a)에서는 111분)으로 TW-2공에서의 회수속도가 빠른 것으로 나타났다. 그러나, TW-1공 단열암반층에서 브롬이온의 회수율은 양수시작 후 약 160분(Fig. 3(a)에서 218분)이 경과한 시점에서 99% 정도이나, TW-2공 단열암반층에서의 브롬이온 회수율은 81% 정도로 낮게 나타났다. TW-2공에서 전체 회수율이 낮은 것은 주입된 브롬이온이 빠른 공극유속에 의해 주변 대수층으로 먼 거리까지 확산되어, 양수 시 영향반경을 초과하여 확산된 브롬이온들이 회수되지 않았기 때문이다.

3.4. 수리분산 상수

단공주입양수 추적자시험이 수행되는 동안 주입단계의 완료시점에서 추적자가 시험공 주변대수층으로 확산되어진 평균이송거리는 식 (5)에 의해 산정되었고, 산정된 평균이송거리를 이용하여 단공주입양수 추적자시험이 수행되는 동안 시험공 주변대수층에서의 공극유속이 식 (1)에 의해 산정되었다.

단공주입양수 추적자시험의 양수단계에서 시간에 대한 브롬이온농도를 이용하여, 시험공 주변대수층의 종분산계수가 식 (3)에 의해 산정되었고, 단공주입양수 추적자시험 기간 동안 단열암반층 내 기질부(matrix zone)에서의 분자 확산(molecular diffusion)을 고려하지 않은 종분산계수(longitudinal dispersion coefficient)가 산정되었다.

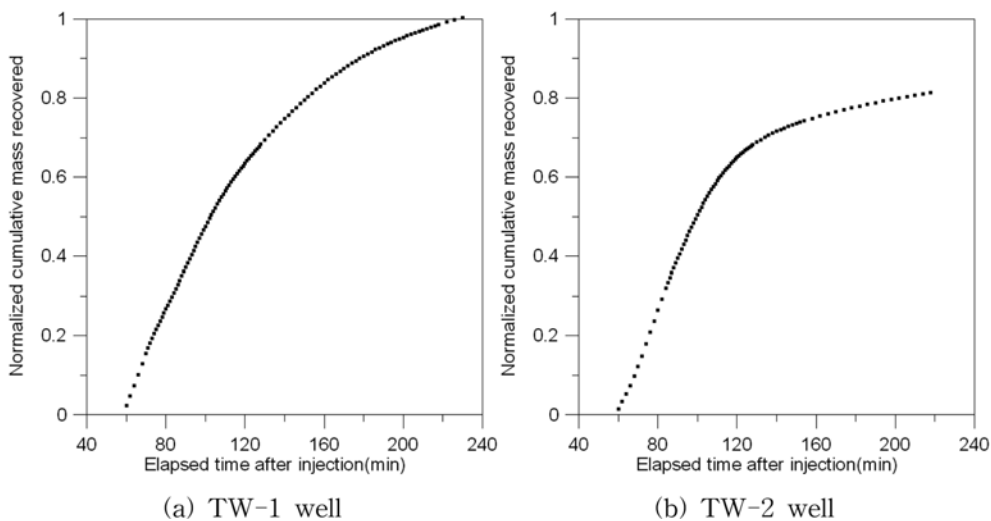


Fig. 3. Normalized cumulative mass recovered from the SWIW tracer tests.

Table 3. Average travel distance and pore velocity of the bromide for SWIW tracer tests

Well	Effective porosity (%)	Aquifer thickness (m)	Injection rate (m ³ /day)	Injection time (day)	Average travel distance(m)	Pore velocity (m/sec)
TW-1	0.256	4	7.2	0.04	3.00	4.31×10^{-4}
TW-2	0.073				5.62	8.08×10^{-4}

3.4.1. 평균이송거리와 공극유속

Table 3에는 TW-1과 TW-2공 단열암반층의 유효공극율과 단공주입양수 추적자시험 시 브롬이온의 평균이송거리 및 공극유속이 산출되어 있다. TW-1과 TW-2공 단열암반층에서 유효공극율(θ)은 다르시유속(Darcy velocity, v)과 평균선형유속(v_a)에 의해 산정되었다.

$$\theta = \frac{v}{v_a} \tag{6}$$

다르시유속은 지하수위 관측 자료에 의한 수리경사와 현장투수시험 자료에 의한 수리전도도를 이용하여 산정되었고, 평균선형유속은 지하수 유량·유속 측정기(Geoflow, Model-200)에 의해 측정되었다. 단공주입양수 추적자시험이 수행된 TW-1공 단열암반층에서의 유효공극율은 0.256%이며, TW-2공 단열암반층에서의 유효공극율은 0.073%이다. 산정된 유효공극율은 단열암반층에서의 일반적인 유효공극율 범위(Domenico and Schwartz, 1998)에 해당되었다.

