

부산시 좌천동 단열암반층에서 자연구배 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구

정상용 · 강동환* · 김병우
부경대학교 환경지질학과

Characteristics of Hydrodynamic Dispersion Using a Natural Gradient Tracer Test in a Fractured Rock at the Jwacheon-dong, Busan City

Sang-Yong Chung, Dong-Hwan Kang*, and Byung-Woo Kim

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan, Korea

부산시 좌천동의 단열암반층에서 자연구배 추적자시험으로 브롬이온농도를 관측하여 심도별 단열발달 상태에 따른 수리분산특성을 비교하였으며, 단열암반층의 유효공극율과 종분산지수를 추정하였다. 수직적인 수리분산특성의 차이는 브롬이온의 농도이력곡선, 관측심도별 브롬이온농도와 시간에 대한 선형회귀분석 및 관측지점별 수리단열특성을 이용하여 규명되었다. 관측공 내 지표면하 18 m(RQD 13%, 평균절리간격 2 cm, TCR 100%) 지점이 주입지점에서의 이격거리가 짧고 단열이 더욱 발달되어 있었기 때문에 25 m(RQD 41%, 평균절리간격 7 cm, TCR 100%) 지점보다 추적자가 빨리 도달하였으며, 초기농도와 최고농도가 더 높게 나타났다. 최고농도 도달 이후의 농도변화에 의하면, 추적자가 최고농도 도달 시까지는 주로 1차 단열을 통해 이동되었고, 최고농도 도달 이후에는 2차 단열을 통해 이동되거나 기질확산에 의한 수리분산이 진행되었다. 선형회귀분석에 의한 지표면하 18 m 지점에서 브롬이온농도의 증가/감소 기울기는 3.46/-1.57이며, 지표면하 25 m 지점에서는 3.19/-0.47로서 파쇄가 더 심한 지표면하 18 m 지점에서의 용질이송이 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 농도이력곡선에서 브롬이온의 농도증가 형태는 가우시안함수로 나타나고, 농도감소 형태는 기질확산에 의한 꼬리효과(tailing effect)로 인해 지수함수로 나타났다. CATI 코드를 이용하여 추정된 단열암반층의 유효공극율은 10.5%, 종분산지수는 0.85 m이었다.

주요어 : 자연구배 추적자시험, 단열암반층, 수리분산, 기질확산, 선형회귀분석, 가우시안함수, 지수함수, 종분산지수

Using a natural gradient tracer test, the characteristics of hydrodynamic dispersion according to each depth of a fractured rock were studied, and the effective porosity and longitudinal dispersivity of the fractured rock were estimated. The difference of vertical hydrodynamic dispersion was identified by concentration breakthrough curves, linear regression analyses of bromide concentrations according to depths versus time, and hydraulic fracture characteristics at two intervals of the monitoring well. Higher concentration and faster arrival time at GL- 18 m depth (RQD 13%, average joint spacing 2 cm, TCR 100%) than at GL- 25 m depth (RQD 41%, average joint spacing 7 cm, TCR 100%) resulted from shorter distance and more fractures. Tracer was transported through the 1st fractures until the arrival of its peak concentration and through the 2nd fractures or matrix diffusion after the arrival of its peak concentration. The increase/decrease slopes of bromide concentration versus time were 3.46/-1.57 at GL-18 m depth and 3.19/-0.47 at GL- 25 m depth of the monitoring well. So the faster bromide transport was confirmed at GL- 18 m depth with more fractures. The concentration increment of bromide was fitted by a Gaussian function, and the concentration decrement of bromide was fitted by an exponential function. Effective porosity and longitudinal dispersivity estimated by CATI code were 10.50% and 0.85 m, respectively.

Key words : Natural gradient tracer test, Fractured rock, Hydrodynamic dispersion, Matrix diffusion, Linear regression analysis, Gaussian function, Exponential function, Longitudinal dispersivity

*Corresponding author: dhkang@pknu.ac.kr

서 론

단열암반층에서 지하수 유동에 의한 용질이송을 정량적으로 파악하기 위해서는 추적자시험에 의한 분산지수(dispersivity)의 추정이 요구된다. 문상호 외(2001)에 의하면, 다양한 추적자시험법 중 자연구배 추적자시험(natural gradient tracer test)에 의한 분산지수의 신뢰성이 가장 높은 것으로 보고되었다. 단열암반층에서의 중·황분산지수는 지하수가 실제로 유동하고 있는 수리단열(hydraulic fracture)의 틈(aperture), 간격(spacing) 및 빈도(frequency)에 의해 지배된다(Candace *et al.*, 1993; Larry *et al.*, 1993; Roy *et al.*, 1998). Lapcevic *et al.*(1999)은 단일단열에서 자연구배 추적자시험을 해석하여 중·황 분산지수를 추정하였다. McKay *et al.*(2000)은 파쇄가 발달되어 있고 풍화가 심한 단열암반층에서 콜로이드 상태의 추적자(microspheres, PRD-1, MS-2, and INA)를 이용한 자연구배 추적자시험을 수행하여, 콜로이드의 확산이 다른 용질(He, Ne, and rhodamine WT)에 비해 500배 이상 빠르게 확산됨을 보고하였다.

