

비흡착성 추적자시험에 의한 단열대의 수리파라미터 해석

박 경 우
김 경 수
배 대 석
김 천 수
조 성 일

한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
충남대학교

요 약

본 연구는 화강암 분포지역의 150m 심도에 분포하는 소규모 국지 단열대에 대한 추적자 시험 결과이다. 해수를 사용하여 관측공에서 측정된 지하수의 전기전도도 변화를 Cl^- 농도로 계산하였고, 모멘트해석법과 준해석해를 이용한 해로 단열대에 대한 수리파라미터를 추정하였다. 그 결과를 펄스시험에서 얻은 수리전도도와 비교하였으며, 계산된 수리파라미터를 사용하여 시험구간 내의 유효단열간극의 크기를 구하였다.

1. 서 론

단열 암반에서 용질의 이동은 다공성 매질에서와는 매우 다른 양상을 나타낸다. 다공성 매질의 추적자 시험 결과는 일반적으로 균질한 3차원의 유체 흐름과 그에 따른 용질의 이동 문제로 해석되고 있지만, 단열 암반에서는 매질에 많은 불확실성이 존재하기 때문에 시험 결과를 정확히 해석하기가 매우 어렵다. 이는 다공성 매질에서 전체 영역을 대표하는 대표 체적(REV)을 결정하기가 비교적 쉽지만, 단열암반에서는 매우 어렵다는 사실과 맥락을 같이 한다.

이렇게 불확실성이 큰 단열 암반에서 수행한 추적자 시험의 결과를 해석하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방법은 단열의 투수성에 비해 암반의 투수성이 매우 낮다는 가정 하에 유체의 흐름과 용질의 이동이 불균질한 3차원 공간에서 2차원의 단열에서 일어난다고 해석하는 방법, 다공성 매질 뿐만 아니라 단열 암반에서도 대부분의 추적자 시험을 위한 해석이 기본적인 이송-확산방정식을 기초로 여기에 시험에 영향을 미치는 요소-관정 내에서의 혼합에 의한 영향(well diffusion), 매질로의 확산(matrix diffusion), 정체수로의 확산(stagnant water diffusion)-를 조금씩 더해서 해석하는 방법, 그리고 유체와 용질의 흐름은 선호경로를 따라 형성된 여러 개의 통로를 통해서 이루어진다는 유로모델(channel model)로서 해석하는 방법으로 크게 구분된다(Abelin et al. 1985).

용질의 이동과 관련한 일반적인 지배방정식은 이송-확산 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla C - VC)$$

C : concentration

D : coefficient of hydrodynamic dispersion

V : average linear velocity

위의 방정식은 지표 혹은 지하에 노출된 용질이 지하수의 흐름과 매질의 형태, 지하수의 속도에 의한 수력학적인 분산에 이동된다는 것을 의미한다. 그러나, 이송-확산 방정식으로 단열암반에서의 용질의 이동에 직접적으로 적용하는 것은 단열의 복잡한 분포특성 때문에 적합하지 않다. 현재, 단열암반에서의 추적자 이동과 관련해 많은 활발한 연구가 진행중임에도 불구하고 해석에 관한 적절한 방법을 찾는 것은 부지고유의 특성과 관련하여 매우 어려운 문제이기 때문에 본 연구에서는 먼저 이송-확산 방정식을 근거로 추적자 시험에 대한 결과를 해석해 보았고, 모멘트 해석법으로 비교해 보았다. 또한, frictional loss aperture를 추적자 시험의 해석 결과로부터 도출해 보았다(Abelin et al. 1985, Tsang. 1992).

2. 연구지역

고준위방사성폐기물의 심지층 처분 연구의 일환으로 한국원자력연구소 부지 내에서 시추조사공이 설치되었다. 연구지역의 지질은 시대미상의 편상화강암이다. 시추공 YS-02번을 추적자의 주입공로 사용하였고, 주입된 추적자를 YS-02-1, YS-02-2번 공에서 관측하였다. YS-02-1번 공은 주입공으로부터 북쪽으로 2.5m 떨어져 있고, YS-02-2번 공은 주입공에서 북동쪽으로 50°의 각을 이루며 2.5m 이격되어 있다. 두 관측공 이외에 주입공에서 7.1m 떨어진 YS-02-3번 공에서 추적자 주입에 의한 지하수질 변화를 측정하였다(Figure 1).

