

2001 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

국내산 화강암 자연균열을 통한 불균일 흐름장에서
비수착성 추적자들의 이동특성 분석

**Analysis of the Migration Characteristics of Tracers
in a Heterogeneous Flow Field through a Natural Fracture of a Domestic Granite**

금영섭, 박정균, 한필수

한국원자력연구소 고준위 처분연구팀

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

자연균열을 가진 국내산 화강암에서 추적자 이동실험을 하였다. 실험 대상암석 규모는 $100 \times 60 \times 40$ (cm)이고, 실험에는 자연균열내에서 이동특성을 살피기 위해 비수착성 고분자 유기염료인 Eosine과 NaLS, 그리고 음이온인 Bromide와 Chloride를 사용하였다. 추적자는 이동거리가 가장 긴 대각선 방향의 두 시추공을 골라 한쪽에서 띠함수(band input)로 주입하여 맞은편 균열면으로 이동하도록 하였다. 균열폭과 이동현상을 모사하기 위해 가변균열폭 국부통로모델(variable aperture channel model)과 입자추적법(particle tracking method)을 사용하였다. 암반균열내 균열폭이 일정치 않음에 따라 9개의 시추공을 통한 수리전도 실험후 국부통로 모델로 모사할 수 있었다. 추적자 이동해석 방법으로 도입한 입자추적법은 암반균열대와 같이 흐름장(Flow Field)이 불균일하고 복잡 다양한 양태를 뿔 때 오염물질 이동을 쉽게 모사 할 수 있었다. 실험자료와 전산모사치를 비교해본 결과, 추적자들이 가장 짧은 직선 이동 경로를 택하지 않고 흐름저항이 가장 작은 경로를 따라가는 국부통로(channeling flow) 이동 현상을 보였다.

Abstract

Tracers migration experiment was performed in a natural fracture of a domestic granite. The scale of rock fracture was $100 \times 60 \times 40$ (cm). In order to observe the migration characteristic, two kinds of nonsorbing tracers were used ;

as high molecular organic dyes, Eosine, and NaLS, and as anions, Bromide and Chloride. Tracers was injected in a borehole as a band function and collected at the opposite borehole. A

variable aperture channel model with particle tracking method was used to characterize the aperture width of the fracture and to simulate solute transport. The heterogeneous flow field was modeled by a variable aperture channel model after characterizing aperture distribution by hydraulic tests through boreholes. The particle tracking method applied effectively in simulating tracers transport through a heterogeneous flow field in the rock fracture. Simulated results show that tracers do not migrate through the shortest straight line between inlet and outlet, but migrate through the paths having lowest flow resistance. that is channeling flow.

1. 서론

방사성 폐기물의 처분이 전 세계적으로 활발한 연구의 대상이 되고 있다. 방사성 폐기물의 지중 처분의 안전성 평가와 관련하여 지중 조건하에서 여러 방사성 핵종의 화학적 거동을 규명하고 또한 가변적인 지중 조건에서 그 거동을 예측함이 중요하다. 방사성 폐기물 처분 안전성 평가에 있어서, 지하수 및 예상되는 처분장 조건에서 방사성 핵종과 지하매질과의 상호작용을 정확히 측정 규명하여 안전성 평가모델에 적용할 때 안전성 평가의 신뢰도는 더해지게 된다.

최근 암반 균열에서 핵종이동과 관련하여 수리분산, 매질내로의 확산, 수착등의 상대적 역할에 대한 실험적 평가가 중요한 문제로 부각되고 있다. 암반 매질은 투수도가 매우 낮아 지하수의 이동은 거의 일어나지 않는다고 보며 이들 매질이 포함하고 있는 불규칙한 균열들이 오염물질 이동의 주된 경로로서 제시되고 있다. 오염물질은 균열에서 이류와 분산으로 지하수를 따라가면서, 지하매질과 상호작용에 의해 균열표면에 수착하고 암반매질에 확산해 들어가 지하수에 비해 이동이 지연되게 된다.¹⁾

이러한 효과를 정량적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 이동실험과 이동 모델 평가를 수행하고, 이를 통해 자연균열 암반에서 비수착성 핵종의 이동실험을 통한 수리학적 특성을 평가하였다.