국내에서 수행된 단열암반층 내 지하수의 유동과 수리분산에 대한 연구는 1990년대 이후부터 현재까지 단열망(fracture network) 모델링을 통한 수리인자 도출(김경수 외, 1998(a), 1998(b); 박영진 외, 1997; 배대석 외, 1996), 단열암반층 내 지하수 유동의 수리특성(함세영 외, 1998(a), 1998(b)), 분리단열망(discrete fracture network) 개념을 이용한 단열암반층 내 지하수 유동해석(강병무 외, 1993; 채병곤 외, 1997; 한일영 외, 1995) 및 지하수 유로(flow path) 조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석(최병렬, 1998) 등이 수행되었다. 단열암반층에서 지하수 유동과 수리분산에 관한 다수의 연구가 수행되었으나, 자연구배 추적자시험에 의한 분산지수 산출의 연구사례는 보고되지 않았다.

국내에서는 단공주입양수 추적자시험(single well injection withdrawal tracer test)에 의한 단열암반층의 수리분산 연구와 분산지수 추정이 보고된 바 있으며(강동환, 2006; 강동환 외, 2005; 차장환 외, 2003), 자연

구배 추적자시험에 의한 수리분산 연구는 토양층에서 수행된 바 있다(이진용 외, 2001). 단공주입양수 추적자시험은 경제적이고 시험시간이 짧으며 성공의 확률이 높지만, 수평적으로 연결된 수리 구간에서의 용질이송 연구에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 화강암으로 구성된 단열암반층에서 자연구배 추적자시험을 수행하여 단열의 발달정도가 다른 2개의 파쇄구간에서 수리분산특성이 비교 분석되었다. 또한, CATTI 코드를 이용하여 시험대수층의 유효공극율과 중분산지수가 추정되었다.

시험부지의 수리지질특성

연구지역은 부산시 동구 좌천동 일원이며, 서쪽에는 높은 수정산이 위치하고 동쪽은 낮은 평지를 이루고 있다. 또한, 시험부지의 남쪽은 부산만이 형성되어 있다. 추적자시험 부지는 층적층으로 구성되어 있으며, 기반암은 흑운모화강암(biotite granite)으로 이루어져 있다. 연구지역 내 흑운모화강암은 대부분 중립질이며, 주 구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모이다(장태우 외, 1983).

Table 1에는 단열암반층에서 수행된 자연구배 추적자시험의 주입공과 관측공에 대한 제원이 정리되어 있다. 주입공과 관측공의 케이싱은 모두 지표면하 15 m까지 설치되었으며, 지하수공의 개발심도는 주입공 60 m, 관측공 65 m이다. 따라서 나공(open hole) 구간은 주입공이 15~60 m, 관측공이 15~65 m이다. 평균해수면을 기준으로 한 표고는 주입공 4.75 m, 관측공 5.03 m로서 관측공이 높으나, 지하수위는 주입공 3.14 m, 관측공 2.73 m로서 주입공이 0.41 m 정도 높게 형성되어 있다. 주입공과 관측공 사이의 TM 좌표계에 의한 이격거리는 TM_X 방향으로 4.66 m, TM_Y 방향으로 0.77 m로서 주입공과 관측공 사이의 직선거리는 4.73 m이다.

Table 2에는 주입공과 관측공의 시추코어조사 자료를 이용한 심도별 단열분포특성이 정리되어 있다. 주입공과 관측공 사이의 지표면하 15.0~16.5 m 구간에 단열간격

Table 1. Design and coordinate of test wells.

(unit: meters)

Wells	Design	Well depth	Casing depth	Well *ID	Screen interval	Elevation	Water level	Coordinate	
								TM_X	TM_Y
Injection well		60	15	0.075	15~60	4.75	3.14	182576.21	205127.61
Monitoring well		65	15	0.075	15~65	5.03	2.73	182576.99	205132.28

*ID: Inner Diameter.

Table 2. Core logging data of experimental wells for natural gradient tracer test.

Wells	Core interval (GL-, m)	TCR (%)	RQD (%)	Average Joint Spacing (cm)
Injection well	14.7~16.7	80	0	2
	16.7~19.5	48	25	7
	19.5~22.2	91	14	6
	22.2~23.7	100	0	3
	23.7~25.5	5	0	N/A
	25.5~28.4	100	23	6
Monitoring well	15.0~16.0	75	0	N/A
	16.0~17.7	100	14	4
	17.7~19.2	100	13	2
	19.2~21.0	100	15	4
	21.0~22.4	100	21	5
	22.4~23.7	100	8	3
	23.7~25.7	100	41	7
	25.7~27.7	100	45	7

TCR: Total Core Ratio, RQD: Rock Quality Designation, GL-: below the ground surface, N/A: average joint spacing 0.

이 0~2 cm 정도인 파쇄대가 발달되어 있으며, 또한 주입공의 지표면하 23.7~25.5 m 구간은 단열간격이 거의 "0" 에 가까운 파쇄대가 형성되어 있다. 그리고, 관측공에서는 지표면하 17.7~19.2 m와 22.4~23.7 m 구간의 단열간격이 3 cm 이하로서 암반의 파쇄가 매우 심하다. 주입공과 관측공의 시추코어조사 자료를 분석한 결과, 주입공과 관측공 사이에 존재하는 단열암반층은 지표면하 15.0~16.5 m 구간과 23~25 m 구간에서 가장 심한 파쇄대가 형성되었으며, 이러한 파쇄대 구간들이 주입공에서 관측공으로 용질이송 시 우세한 이송경로가 되고 있는 것으로 판단된다.

시추코어조사를 근거로 하여 작성된 주입공과 관측공 사이에서 단열암반층의 수직단면도가 Fig. 1에 도시되어 있다. 관측공은 주입공에서 N7°E 방향으로 4.73 m 이격된 지점에 위치해 있다. 대수층 매질은 케이싱 설치심도인 지표면하 15 m까지는 풍화토와 풍화암으로 구성되어 있으며, 지표면하 15~40 m 구간은 단열이 발달된 화강암으로 구성되어 있으며, 이 구간에서는 상부가 하부보다 암반의 파쇄가 심하게 나타나고 있다. 지표면하 40 m 하부지점은 파쇄대의 발달이 미약하여 불투수층에 가까운 화강암으로 구성되어 있다.