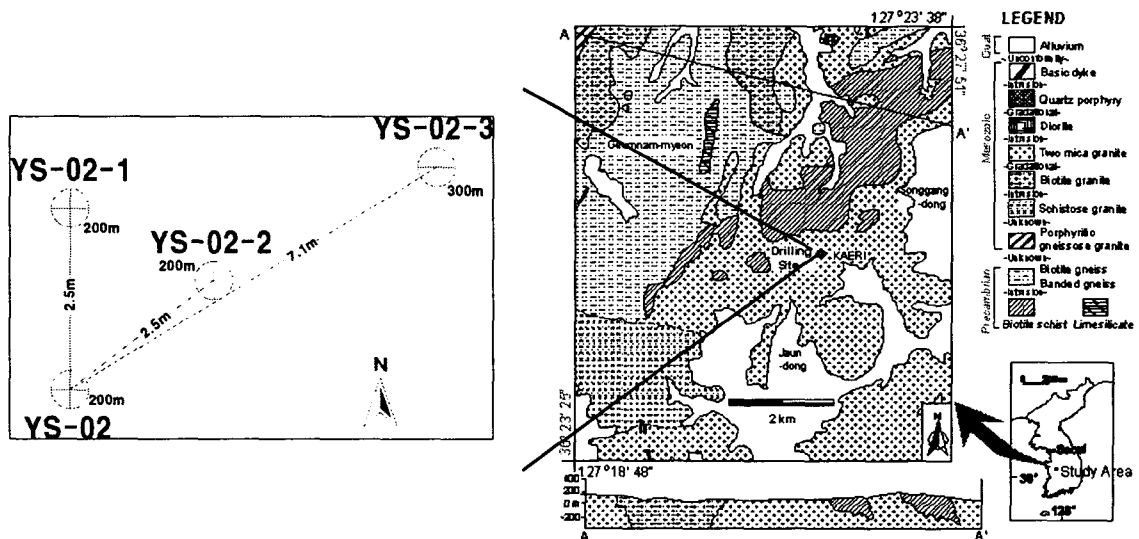


Figure 1. 연구지역 지질과 시험공의 배열

3. 시험 방법

추적자 시험은 2002년 11월 13일부터 동년 12월 26일까지 44일에 걸쳐 수행되었다. 기존 연구에 따르면 연구지역의 140m~150m에서 국지 단열대가 존재하는 것으로 알려졌다(김경수^a 외, 2002; 김경수 외, 2001). 단열대의 수리 파라미터를 추정하기 위해 주입공의 단열대가 교차되는 심도의 상하부에 패커를 설치하고, 2개의 관측공에도 단열대가 교차되는 심도에 이중패커를 설치하였다. 패커를 설치한 후 주입공에 추적자를 가압(2.5 kg/cm²) 주입하면서 주입공 및 관측공의 격리구간에서 전기전도도를 측정하였다. 2개의 관측공에서는 격리된 구간 상하부의 투수성을 확인하기 위하여 YS-02-1번 공 상부 패커 윗 부분 및 YS-02-2번 공 하부 패커 아랫 부분에서도 전기전도도 계측기를 설치, 관측하였다(Figure 2).