TW-1과 TW-2공에서 수행된 단공주입양수 추적자시험 시 주입단계의 완료시점에서 브롬이온의 평균이송거리 산정에 필요한 매개변수들은 공극율을 제외하고는 모두 동

일하게 적용되었다. 평균이송거리는 TW-1공에서 3.00 m, TW-2공에서 5.62 m로 산정되었다. TW-2공 단열암반층에서 유효공극율이 상대적으로 낮았으며, 이로 인해 브롬이온이 1.87배 정도 멀리 이송되었다.

단공주입양수 추적자시험 시 주입/양수 단계에서의 공극유속은 TW-1공에서 4.31×10^{-4} m/sec, TW-2공에서 8.08×10^{-4} m/sec로 산정되었다. 동일한 주입율로 추적자를 대수층으로 주입하면, 대수층 내에서 형성되는 공극유속이 빠를수록 추적자의 이송거리가 멀어지게 된다. 즉, 다른 조건이 동일하다면 대수층 내에서 추적자의 평균이송거리가 더욱 크다는 것은 대수층 내 공극유속이 빠르다는 것을 의미하는 것이다. TW-1과 TW-2공에서 단공주입양수 추적자시험 시 주입단계에서 TW-2공에서 브롬이온의 평균이송거리가 상대적으로 더욱 먼 것으로 나타났다. 이는 단공주입양수 추적자시험 기간 동안 TW-2공에서의 공극유속이 TW-1공에 비해 1.87배 정도 빠르게 형성되었기 때문이다.

TW-1과 TW-2공 내 시험대수층 구간에서 자연 상태의 지하수유속은 각각 1.79×10^{-5} m/sec와 3.28×10^{-5} m/sec이다. 따라서, 단공주입양수 추적자시험 기간 동안 시험공 주변의 단열암반층에서 지하수유속은 자연 상태에 비해 약 24배 정도 빠르게 나타났다.

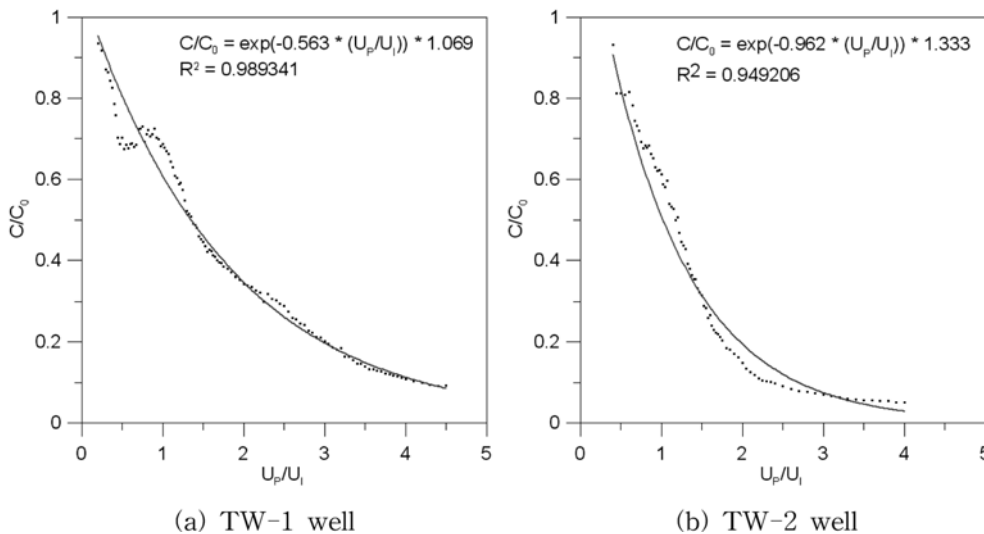


Fig. 4. Relative concentration history with U_p/U_1 during the withdrawal phase and calculated dimensionless withdrawal volume increment.

Table 4. Longitudinal dispersivity and longitudinal dispersion coefficient obtained from SWIW tracer tests

Well	Injection volume (m ³)	Dimensionless withdrawal-volume increment	Longitudinal dispersivity(m)	Average linear velocity(m/sec)	Longitudinal dispersion coefficient(m ² /sec)
TW-1	0.29	2.44	0.2873	1.79×10^{-5}	5.14×10^{-6}
TW-2		1.43	0.1849	3.28×10^{-5}	6.06×10^{-6}

3.4.2. 종분산지수와 종분산계수

단공주입양수 추적자시험 시 주입부피에 대한 양수량의 비(U_p/U_I) 대 상대농도(C/C_0)의 그래프와 함수방정식이 Fig. 4에 작성되어 있다. 추적자시험 자료와 지수함수의 결정계수는 TW-1공에서 0.99, TW-2공에서 0.95로서 모두 높게 나타났다.