자연구배 추적자시험은 자유면 대수층에 해당하는 지표면하 15~40 m 구간에서 수행되었으며, 시험기간 동안 관측공에서의 지하수 채수는 지표면하 18 m 지점 및 25 m 지점에서 구간분리채수기(Solinst, 425 DIS)를 이용하여 실시되었다. 주입공의 지표면하 12~13 m 구간에서 현장투수시험에 의해 산정된 수리전도도는 $1.27 \times$

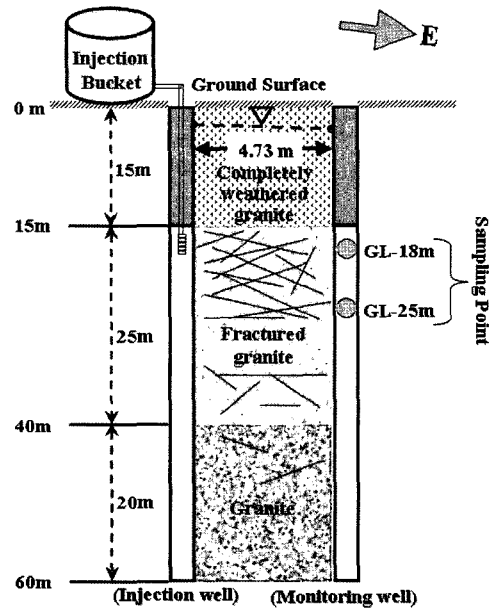


Fig. 1. Cross section of test site for natural gradient tracer test.

10^{-6} m/sec이며, 지표면하 41.4~46.4 m 구간에서 현장수압시험에 의한 수리전도도는 3.48×10^{-7} m/sec이다. 추적자시험 기간 동안 주입공과 관측공의 평균지하수위는 해수면 기준 3.14 m와 2.73 m이며, 주입공과 관측공 사이의 직선거리는 4.73 m이다. 따라서, 추적자시험 기간 동안 주입공과 관측공 사이의 평균수리경사(average hydraulic gradient)는 0.09 정도이었다.

자연구배 추적자시험

추적자시험 조건 및 방법

자연구배 추적자시험에 이용된 추적자는 브롬이온(Br)이며, 시험대수층 내에서 지하수에 포함된 브롬이온의 배경농도(background concentration)는 1 mg/L 정도이다. 추적자의 주입은 KBr 6 kg (브롬 4.028 kg)을 현장수와 혼합하여 지하수위를 변화시키지 않는 주입율로 실시되었다. 추적자의 평균적인 주입율은 약 0.42 L/min이며, 추적자용액의 주입농도는 약 11,400 mg/L 정도였다. 추적자용액은 파쇄대가 발달된 지표면하 15.0~16.5m 구간에서 주입되었으며, 지하수의 수평흐름에 의한 확산을 유도하기 위해 주입호스의 끝부분에 길이 1.5 m의 screened PVC관을 설치하여 주입하였다.

관측공 내에서 브롬이온의 농도 관측은 단열이 발달되어 투수성이 큰 지표면하 18 m 및 25 m 지점에서 구간분리채수기를 이용하여 수행되었다. 이 구간의 RQD와 평균절리간격은 각각 13%와 2 cm, 41%와 7 cm이다. 시험 초기에는 1일 간격으로 관측되었으며, 브롬이온이 검출된 3일 이후부터는 1일 2회 씩 관측되었다. 그리고, 최고농도가 도달한 17일 이후부터는 1일 간격으로 관측되었으며, 관측기간은 총 26일 이었다. 관측공에서 채수된 지하수의 전기전도도는 현장에서 측정되었으며, 브롬이온의 농도는 pH/ISE 측정기(ISTEK, 750P)를 이용하여 실내에서 측정되었다.

자연구배 추적자시험을 수행하는 동안 주입공과 관측공의 지하수위 변화그래프가 Fig. 2에 작성되어 있다. 주입공 내 지하수위는 해수면 기준 3.10~3.23 m의 범

위로서 시험기간 동안 지하수위의 최대변화량은 0.13 m 정도이며, 평균지하수위는 3.14 m 이었다. 관측공 내 지하수위의 범위는 해수면 기준 2.68~2.80 m로서 시험기간 동안 지하수위의 최대변화량은 0.12 m 정도이며, 평균지하수위는 2.73 m 이었다. 추적자시험을 수행하는 동안 주입공과 관측공의 지하수위차는 평균 0.41 m 정도였으며, 지하수위의 최대변화량은 주입공과 관측공에서 평균지하수위의 5% 이내로서 시험기간 동안 지하수위의 변동은 거의 나타나지 않았다. 주입완료 후 7일이 경과한 시점에서 강우에 의해 지하수위가 0.05 m 정도 상승하였으나, 강우 5일 경과 후부터는 일일 지하수위 변화량이 0.01 m 이하로 관측되었다.

관측심도별 수리분산특성

자연구배 추적자시험 기간 동안 관측공 내 지표면하 18 m 및 25 m 지점에서 관측된 전기전도도의 변화그래프는 Fig. 3에, 브롬이온의 농도이력곡선은 Fig. 4에 작성되어 있다. 전기전도도와 브롬이온농도의 전체적인 변화양상은 거의 유사하게 나타났다. 관측공 내 지표면하 18 m와 25 m 지점의 지하수는 브롬이온의 농도변화가 거의 유사하며, 브롬이온이 전기전도도에 미치는 영향성이 동일함을 알 수 있었다.

