

파쇄 암반대수층에서 Push-pull Tracer Test의 현장 적용사례

차장환 · 배광옥, 이강근*

농업기반공사 농어촌연구원, *서울대학교 지구환경과학부

hydro-cha@karico.co.kr

요 약 문

연구지역에 설치된 3개 관정에서 추적자시험 방법 중 단공 주입-회수시험을 실시하였다. Push-pull 추적자시험 자료 분석 결과 종분산지수는 0.086 ~ 0.657m의 값을 가지며(Pickens and Grisak, 1981), 지하수 유동속도는 $9.07 \times 10^{-4} \sim 6.14 \times 10^{-3} \text{m/min}$ 의 값을 보인다(Hall and other, 1991). 또한 계산된 종분산지수와 지하수 유속을 이용하여 종분산계수($3.77 \times 10^{-4} \sim 9.53 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{min}$)를 산정하였다. 추적자의 거동특성이 크고 작음을 비교할 수 있게 하는 특성변수(Characteristic property)는 분산지수이므로, 분산지수의 크고 작음에 따라서 추적자의 거동특성이 달라짐에 주의해야 한다.

주제어 : Push-pull 추적자시험, 분산지수, 유동속도

1. 이론

Mercardo(1966)가 제시한 방법인 단공 주입-회수시험을 통해서 대수층의 분산지수(α)와 유동속도(v)를 산출할 수 있으며 이 때 얻어진 분산지수 및 유동속도는 시험정 주변 대수층의 값을 의미한다.

대수층 주변의 분산지수는 전체 주입량에 대한 시간에 따른 양수량의 비와 상대적인 농도 그래프를 이용하여 식(1)로부터 산정하였다(Pickens and Grisak, 1981).

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

여기서 α 는 대수층의 종분산지수[m], b 는 대수층의 두께[m], U_i 는 추적자 용액의 전체 주입량[m³], U_P 는 시간에 따른 양수량[m³] 및 θ 는 매질의 공극률[무차원]이다. 또한 $\Delta(U_P/U_I)$ 는 $\frac{1}{2} C/C_0$ 에서의 접선과 $C/C_0 = 0.0$ 과 1.0인 선과의 교차점 사이의 양수량 증가분 [무차원]이다.

지하수의 유동속도는 대수층두께 혹은 시험구간의 두께(b)와 유효공극률(θ)을 알고 있는 경우 다음 식(2)을 이용하여 산출하였다(Hall and others, 1991).

$$v = (Qt_P / \pi b \theta)^{1/2} / t_* \quad (2)$$

여기서 Q 는 양수율[m³/min], t_P 는 양수 시작 후 추적자용액의 질량 중심이 회수될 때까지 걸린 시간[min] 및 t_* 는 추적자의 표류시간[min]이다.

2. 본론

가. 연구지역 현황

연구지역은 춘천시 신북읍 유포리에 위치한 4개의 관정으로 4m 간격으로 배열되어 있으며(그림 1), 관정 심도는 각각 100m(FW-1), 90m(FW-2), 70m(FW-3) 및 50m(FW-4)이다. 이 지역은 과수원이 넓게 분포하여 시비량 및 농약 살포량이 많고, 축사가 다수 존재하여 주요 지하수 오염원으로 작용함을 확인할 수 있다. 특히 이 지역은 생활용수와 농업용수 공급이 모두 지하수에 의

존하고 있다.