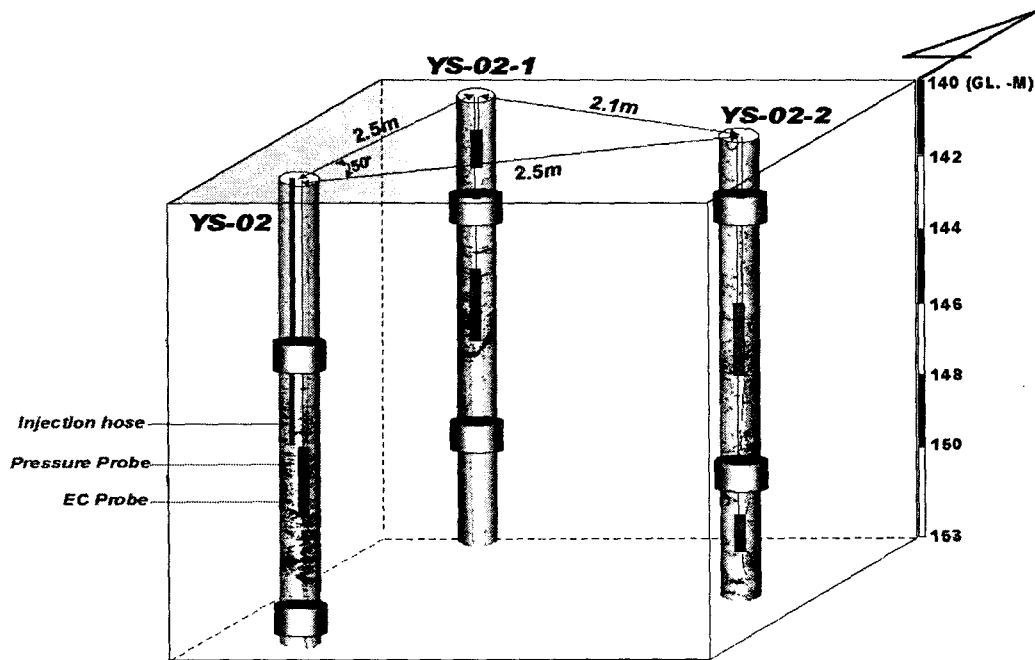


Figure 2. 추적자 시험 배치도

추적자는 비반응 용질인 해수를 사용하였다. 해수의 전기전도도 값은 함유된 이온들의 양과 선형 관계라고 가정하여 추적자 시험에서 계측된 전기전도도 값은 다음 식을 이용하여 Cl⁻의 농도로 변환할 수 있다.

$$\text{Cl}^- \text{의 농도} = 48,000 \text{ S/cm(해수의 전기전도도)} \times 0.396$$

시험에 사용된 해수는 19,000ppm의 Cl⁻ 농도를 갖는 것으로 분석되어 전기전도도와 Cl⁻의 농도값이 기울기 0.396로 선형관계가 있다는 가정으로 Cl⁻의 농도를 계산하였다.

4. 시험결과 및 해석

추적자 주입 전 주입공과 관측공에서의 압력은 일정한 값을 유지하였으며, 추적자의 주입

이 시작되는 11월 18일을 경계로 주입공에서는 가압 주입에 의해 격리구간의 수압이 140m에서 165m로 상승된 반면(Figure 3(a)), 관측공의 격리구간은 계속 일정한 수압(141m, 143m)을 유지하여 주입구간과 관측구간 간에는 24m~22m의 수두차를 형성하였다 (Figure 3(b),(c)).