관측공 내에서 브롬이온의 초기도달은 지표면하 18 m 지점에서는 주입완료 3일 후에 2.9 mg/L, 지표면하 25 m 지점에서는 3일 후에 1.64 mg/L 농도로 관측되었다. 브롬이온의 최고농도도달은 지표면하 18 m 지점에서는 17일 후에 53.7 mg/L, 지표면하 25 m 지점에서는 19일 후에 51.3 mg/L 농도로 관측되었다. 지표면하

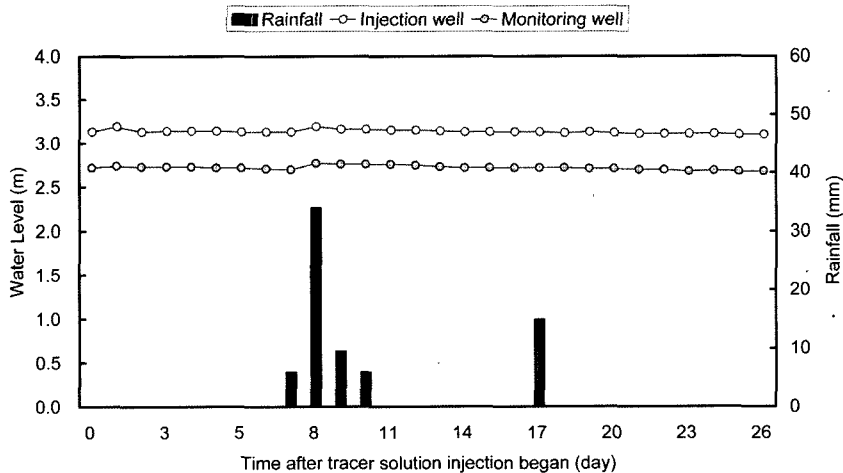


Fig. 2. Change of groundwater levels in injection and monitoring wells during the natural gradient tracer test.

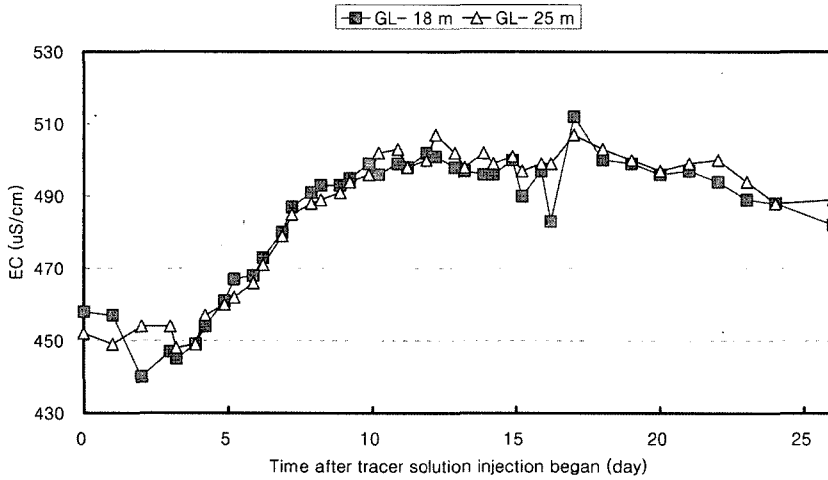


Fig. 3. Breakthrough curves of EC at two depths of the monitoring well.

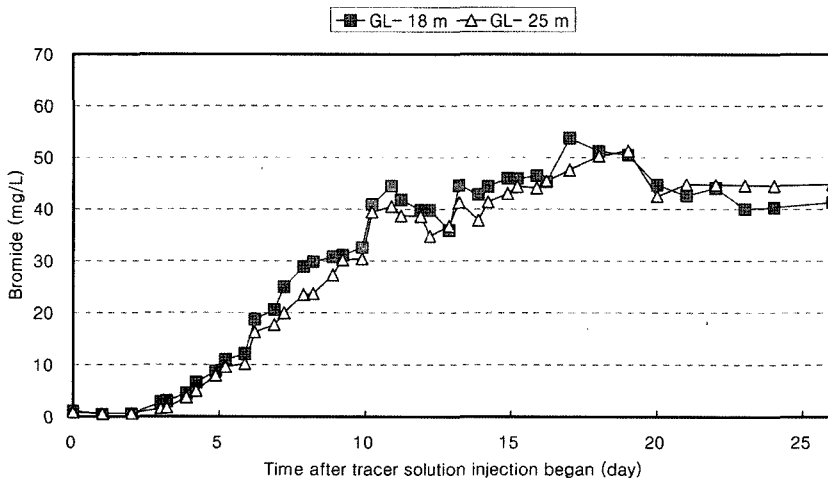


Fig. 4. Breakthrough curves of Bromide at two depths of the monitoring well.

25 m 지점에 비해 18 m 지점에서 브롬이온의 빠른 도달과 높은 농도는 절리의 개수가 3.5배 정도 많고, RQD가 3배 이상 적은 단열특성에 의한 것이며, 또한 주입지점에서의 이격거리가 관측공 내 지표면하 18 m 지점이 25 m 지점에 비해 약 3.26 m 정도 근접하여 있기 때문이다.