Canada의 AECL, 영국의 IAA, 일본의 JNC 등지에서 선도적으로 자연균열 암반에서 실험하였는데, 국내에서도 유사 실험장치를 구비해 국내 암반 균열에서도 이동 특성을 비교 평가 할 수 있게 되었다.^{2), 3), 4)}

먼저 실험용 암석 선정을 위해, 방사성 폐기물 심부 처분에 적합한 결정질 암반층을 우선 조사하여, 우리나라에 가장 많이 분포하고 있는 화강암을 선택하였다. 자연적인 균열을 그대로 유지한 채로 시료를 채취하기 위해 수십미터 규모의 줄톱을 사용해 암석을 크게 절단한 후 조심스럽게 가공했다. 채취된 1m 규모의 국내산 자연균열 암반 시료는 복합현상이 일어나는 자연조건을 상당부분 만족시키면서도 실험조건의 제어가 가능하다는 장점이 있다. 균열내 농도 분포 및 압력 분포를 컴퓨터와 연결해 실시간 측정할 수 있는 장비를 제작 설치하여 균열내 이동상황을 측정할 수 있게 하였다.

이렇게 준비된 자연균열 암반에서의 이동실험은 이동현상이 다공성매질과 다른 점에 주목하였으

며, 특히 국부통로 이동에 주목하였다. 수리분산도와 매질로의 확산을 평가하기 위해 비수착성 핵종으로 먼저 이동실험을 하였고, 이들 추적자들은 암반과 화학적으로 상호작용이 없어 지연효과 없이 물과 같은 속도로 이동할 것으로 예상된다.

2. 이동모델 개발(Transport modeling)

2.1 수리전도실험을 통한 균열폭 및 압력분포계산 (Hydraulic characterization of the flow field)

이 실험의 목적은 암석에 뚫은 9개의 시굴공을 통해 수리전도 실험을 하고, 이 실험 결과로부터 균열폭과 분포를 파악하는데 있다. 먼저 암석 균열폭의 분포는 9개의 시굴공에 대해 두 개의 시추공을 한 개조로 해서 한쪽에서 용액을 주입하고 다른 쪽으로 흘러나오게 할 때 걸리는 수두를 측정한다. 암반 균열내로 흐르는 유체가 정상상태(steady state)에 도달했을 때, 전달도(transmissivity) T는 다음 식으로 표현할 수 있다.⁵⁾

$$T = \frac{Q}{2\pi\Delta h} \ln \left[\frac{r_w}{2d} \right]$$

여기서 Q는 용액의 부피 이동속도로서 단위는 cm³/sec이고, Δh는 수두차로서 단위는 cm, r_w는 인입구와 출구의 반경으로 단위는 cm, 그리고 2d는 입구와 출구사이 거리이다. 그리고 균열포규와 전달도 T는 다음 관계식을 가진다.

$$b = \left[\frac{12\mu T}{\rho g} \right]^{\frac{1}{3}}$$

여기서 μ는 유체의 점성도로서 단위는 g/cm · sec이다. g는 중력가속도로서 단위는 cm/sec², ρ는 용액의 비중으로서 단위는 g/cm³이다.

가변균열국부통로모델(variable aperture channel model)을 사용하기 위해 균열내에서 지하수의 흐름이 주입속도와 배출속도가 일정하고 전체 흐름장에서 압력분포가 일정하다고 가정하면, 층류흐름(laminar flow)을 가질 때 흐르는 유량은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{1}{12\mu} \frac{b^3 W}{L} \Delta P$$

여기서 ΔP는 길이 L과 넓이 W인 암석 양쪽끝 사이 압력차이다. 실험 균열평면 전체로 마주보면 두면이 평면이 아니기 때문에 위 식을 적용할 수 없지만 일정크기로 나는 단위면에선 일정균열폭을 갖는다고 가정하면 위 식을 적용할 수 있다.

따라서 결절 i는 균열면내에서 i번째 단위면을 나타내는 지표라 할 때 i에서 j로 흐르는 부피유속을 Q_{ij}라 하면, 결절(node) i에서 j까지 압력차이는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P = P_i - P_j &= \frac{Q_{ij}}{\frac{2 b_i^3 \Delta y}{12 \mu \Delta x}} + \frac{Q_{ij}}{\frac{2 b_j^3 \Delta y}{12 \mu \Delta x}} \\ &= Q_{ij} \left[6 \mu \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{1}{b_i^3} + \frac{1}{b_j^3} \right) \right] \end{aligned}$$

여기서 Δx 와 Δy 는 단위면에서 x 와 y 축상의 거리이다. 위식을 부피유속에 관해 다시 정리하면 다음식과 같다.

$$Q_{ij} = C_{ij} (P_i - P_j)$$

여기서 C_{ij} 는 결절 i 와 j 사이의 흐름 전도도(flow conductance)로서 단위는 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}/\text{g}$ 이며 흐름 저항의 역수이다. 각 결절에서 다음과 같이 물질 수지식을 세우고 이를 계산하면 다음의 연립방정식을 구할 수 있다.