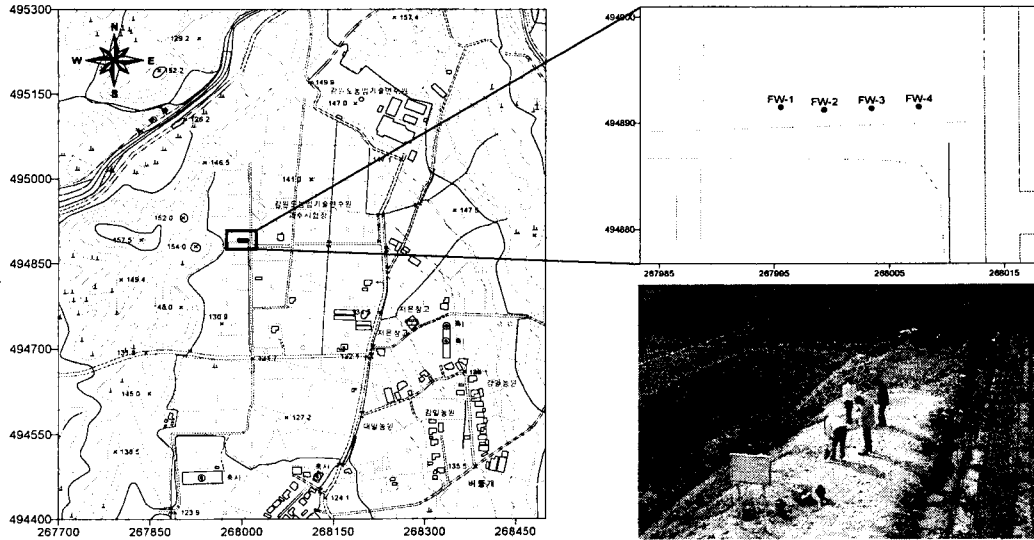


그림 1. 연구지역의 시험정 위치도(춘천시 신북읍 유포리).

나. Push-pull 추적자 시험

Push-pull 추적자 시험은 단공 주입-회수의 방법으로 수행하였으며 추적자로는 NaCl을 사용하였다. 추적용액은 27m 심도에 주입하였으며 추적자 주입 및 추출과 관련된 변수들은 표 1와 같다. 또한, 추적용액 주입 전 연구지역의 배경 수질을 측정하였다(표 2).

표 1. 시험정별 추적자 주입 및 추출 변수.

| 구분 | 주 입 | | | 표류 | 추 출 | | | | | |
|------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------|
| | 주입농도 (mS/cm) | 주입유량 (L/min) | 주입시간 (min) | 표류시간 (min) | 양수량 (L/min) | 양수시간 (min) | Peak 도달시간 (min) | Peak농도 (mS/cm) | T _p (min) | T _p 농도 (mS/cm) |
| FW-2 | 10.170 | 66 | 2.25 | 105.8 | 16.2 | 60.0 | 18.5 | 4.059 | 24.5 | 3.554 |
| FW-3 | 20.500 | 68 | 2.37 | 854.1 | 15.0 | 118.5 | 14.0 | 3.904 | 37.5 | 2.926 |
| FW-4 | 8.068 | 66 | 2.25 | 128.3 | 15.7 | 64.5 | 8.5 | 2.775 | 18.8 | 2.217 |

표 2. 시험정별 배경 수질.

| 구분 | EC(mS/cm) | Temp.(°C) | pH | Salinity |
|------|-----------|-----------|------|----------|
| FW-2 | 0.436 | 13.18 | 5.61 | 0.27 |
| FW-3 | 0.504 | 13.69 | 5.35 | 0.31 |
| FW-4 | 0.455 | 13.99 | 5.35 | 0.28 |

Push-pull 추적자 시험시 지하수와 혼합된 추적자의 농도(EC)는 YSI 556MPS를 이용하여 측정하였다. YSI 556MPS 장비의 EC 측정 정밀도는 +0.001mS/cm 측정치에서 ±0.5%이며, 분해능은 0.001mS/cm~0.1mS/cm이다. 농도 측정 시간 간격은 추적자 농도의 변화양상에 따라 30sec에서 3min 간격까지 다양하게 측정하였다.

다. 결과 및 토론

각 시험정에서의 Push-pull 추적자시험 결과를 $\Delta(U_p/U_i)$ 에 따른 C/C_0 로 도시하였다(그림 2). 분산지수는 각 시험정의 시험 결과와 위의 식(1)로부터 구할 수 있다(표 3).