주입완료 후 20일 경과 시까지는 지표면하 18 m 지점에서의 브롬이온농도가 지표면하 25 m 지점에 비해 높았으나, 이후에는 지표면하 25 m 지점이 더욱 높게 나타났다. 지표면하 18 m 지점과 25 m 지점에서 브롬이온의 관측심도에 따른 농도변화는 최고농도도달시간이

2일 정도의 차이를 보였으며, 이 기간 동안은 지표면하 18 m 지점에서의 브롬이온농도가 감소할 때 지표면하 25 m 지점에서는 증가되었다. 그리고, 최고농도도달시간 이후의 브롬이온농도 감소율은 지표면하 18 m 지점에 비해 지표면하 25 m 지점에서 낮게 나타났다. 현장 여건으로 인해 지속적인 관측이 수행되지는 못했으나, 시간이 흐를수록 지표면하 18 m 지점과 25 m 지점에서의 브롬이온농도가 거의 동일하게 나타날 것으로 예상된다.

지표면하 18 m와 25 m 지점에서 브롬이온의 최고농도도달 시간은 14~16일 정도이며, 농도는 51.3~53.7 mg/L 이다. 그리고 최고농도에 도달한 이후에 관측

된 브롬이온농도는 7~9일 동안 7~12 mg/L 정도만 감소하였다. 최고농도도달 이후의 농도감소는 최고농도도달 이전의 농도증가에 비하여 훨씬 느리게 진행되었다. 이러한 원인은 추적자가 주입공에서 관측공으로 이송되어지는 동안 추적자운(tracer plume)의 전면과 중심(농도 값이 가장 높은 곳)이 관측공을 통과하는데 걸린 시간과 추적자운의 중심과 후면이 관측공을 통과하는데 걸린 시간의 차이에 의한 것이다.

Lapcevic *et al.*(1999) 및 Becker and Shapiro(2000)의 연구에서 알 수 있듯이, 관측공에서 최고농도도달 이전 시점에서의 농도변화가 상대적으로 급격하게 증가하는 이유는 추적자가 주입공과 관측공 사이의 단열암반층 내에서 빠른 유동경로(1차 단열)를 통해 이송되었기 때문이며, 추적자운의 중심에서 후면이 관측공을 통과하는 동안 브롬이온농도의 변화정도가 완만하게 감소하는 이유는 주입공과 관측공 사이의 단열암반층 내에서 느린 유동경로(2차 단열)를 통해 이송되거나 또는 주로 기질확산(matrix diffusion)에 의해 수리분산이 이루어졌기 때문이다.

관측심도별 브롬이온농도의 증가/감소율

추적자시험이 수행되는 동안 브롬이온의 최고농도도달 시까지의 농도증가율과 최고농도도달 이후의 농도감소율을 추정하기 위해 최고농도도달시간을 기점으로 하여 시간에 따른 브롬이온농도의 증가구간과 감소구간에 대한 선형회귀분석이 실시되었다. 지표면하 18m와 25m 지점에서 브롬이온농도의 증가율은 3.46과 3.19로

나타났다(Fig. 5). 브롬이온의 농도감소율은 지표면하 18m 지점에서 1.57 정도이나, 지표면하 25m 지점에서 0.47 정도였다(Fig. 6). 관측공 내 지표면하 18m 지점이 25m 지점에 비해 브롬이온농도의 증가와 감소가 빠르게 진행되었다. 그 이유는 주입공에서 발생한 추적자운이 관측공을 통과할 때, 투수성이 큰 지표면하 18m 심도의 구간에서 용질이송이 더욱 원활하였기 때문이다.

관측심도별 브롬이온농도의 증가/감소 함수

지표면하 18m와 25m 지점에서 최고농도를 기점으로 한 브롬이온의 농도증가 및 농도감소 함수가 추정되었다. 브롬이온의 농도함수그래프는 상용화된 통계소프트웨어 Igor pro 4.01에 의해 산출되었다. 브롬이온의 농도증가함수는 지표면하 18m와 25m 지점 모두에서 가우시안(gaussian) 모델이 적합하였으나(Fig. 7), 농도감소함수는 지수형(exponential) 모델이 적합한 것으로 나타났다(Fig. 8). 시간에 대한 브롬이온의 농도감소는 지수함수의 형태로 나타났으며, 초기에는 브롬이온농도가 급격하게 감소하지만 3~4일 이후부터 매우 완만하게 감소되었다.

본 연구에서는 추적자시험의 중단으로 인해 농도감소자료가 불충분하지만, 관측된 자료만으로 추정된 농도감소함수의 형태가 Lapcevic *et al.*(1999)에 의해 제시된 농도이력곡선의 농도감소 구간과 매우 유사하다. 이렇듯, 추적자농도가 지수함수 형태로 감소하는 것은 추적자의 기질확산에 의한 꼬리효과(tailing effect) 때문이다.

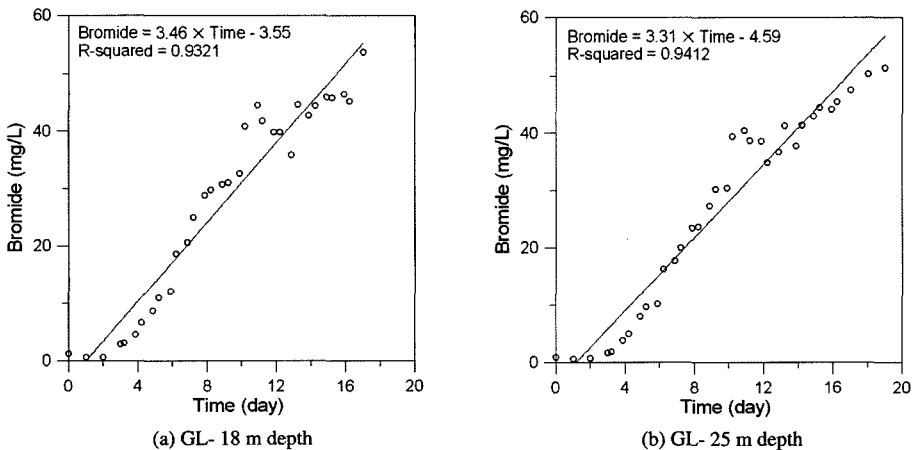


Fig. 5. Linear regression analysis of the bromide concentration versus time for the increase interval of bromide concentration.