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j C_{ij} (P_i - P_j) = E_i$$

위식을 압력에 관한 식으로 다시 정리하면 다음과 같은 선형방정식을 얻는다

$$[S] [P] = [C]$$

여기서 $[S]$ 는 (288,288) 요소를 갖는 quint-diagonal matrix로서 이전에 구한 흐름 전도도 자료로부터 반복계산법(iterative numerical scheme)으로 최종값을 구한다. $[C]$ 는 순 유입량 또는 유출량으로서 경계조건 및 단위면에서 순유량을 결정할 수 있다. 이렇게 모든 결절에서 유속벡터를 구한다면 이 흐름장에서의 핵종을 모사할 수 있다.

수리 통계적인 계산과정을 간략히 요약하면, 먼저 균열 표면을 가상의 부분 사각형 면으로 임의 분할한다. 이 계산에서는 20*20으로 나누었다. 9개의 시추공 중에서도 두 개조를 한 개조로 해서 인입구와 출구를 잇는 선을 따라 걸치는 부분 사각형들에 측정값을 부여하여, 각 부분 사각형들에 걸리는 균열폭 값들을 각각 다 합하여 평균을 내면 그 지점에서의 균열폭 값으로 지정된다. 이렇게 계산된 결과를 SUFFER 프로그램을 사용해 그림 1에 실었다. 계산결과를 보면 균열폭은 0.08~0.25mm 크기에 주로 분포한다.

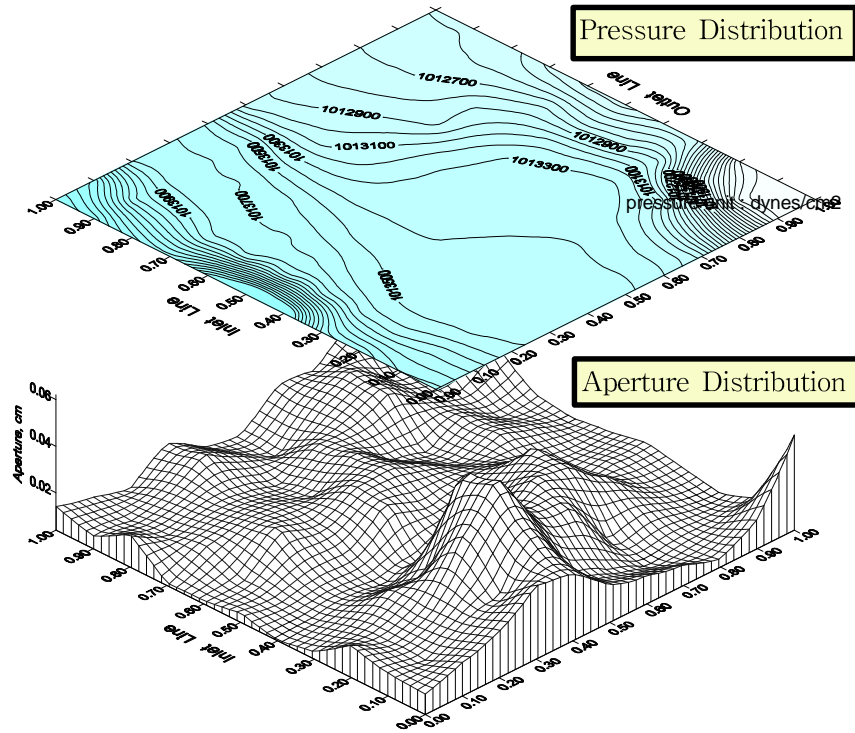


그림 1. 자연암반 균열 표면에서 균열 틈 및 압력분포

2.2 입자추적법(Particle tracking method)