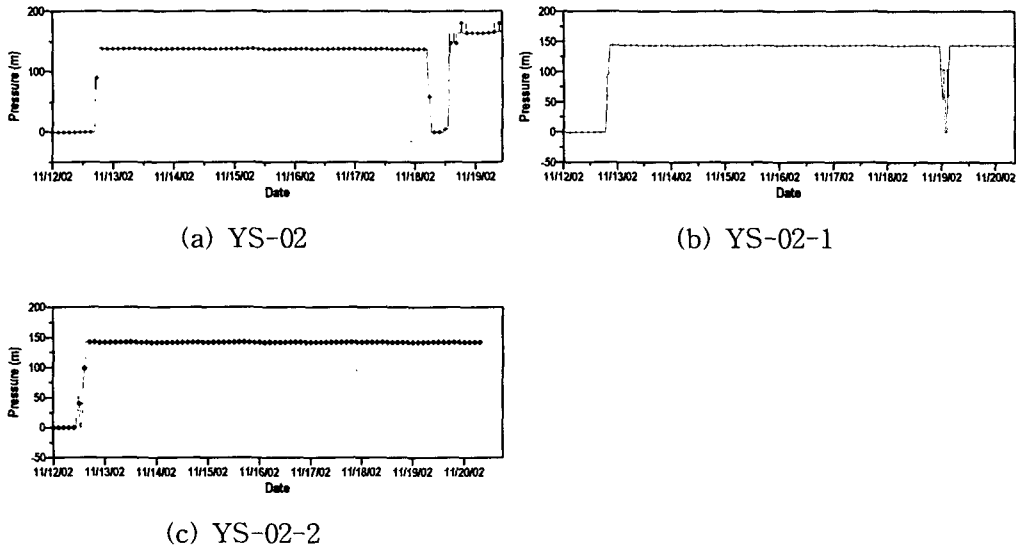


Figure 3. 주입구간과 관측구간 사이에서의 시간에 따른 압력 변화

1) 준해석해를 이용한 해석

주입지점과 관측지점의 거리가 2.5m에 불과하므로 분산도가 일정한 매질에서 지하수의 흐름이 1차원이고, 추적자가 순간적으로 주입(instantaneous source)된다고 가정하여 아래의 해석해(Bedient et al.1994)로서 시험구간의 수리 파라미터를 계산해 보았다.

$$c(x, t) = \frac{M}{An(4\pi D_x t)^{1/2}} \exp\left[\frac{-(x - v_x t)^2}{4D_x t}\right]$$

- M : 단위 단면적당 주입된 용질의 질량 (kg)
- x : 주입점과 관측점 사이의 거리 (m)
- A : 지하수가 흐르는 단면적 (m^2)
- n_f : 유효 공극률
- D_x : 분산계수 (m^2/s)(dispersion coefficient)
- v_x : 광역적 규모에서 공극을 흐르는 유속 (m/s)

초기 입력값은 관측공에서 측정된 추적자의 농도값을 사용하였고, 주입구간과 관측구간 사이의 거리는 2.5m, 지하수의 Darcy velocity는 가압 조건하에 주입공에서 추적자를 주입한 시간과 관측공에서 용질이 도달한 시간을 비교하여 구했다(Table 1).

각 관측지점으로부터 얻은 농도이력곡선과 준해석해를 이용해 가장 적절한 수리 파라미터를 구한 농도이력곡선을 Figure 4에 실선으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 관측구

간에서 측정된 초기 추적자의 농도 값이 이론적인 준해석해의 농도 값보다 크게 나타나는 경향을 발견할 수 있는데, 이는 유로유동 또는 확인되지 않은 투수성단열에 기인하는 것으로 해석이 가능하다.