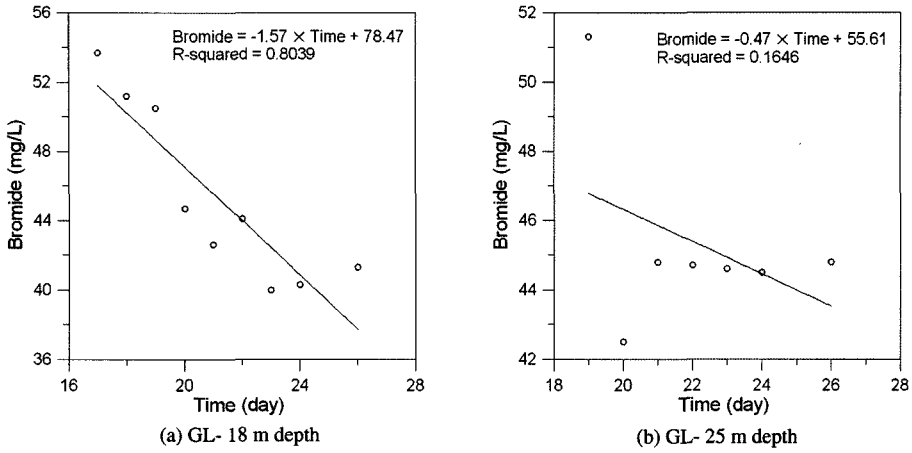


Fig. 6. Linear regression analysis of the bromide concentration versus time for the decrease interval of bromide concentration.

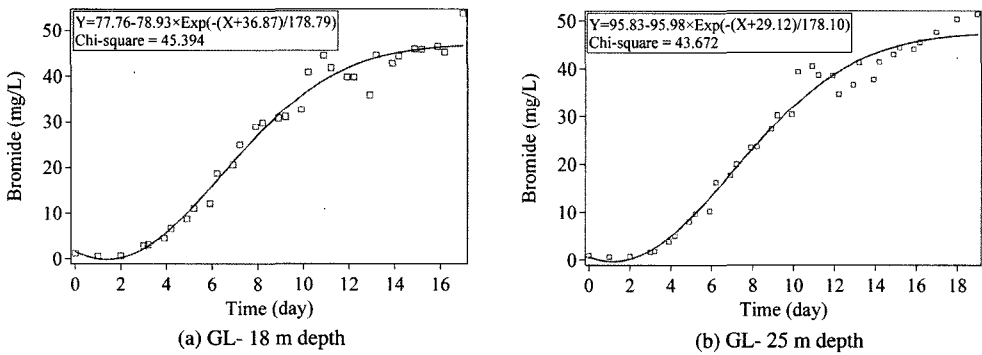


Fig. 7. Function of bromide versus time for concentration increment.

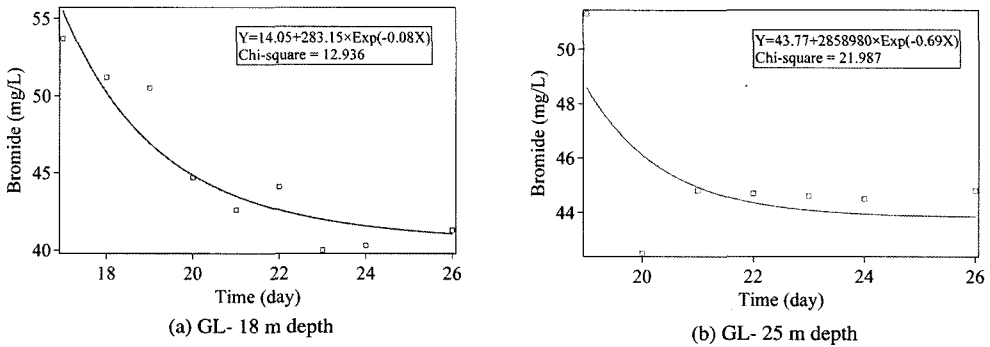


Fig. 8. Function of bromide versus time for concentration decrement.

시험대수층의 유효공극율과 종분산지수
자연구배 추적자시험에 의한 단열암반층의 유효공극

율과 종분산지수는 CATTI 코드(Sauty and Kinzelbach, 1992)에 의해 추정되었다. CATTI 코드에 입력된 매개변

Table 3. Input parameters for CATTI code.

Injection mass (kg)	Distance between the test well (m)	Darcian velocity (m/sec)	Aquifer thickness (m)
4.028	4.73	7.28×10^{-8}	25

수가 Table 3에 정리되어 있다.

관측시간에 따른 브롬이온농도는 지표면하 18 m와 25 m 지점에서 관측된 브롬이온농도의 평균값이 적용되었다. 주입공과 관측공 사이에서 지하수의 다르시유속은 수리전도도와 수리경사에 의해 산정되었다. 수리전도도는 투수시험과 수압시험의 평균값인 $8.09 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 가 적용되었으며, 수리경사는 추적자시험 기간 동안 주입공과 관측공 내 평균지하수위의 차이를 이격거리로 나누어서 구한 0.09가 적용되었다. 실제적인 지하수 유동과 확산이 발생하는 단열암반층의 대수층 구간으로는 주입공과 관측공의 케이싱 설치심도에서 불투수층에 가까운 화강암층까지의 두께 25 m가 적용되었다.