Table 4에는 TW-1과 TW-2공에서 산정된 무차원양수부피증가분, 종분산지수 및 종분산계수가 정리되어 있다. Mercado(1966)가 제시한 방법으로 U_p/U_I 대 C/C_0 의 그래프를 이용하여 구한 무차원양수부피증가분($\Delta(U_p/U_I)$)은 TW-1공에서 2.44, TW-2공에서 1.43으로 산정되었다. TW-1공이 TW-2공에 비해 무차원양수부피증가분이 1.71배 높았으며, 이러한 결과는 주입단계에서 시험공 주변대수층으로 브롬이온의 확산은 빠르고, 양수단계에서 시험공으로의 회수율이 낮은 것에 기인된다.

무차원양수부피증가분, 대수층 두께 및 유효공극율을 Mercado(1966)가 제시한 방정식에 대입하여 구한 종분산지수는 TW-1공에서 28.73 cm이며, TW-2공에서는 18.49 cm이다. TW-1과 TW-2공에서의 평균선형유속과 종분산지수를 이용하여 종분산계수가 산정되었다. TW-1과 TW-2공에서 단공주입양수 추적자시험에 의해 산정된 종분산계수는 TW-1공에서 5.14×10^{-6} m²/sec, TW-2공에서는 6.06×10^{-6} m²/sec로서 TW-2공이 약간 높게 나타났다. 종분산지수는 TW-1공에서 높았으나, 종분산계수는 TW-2공에서 높게 나타났다. 이는 시험공 주변 단열암반층의 평균선형유속이 TW-2공에서 약 1.8배 정도 높았기 때문이다.

4. 결 론

평균선형유속과 수리전도도가 다른 2개의 지하수공(수리전도도는 TW-1공에서 5배 정도 크고 평균선형유속은 TW-2공에서 1.8배 정도 빠름)에서 단공주입양수 추적자시험이 수행되었으며, 다음의 결과들이 도출되었다. 본 연구의 결과는 폐기물 매립장에서 침출수의 유출 시, 단열암반층에서 수리단열 특성에 따른 오염물질 확산의 차이를 규명하는데 유용한 사례가 될 것이다.

1. 단공주입양수 추적자시험 시 브롬이온의 농도감소 기울기는 TW-2공이 TW-1공에 비해 높게 나타났다. 이는

TW-2공 단열암반층의 유효공극율이 작아서 공극유속이 빠르게 형성되었기 때문이다. 양수단계 초기에는 지하수 위 강하로 인해 지하수가 유출되는 층이 토양·풍화토층에서 단열암반층으로 변화하여, TW-1공에서 지하수의 흐름이 방상상에서 선형으로 크게 변화하였다. 양수단계 말기에는 TW-2공에서 투수성이 낮은 이류공극(단열공극)을 통한 용질이송으로 인해 농도이력곡선의 꼬리가 길게 나타났다. 양수단계에서 브롬이온의 누적질량회수는 TW-1공에서 99%, TW-2공에서는 81% 정도였다. TW-2공에서 회수율이 낮은 것은 주입단계에서 상대적으로 빠른 공극유속에 의해 브롬이온이 주변대수층의 먼 거리까지 확산되었기 때문이다.

2. 단공주입양수 추적자시험 시 주입단계의 완료시점에서 TW-1과 TW-2공에서 브롬이온의 평균이송거리가 TW-1공에서 3.00 m, TW-2공에서 5.62 m로 산정되었다. 주입양수 단계에서의 공극유속은 TW-1공에서 4.31×10^{-4} m/sec, TW-2공에서 8.08×10^{-4} m/sec로 산정되었다. TW-2공에서 브롬이온의 평균이송거리가 상대적으로 더욱 먼 것으로 나타났으며, 이는 추적자시험 기간 동안 TW-2공에서의 공극유속이 TW-1공에 비해 1.87배 정도 빠르게 형성되었기 때문이다.