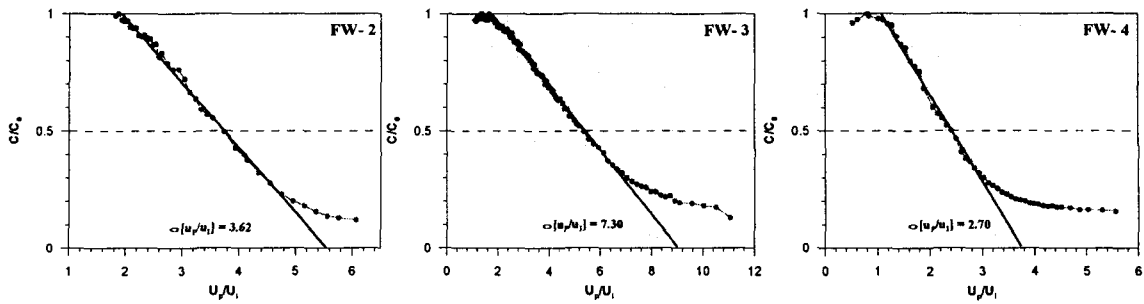


그림 2. 각 시험정의 Push-pull 추적자시험 결과.

표 3. 시험정별 분산지수 계산 결과.

| 구분 | $\Delta(U_p/U_0)$ | 총주입량 (U_i ; m ³) | 유효공극률 (θ) | 시험구간 (b ; m) | 종분산지수 (a ; m) |
|------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| FW-2 | 3.62 | 0.149 | 0.1 | 3.0 | 0.155 |
| FW-3 | 7.30 | 0.161 | 0.1 | 3.0 | 0.657 |
| FW-4 | 2.70 | 0.149 | 0.1 | 3.0 | 0.086 |

표 3에서 유효공극률은 일반적으로 화강암 대수층에 적용되는 유효공극률인 0.1을 적용하였으며, 수중카메라검층 결과에 따라 심도 27m에서 상하 각 1.5m 이내에 발달한 파쇄대를 유효 시험구간(b)으로 설정하여 분석하였다(그림 3).

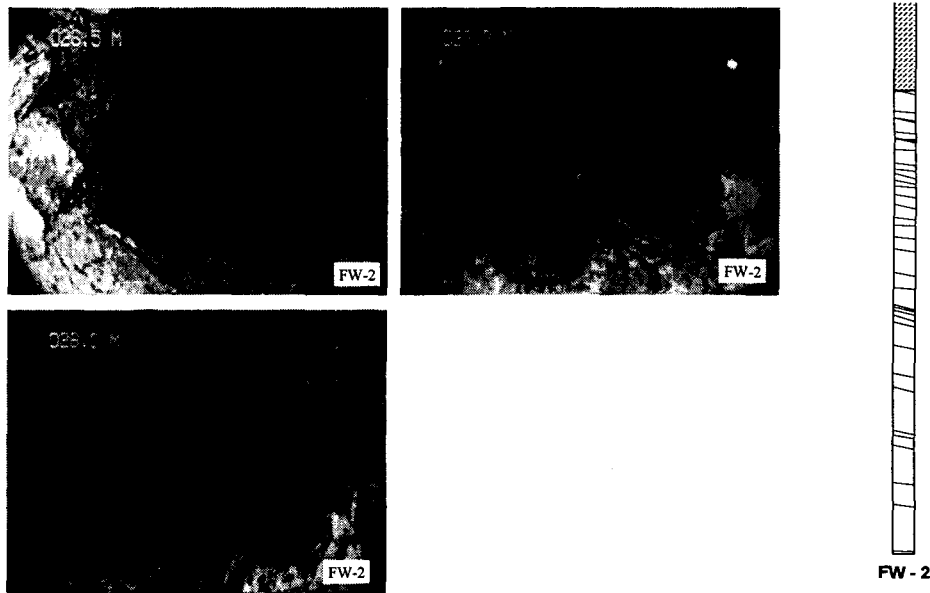


그림 3. 수중 카메라를 이용한 단열의 수직분포(FW-2).

분석 결과 각 시험정 주변 대수층의 종분산지수는 각각 0.155m(FW-2), 0.657m(FW-3), 0.086m(FW-4)로 산정되었다. 이는 심도 27m 내외에서 파쇄대의 발달이 양호한 FW-3 시험정에서의 종분산지수가 FW-2 및 FW-4와 비교해 큰 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 수중카메라검층 결과 FW-4에서 시험구간의 파쇄대 발달이 미약하고, FW-2에서 중간정도, FW-3에서 가장 잘 발달된 상황과 일치한다. 즉, 종적인 파쇄대의 발달이 양호할수록 추적자 혹은 오염물질이 종적으로 더 잘 전파되어 나갈 수 있음을 나타내는 결과라고 할 수 있다.