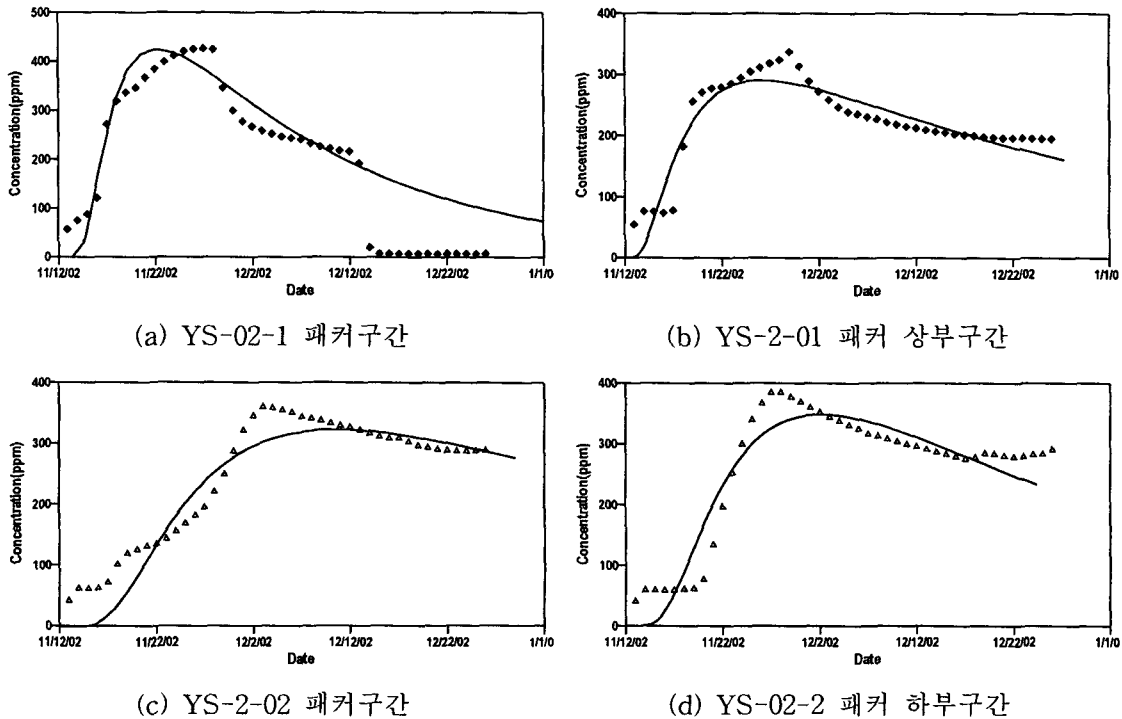


Figure 4. 추적자 시험의 결과(점선)와 준해석해로 구한 농도이력곡선(실선)

Table 1. 준해석해로 구한 수리 파라미터

	분산도(m)	유효공극률	공극수 속도(m/s)
	L	<i>dimensionless</i>	L/T
YS-02-1 패커 사이부분	1.12	0.0295	4.80×10^{-4}
YS-02-1 상부패커 윗부분	1.44	0.0275	5.79×10^{-4}
YS-02-2 패커 사이부분	0.97	0.0241	1.514×10^{-4}
YS-02-2 하부패커 아랫부분	0.86	0.0236	2.040×10^{-4}

2) 모멘트 해석법

모멘트 해석법은 추적자 시험의 결과를 나타내는 농도이력곡선을 이용하여 매질의 수리 마파메터를 파악하는 아주 유용한 방법이다. 이 해석법은 분산-이송방정식 같은 용질의 이동에 관한 기본적인 물리적 모델이 필요하지 않으며, 추적자 시험 결과 나타나는 농도이력 곡선을 이용하여 평균 농도이력시간과 퍼짐의 정도(degree of spreading)를 분석하여 수리

파라미터를 구한다(Yu et al., 1999).

본 연구에서는 위에서 기술한 실험내용을 가지고 관측공의 농도이력곡선을 이용하여 수험 구간에서의 수리 파라미터들을 추정해 보았다. 평균 농도이력시간과 이차중심모멘트를 구하기 위해 Trapezoidal 방법을 이용하여 적분하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 이 결과에 따르면 추적자 농도의 중심치가 관측공에 도착하는 평균 농도이력시간은 관측공의 위치와 관측점마다 다르지만 대략 6.34일에서 8.33일 정도 소요되는 것으로 판단되며, YS-02-1번공에 비해 YS-02-2번 공의 2차 중심모멘트 값이 다소 크게 나타나기 때문에 유속에 따른 퍼짐 현상이 YS-02-2번 공에서 더 많이 진행됨을 알 수 있다. 물론 주입공과 YS-02-1번 공 사이의 유속이 크기 때문에 분산계수(분산도×공극수 속도)는 YS-02-1번 공에서 크게 나타나게 된다 (Table 3).

모멘트 해석법에 의해 추적자의 평균 선형속도는 대략 $3.94 \times 10^{-7} \sim 4.75 \times 10^{-7}$ m/s의 범위를 가지며, YS-02-1번 공이 YS-02-2번 공에 비해 그 속도가 더 크게 나타남을 알 수 있었다 (Table 3).

Table 2. Moment 해석법에 의한 결과

	평균농도이력시간(τ)	2차 중심모멘트(μ)
	T	T^2
YS-02-1 패커 사이부분	6.34	6.28
YS-02-1 상부패커 윗부분	7.34	6.39
YS-02-2 패커 사이부분	8.25	7.1
YS-02-2 하부패커 아랫부분	8.33	6.40

Table 3. Moment 해석법으로 구한 수리 파라미터

	평균 선형속도(v)	분산계수(D)
	L/T	L^2/T
YS-02-1 패커 사이부분	4.75×10^{-7}	9.5×10^{-8}
YS-02-1 상부패커 윗부분	4.10×10^{-7}	6.7×10^{-8}
YS-02-2 패커 사이부분	3.97×10^{-7}	5.2×10^{-8}
YS-02-2 하부패커 아랫부분	3.94×10^{-7}	4.7×10^{-8}