CATTI 코드에 의해 모의된 관측시간에 따른 브롬이온의 농도이력곡선은 Fig. 9에 도시하였으며, 코드에서 추정된 유효공극율은 10.5% 이고, 종분산지수는 0.85 m이다. 기존의 문헌에 의하면 화강암층에서의 공극율은 0.02~15% 정도인 것으로 보고되어 있으며(Sen, 1995), 일반적인 암반층에서의 유효공극율은 10% 미만으로 보고되어 있다(Domenico and Schwartz, 1997). 본 연구에서는 유효공극율이 높게 나타났는데, 이는 시험대수층 구간의 평균단열간격이 4 cm, 평균 RQD 15% 정도인 파쇄대가 형성되어 있기 때문이다. 본 연구에서 수행된 4.73 m 규모의 추적자시험에 의해 추정된 0.85 m의 종분산지수는 Gelhar *et al.*(1992)의 연구사례와 비교하면

약간 높은 값에 해당되며, 이는 단열암반층의 파쇄대에 의한 높은 유효공극율에 의한 것이다.

본 연구에서 수행된 추적자시험은 자연경사의 순간주입 조건이었으며, 주입공과 관측공의 배치가 지하수의 주 흐름방향이었고, 비반응성 추적자로서 주입농도와 질량이 명확하게 제시되었으며, 브롬이온의 농도는 정밀하게 측정되었다. 이러한 조건들을 Gelhar *et al.*(1992)이 제시한 신뢰등급에 적용한 결과, 추적자시험의 신뢰도는 high~intermediate에 해당되었다.

결론

본 연구에서는 자연구배 추적자시험으로 단열암반층의 수직적인 단열특성에 따른 수리분산의 차이를 파악할 수 있었으며, 다음의 결과들이 도출되었다.

1. 단열암반층에서 수행된 자연구배 추적자시험 기간 동안 관측공 내 지표면하 18 m(RQD 13%, 평균절리간격 2 cm)와 25 m(RQD 41%, 평균절리간격 7 cm) 지점에서 관측된 브롬이온의 초기도달시간은 3일 정도이며, 브롬이온농도는 2.9 mg/L와 1.6 mg/L로서 지표면하 18 m 지점이 높게 관측되었다. 최고농도도달 시간과 농도는 지표면하 18 m 지점에서 17일 후에 53.7 mg/L, 지표면하 25 m 지점에서 19일 후에 51.3 mg/L로 관측되었다. 지표면하 18 m 지점이 25 m 지점에서보다 브롬

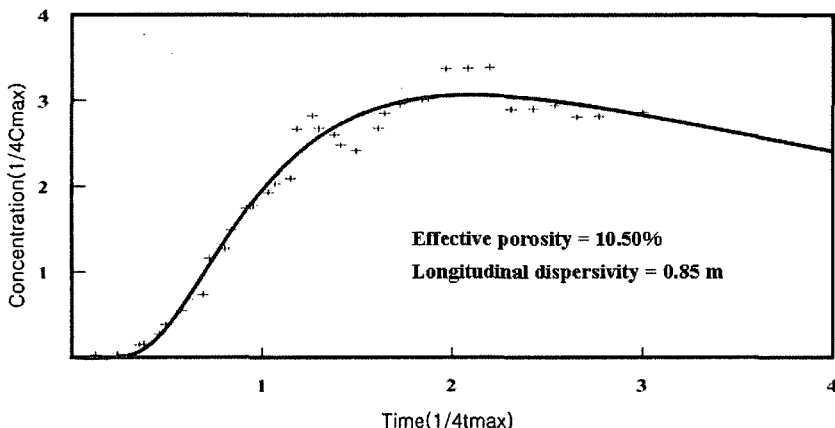


Fig. 9. Breakthrough curve fitted with CATTI code simulation.

이온이 빨리 도달하고 농도가 높은 이유는 18 m 지점에서의 질리 개수가 3.5배 많고, RQD가 1/3로 파쇄가 큰 단열특성에서 기인된 것이다.

2. 관측공에서 관측심도에 관계없이 최고농도도달 이전의 농도변화가 최고농도도달 이후의 농도변화에 비하여 크게 나타났다. 그 이유는 최고농도도달 시까지는 추적자가 단열의 빠른 유동경로(1차 단열)를 통해 이송되었고, 최고농도도달 이후에는 느린 유동경로(2차 단열)를 통해 이송되거나, 또는 주로 기질확산에 의해 수리분산이 이루어졌기 때문이다.

3. 지표면하 18 m와 25 m 지점에서 선형회귀분석에 의한 브롬이온농도 증가율은 3.46과 3.16으로서 지표면하 18 m 지점이 약간 높게 나타났다. 브롬이온의 농도 감소율은 지표면하 18 m 지점에서 1.57, 지표면하 25 m 지점에서 0.47 정도로서 지표면하 18 m 지점에서 3배 이상 빠르게 감소되었다. 관측공 내 지표면하 18 m 지점이 25 m 지점에 비해 브롬이온농도의 증가와 감소가 빠르게 변화되었으며, 이는 지표면하 25 m 심도에 비해 지표면하 18 m 심도에서 용질이이송이 더욱 원활하였기 때문이다. 농도이력곡선에서 브롬이온의 농도증가는 가우시안 함수가 적합하였으며, 농도감소는 기질확산에 의한 꼬리효과로 인하여 지수함수의 형태로 나타났다.