시험정의 지하수 유동속도는 각 시험정의 추출변수(표 2)와 추적자 질량의 중심이 회수될 때까지의 시간(그림 4)을 이용하여 식(2)에서 구할 수 있으며 각 시험정의 유동속도는 6.14×10^{-3} m/min(FW-2), 9.07×10^{-4} m/min(FW-3) 및 4.37×10^{-3} m/min(FW-4)로 나타났다.

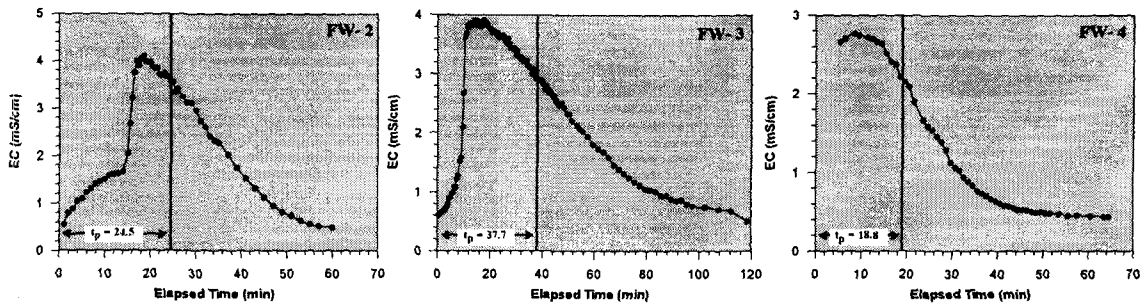


그림 4. 각 시험정에서 추적자 질량의 중심 도달시간.

위의 Push-pull 추적자시험 자료 분석 결과에서 얻어진 종분산지수와 지하수 유동속도 자료를 이용하여 다음 식(3)으로부터 종분산계수(D_L)를 구할 수 있다.

$$D_L = \alpha_L v \quad (3)$$

그 결과 각 시험정의 종분산계수는 $9.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{min}$ (FW-2), $5.96 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{min}$ (FW-3), $3.77 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{min}$ (FW-4)의 값을 가진다.

3. 결론

유포리 연구지역에 설치된 3개 관정(FW-2, FW-3, FW-4)에서 추적자시험 방법 중 단공 주입-회수시험을 실시하였다. Push-pull 추적자시험 자료 분석은 Pickens and Grisak(1981)의 방정식을 이용하여 종분산지수($0.086 \sim 0.657\text{m}$)를 구하였고, Hall and other(1991)의 방정식을 이용하여 지하수 유동속도($9.07 \times 10^{-4} \sim 6.14 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{min}$)를 계산하였다. 또한 계산된 종분산지수와 지하수 유속을 이용하여 종분산계수($3.77 \times 10^{-4} \sim 9.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{min}$)를 산정하였다.

앞에서 살펴 본 바와 같이 분산계수는 분산지수와는 달리 같은 Order 내에서 값이 결정됨을 알 수 있는데, 이는 추적자의 거동특성이 유사함을 나타내는 증거는 아니며 분산지수와 지하수 유속사이의 관계만을 유추할 수 있다. 추적자의 거동특성이 크고 작음을 비교할 수 있게 하는 특성변수는 분산지수이므로, 분산지수의 크고 작음에 따라서 추적자의 거동특성이 달라짐에 주의해야 한다. 따라서 Push-pull 추적자 시험시 유효 시험구간의 설정이 필요하며 시험정 내 일정구간에 Packer를 설치, 밀폐한 후 실시하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.

4. 참고문헌

1. 이진용, 천정용, 이강근, 이민효, 윤정기, 2001, 다공질 천층 대수층에서의 추적자시험 연구, 지질학회지 37(2), 153-168
2. Hall, S. H., S. P. Luttrell and W. E. Cronin, 1991, A method for estimating porosity and groundwater velocity, Ground Water, Vol. 29, No. 2, pp. 171-174.
3. Pickens, J. F. and Grisak, G. E., 1981, Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, Water Resources Research, Vol. 17, No. 4, pp. 1191-1211.

사사 : 본 연구는 21세기 포몬터어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-5-1)에 의해 수행되었습니다.