5. 결 론

연구지역에 분포하는 국지 단열대를 대상으로 수행한 추적자 시험 결과, 준해석해에 의한 분산도는 0.86~1.44m, 유효공극률은 2.36%~2.95%, 지하수의 유속은 $1.514 \times 10^{-7} \sim 5.79 \times 10^{-7}$ m/s의 범위를 보인다. 모멘트 해석법에 의한 분산계수는 $9.5 \times 10^{-8} \sim 9.5 \times 10^{-8}$ m²/day, 지하수의 속도는 $4.7 \times 10^{-8} \sim 9.5 \times 10^{-8}$ m/s 의 범위를 나타내어, 두 가지 해석법에 의한 결과는 1 order 내의 값을 갖는 것을 알 수 있었다. 이 값은 다중 패커를 이용한 펄스시험에서 얻어진 동일 시험구간 내 수리전도도값과 유사하며(K= $2.35 \sim 3.62 \times 10^{-10}$ m/s, 김경수b 외, 2002),

일반적인 화강암질 암반에서 고려되는 분산도 및 지하수의 수리전도도 값과 비슷한 양상을 보인다.

주입구간과 관측구간 간의 평균 농도이력시간(τ)은 6일에서 8일 정도임을 알 수 있었고, YS-02-2번 관측공의 패커 하부구간이 패커구간에 비해 비슷한 값(모멘트해석법)을 갖거나 더 높은 값(준해석해를 이용한 해석법)을 보인 결과는 조사과정에서 확인되지 않은 투수성 단열의 존재 혹은 암반 내에서의 이들의 상호 연결성에 의한 현상일 것으로 사료된다. 이는 또한 추적자로 사용된 해수의 밀도의존 현상으로 해석할 수도 있기 때문에 이 부분에서 더 많은 연구가 필요하다.

일반적으로 수리시험으로 추정된 단열간극이 추적자 시험의 결과에 의한 것보다 크게 나타나는 것으로 보고되어 왔다. 본 연구지역에서 BHTV를 이용하여 단열간극을 계산한 결과 해당 깊이에서 $4.08 \times 10^{-5} \sim 8.04 \times 10^{-3} \text{m}$ 크기의 단열이 존재하는 것을 밝혀졌으나(김경수a 외, 2002), 실제로 추적자시험 결과 주입공과 관측공 사이 흐르는 지하수의 유속에 의해 구해지는 평균체류시간(mean residence time)으로 단열간극의 크기를 계산해본 결과 $0.75 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 의 범위에 해당되어 현저한 차이를 나타내었다. 따라서, 본 연구지역의 암반에는 극히 적은 빈도의 작은 간극을 갖는 투수성 단열이 분포하는 것으로 사료된다.

참고문헌

- 김경수, 배대석, 김천수, 박병윤, 고용권, 2001, 고성 및 유성지역 중생대 화강암의 단열체계 분포 특성, KAERI/TR-1817/2001, 한국원자력연구소, 80p.
- 김경수a, 배대석, 김천수, 고용권, 김건영, 2002, 연구지역 암괴규모 단열체계 분포특성 해석, KAERI/TR-2191/2002, 한국원자력연구소, 144p.
- 김경수b, 김천수, 배대석, 2002, 등연속체매질로서의 화강암지역의 유효수리전도도 산출, 지질공학, 12권 3호, 319-332p.
- Abelin, H., Nerentnieks, I., Tunbrant, S. and Moreno, L., May 1985, Migration in a single fracture; Experimental results and evaluation, final report, Stripa project, Tech. Rep. 85-03, Swed. Nucl. Fuel and Waste Manange. Co(SKB), Stockholm.
- Bear, J., Tsang, C.F. and De Marsily, G., 1993, Flow and contaminant transport in fractured rock, Academic press, United Kingdom, 6-10p.
- Tsang, Y.W., 1992, Usage of "Equivalent Apertures" for rock fractures as derived from hydraulic and tracer tests, Water Resour. Res., 28(5), 1451-1455p.
- Yu, C., Warrick, A.W., and Conklin, M.H., 1999, A moment method for analyzing breakthrough curves of step inputs, Water Resour. Res., 35(11), 3567-3572p.