4. 지표면하 18 m와 25 m 지점에서 관측된 브롬이온농도의 평균값을 적용하여 CATTI 코드에서 추정된 단열암반층의 유효공극율은 10.5% 정도이며, 중분산지수는 0.85 m이다. 유효공극율이 높게 나타난 것은 지표면하 16~30 m 구간에 발달되어 있는 파쇄대(평균단열간격 4 cm, 평균 RQD 15% 정도)로 인한 것이며, 이 구간에서 높은 투수성과 빠른 확산으로 인해 중분산지수도 높게 추정되었다.

사 사

이 논문은 2004학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원기관에 감사한다.

참 고 문 헌

- 강동환, 2006, 추적자시험을 이용한 단열암반층과 토양층에서 수리분산특성 연구, 박사학위논문, 부경대학교, 148p.
- 강동환, 정상용, 김병우, 2005, 단공주입양수 추적자시험을 이용한 폐기물매립장 주변의 침출수 확산 연구, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, pp.105-109.
- 강병무, 김천수, 배대석, 김경수, 기정석, 1993, 분리열극 개념을 이용한 지하공동주변의 지하수유동분석, 대한지질공학회, 3(2), pp.125-148.
- 김경수, 김천수, 배대석, 김원영, 최영섭, 김중렬, 1998(a), 3차원 단열망모델링을 위한 단열수리인자 도출, 한국지하수환경학회, 5(2), pp.80-87.
- 김경수, 김천수, 배대석, 정지근, 1998(b), 순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법 고찰, 대한지질공학회, pp.1-12.
- 문상호, 함세영, 우남철, 이철우, 2001, 지하수 추적자, 시그마프레스, 169p.
- 박영진, 이강근, 이승구, 1997, 단열교차점에서 유체간섭에 관한 수치적 고찰, 한국지하수환경학회, 4(3), pp.111-115.
- 배대석, 송무영, 김천수, 김경수, 김중렬, 1996, 분리단열망개념의 지하수유동해석을 위한 단열투수량계수의 정량화 연구, 대한지질공학회, 6(1), pp.1-13.
- 이진용, 천정용, 이강근, 이민효, 윤정기, 2001, 다공질 천층대수층에서의 추적자 이동 연구, 지질학회지, 37(2), pp.309-316.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 부산·가덕도폭, 한국동력자원연구소, 22p.
- 차장환, 배광옥, 이강근, 2003, 파쇄 암반대수층에서 Push-pull Tracer Test의 현장 적용사례, 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회, pp.268-271.
- 채병근, 최영섭, 이대하, 김원영, 이승구, 김중렬, 1997, 유동성 단열 파악을 위한 암반 내 단열특성 규명, 한국지하수환경학회, 4(2), pp.88-99.
- 최병렬, 1998, 지하수 유로 조사를 위한 질리계의 응용 지질학적 분석, 대한지질공학회, 8(2), pp.131-143.
- 한일영, 조성만, 정광필, 1995, 지하 LPG 저장공동의 기밀성평가를 위한 분리열극개념의 지하수유동 및 용질 이동 모형 모의기법 적용, 대한지질공학회, 5(2), pp.155-165.
- 함세영, 김형찬, 임정웅, 1998(a), 수직 지질구조에 의해서 지배되는 암반지하수 유동의 수리적 성질과 그에, 한국지하수환경학회, 5(2), pp.101-109.
- 함세영, 임정웅, 배두중, 최위찬, 1998(b), 균열암반대수층의 적정채수량 산정의 적용성 연구, 한국지하수환경학회, 5(1), pp.21-29.
- Becker, M. W., and Shapiro, A. M., 2000, Tracer transport in fractured crystalline rock: Evidence of non-diffusive breakthrough tailing, Water Resources Research, 36(7), pp.1677-1686.
- Candace, C. C., Stephen, E. S., and Elizabeth, S., 1993, Variation in aperture estimate ratios from hydraulic and tracer tests in a single fracture, Water Resources Research, 29(9), pp.2975-2982.
- Domenico, P. A., and Schwartz, F. W., 1997, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, Inc., 506p.
- Gelhar, L. W., Welty Claire, and Rehfeldt Kenneth R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resources Research, 28(7), pp.1955-1974.
- Lapcevic P. A., Novakowski, K. S., and Sudicky, E. A., 1999, The interpretation of a tracer experiment conducted in a single fracture under conditions of natural groundwater flow, Water Resources Research, 35(8), pp.2301-2312.

- Larry, D. M., Gillham, R. W., and Cherry, J. A., 1993, Field experiments in fractured clay till; 2. Solute and colloid transport, *Water Resources Research*, 29(12), pp.3879-3890.
- Mckay, L. D., Sanford, W. E., and Strong, J. M., 2000, Field-scale migration of colloidal tracers in a fractured shale saprolite, *Groundwater*, 38(1), pp.139-147.
- Roy C. S., Bertel Nilsson, Martin Hansen, and Johney Fredericia, 1998, Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, *Funnen, Denmark*, *Water Resources Research*, 34(10), pp.2515-2527.
- Sauty, J. P., and Kinzelbach, W., 1992, CATI: Computer aided tracer test interpretation, *International Groundwater Modeling Center*, Golden, Colorado.
- Sen, Z., 1995, *Applied Hydrogeology for scientists and engineers*, CRC Press, Inc., 444p.

정상용

부경대학교 환경지질학과
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6235
Fax: 051-628-6432
E-mail: chungsy@pknu.ac.kr

강동환

부경대학교 환경지질학과
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6235
Fax: 051-628-6432
E-mail: dhkang@pknu.ac.kr

김병우

부경대학교 환경지질학과
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6235
Fax: 051-628-6432
E-mail: k_bw00@hotmail.com

2006년 7월 28일 원고접수, 2006년 9월 6일 게재승인