3. 폐기물 매립장 부지의 2개 시험공에서 수행된 단공주입양수 추적자시험에 의해 산정된 종분산지수는 TW-1공에서 28.73 cm, TW-2공에서는 18.49 cm이며, TW-1공에서 약 1.55배 정도 높은 것으로 나타났다. 평균선형유속과 종분산지수를 이용하여 산정된 종분산계수는 TW-1과 TW-2공에서 각각 5.14×10^{-6} m²/sec와 6.06×10^{-6} m²/sec 정도로서, 오염물질의 유입 시 TW-2공에서 약 1.18배 정도 넓은 면적으로 확산된 것으로 판단된다. 종분산지수로 표현되는 대수층매질 고유의 수리분산은 TW-1공이 약간 높았으나, 종분산계수로 나타나는 지하수유동에 의한 수리분산은 TW-2공에서 높은 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 부경대학교 BK21 지구환경시스템 사업단에 의하여 연구비가 지원되었으며, 지원기관에 감사한다.

참 고 문 헌

- 농업기반공사, 2002, 육군 『구2정비창』 오염부지 정화사업 공법실증시험, p. 833.
- 농업기반공사, 2004, 울산광역시 북구 달천동 아파트신축부지 토양오염정밀조사 공법실증시험, p. 322.
- 대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스, p. 802.
- 박양대, 윤형대, 1968, 방어진도폭, 국립지질조사소, p. 14.
- (사)한국지하수토양환경학회, 2003, 유산폐기물매립장 침출수 누출원인조사 연구용역보고서, p. 217.
- (주)범우, 2005, (주)범우 폐기물 매립장 침출수 누출실태 및 대책에 관한 연구 보고서, p. 202.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, p. 1071.
- Bear, J., Tsang, C.F., and de Marsily, G., 1993, Flow and contaminant transport in fractured rock, Academic Press Inc., p. 560.
- Charbeneau, R.J., 2000, Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport, Prentice-Hall, Inc., p. 593.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1998, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, Inc., p. 506.
- Gelhar, L.W. and Collins, M.A., 1971, General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, *Water Resources Research*, **7**(6), 1511-1521.
- Goltz, M.N. and Roberts, P.V., 1987, Using the method of moments to analyze three-dimensional diffusion-limited solute transport from temporal and spatial perspectives, *Water Resources Research*, **23**(8), 1575-1585.
- 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 Resources Research*, **37**(5), 1129-1142.
- Haggerty, R. and Gorelick, S.M., 1995, Multiple-rate mass transfer for modeling diffusion and surface reactions in media with pore-scale heterogeneity, *Water Resources Research*, **31**(10), 2383-2400.
- 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., Schroth, M.H., and Istok, J.D., 1998, Simplified Method of "Push-Pull" Test Data Analysis for Determining In Situ Reaction Rate Coefficients, *Ground Water*, **36**(2), 314-324.
- Harvey, J.W., Haggerty, R., and Gorelick, S.M., 1994, Aquifer remediation: A method for estimating mass transfer rate coefficients and an evaluation of pulsed pumping, *Water Resources Research*, **30**(7), 1979-1991.
- Hoopes, J.A. and Harleman, D.R.F., 1967, Dispersion in radial flow from a recharge well, *J. Geophys. Res.*, **72**(14), 3595-3607.
- Meigs, L.C. and Beauheim, R.L., 2001, Tracer tests in a fractured dolomite, 1. Experimental design and observed tracer recoveries, *Water Resources Research*, **37**(5), 1113-1128.
- Mercado, A., 1966, Recharge and mixing tests at Yavne 20 well field, Unground Water Storage Study Tech. Rep. 12, Publ. 611, 62 pp., TAHAL-Water Planning for Israel Ltd., Tel Aviv.
- Neretnieks, I., 1980, Diffusion in the rock matrix: An important factor in radionuclide transport?, *J. Geophys. Res.*, **85**(B8), 4379-4397.
- Neretnieks, I., 1993, Solute transport in fractured rock-Applications to radionuclide waste repositories, in Flow and contaminant Transport in Fractured rock, edited by J. Bear, C.-F. Tsang, and G. de Marsily, p.39-127, Academic, San Diego, Calif.
- Pickens, J.F. and Grisak, G.E., 1981, Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, *Water Resources Research*, **17**(4), 1191-1211.
- Rao, P.S.C., Jessup, R.E., and Addiscott, T.M., 1982, Experimental and theoretical aspects of solute diffusion in spherical and nonspherical aggregates, *Soil Sci.*, **133**(6), 342-349.
- Sahimi, M., 1995, Flow and transport in porous media and fractured rock, VCH, p. 482.
- Snodgrass, M.F. and Kitanidis P.K., 1998, A Method to Infer In Situ Reaction Rates from Push-Pull Experiments, *Ground Water*, **36**(4), 645-650.