핵종이동 모사 방법으로서 입자추적법(particle tracking method)이 있는데, 본 실험과 같이 이동경로가 복잡하고 이차원 이상의 이동경로를 가진 흐름장에서는 해석해의 적용이 어려울 뿐만 아니라 일반 FDM, FEM 등의 수치해석 방법들에서도 각 소구간에서 균열폭, 확산계수, 분산계수 등이 위치에 따라 변하기 때문에 이를 제대로 추적하기 위해서는 많은 양의 정보처리를 해야한다. 이럴 경우 입자추적법을 적용하면 이동궤적과 농도 분포등을 쉽게 파악할수 있지만, 입자추적법을 적용하기 위해서는 먼저 경계조건, 흐름장, 균열폭 분포등이 사전에 밝혀져야 한다.^(6), 7)

균열내에서 핵종의 이동은 임의의 입자들로 가정하면, 이 입자는 주어진 유체의 부피내에서 두가지 운동을 하며 이동한다. 하나는 평균흐름방향을 따라가는 운동이고, 다른 하나는 확률함수로 결정지워지는 불규칙 운동이다. 인입구에서 임의로 정한 개수의 입자를 투여하면 입자들은 각 방향의 흐름통로로 유속에 비례하는 확률과 같이 분포할 것이다. 비수착성 핵종의 경우 단위면에서 체류시간은 단위면의 부피와 흐름 총량과의 비를 평균값으로 하여 이동 메카니즘에 따라 분포를 갖는 것으로 생각하였다. 유출된 입자의 체류시간은 이 입자가 지나온 단위 균열면들에서 체류시간

을 모두 합하였다. 시간에 따라 출구로 빠져 나오는 입자들의 양을 계산하면 이것이 Elution curve가 되고, 임의의 정해진 시간에 균열내에 분포하고 있는 입자들의 분포를 파악하면 이것이 이동흐름이 된다.

3. 실험방법 및 결과

실험에 사용한 암석은 의정부산 덕정 화강암으로서 자연균열이 존재하는 암석을 현장에서 채취하여 100*60*40(cm)크기로 측면 가운데로 단일균열이 있도록 잘랐다. 이 암석을 다시 암석 가공기관으로 이송해 9개의 시추공을 정확히 균열면까지만 뚫고, 이중 두 개의 시추공을 선택해 용액을 흘려보내고 나머지 시추공에는 압력이나 농도를 측정할 수 있는 검출기를 부착하였다. 또 채취된 암석을 박편으로 만들어 편광 현미경 관찰을 통해 광물 감정과 광물 조성분석을 표1에, 화학적 조성은 표2에 나타내었다.

표 1. 실험 화강암의 광물 조성

광 물	시료 1	시료 2
석 영(Quartz)	46.8	41.6
사장석(Plagioclase))	24.2	26.6
K-장석(K-feldspar)	12.4	10.6
흑운모(Biotite)	12.8	16.6
각섬석(Hornblende)	2.2	2.0
스 핀(Sphene)	0.4	1.2
불투명 광물(Opaque)	1.2	1.4
계	100	100

표 2. 화강암의 화학적 조성

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO
%	72.4	14.4	0.79	0.88	0.24	0.47	1.19	3.55	5.03	0.04

표 1. 을 보면 이차광물이 소량 존재하므로 약간 풍화가 진행된 암석임을 알 수 있다. 이 암석을 전처리 하는 과정으로서 처음에 밀폐된 공간에 넣어 암석내에 존재하는 기체를 진공을 걸어 빼낸다. 그 후 다시 지하수로 암석을 포화시킨다. 암석내 존재하는 기체를 빼내는 이유는 만약 공극에

기체가 차 있을 경우, 기체가 암석이 물로 포화되는 것을 방해할 뿐 아니라 핵종이동 실험시 용액이 불포화된 암석내부로 침투하는 현상으로 인해 실험 해석상 오차를 유발할 수 있기 때문이다.

전체적인 실험 장치의 개괄도는 그림 2에 나타내었다. 또 핵종실험시 용액을 시추공을 통해 주입하면 균열대로 압력이 걸려 균열틈의 크기가 바뀔 염려가 있으므로, 이 영향을 제거하기 위해 암석외부에 4면 조임쇠를 설치하여 변형이 일어나는 것을 막았다. 또 외부 균열틈은 실리콘으로 밀폐시켜 외부로의 흐름을 차단하였다. 암석은 균열 상부에 9개의 시추공을 굴착하였으며, 각 시추공에는 압력 및 농도 측정 장비를 부착하여 컴퓨터를 통해 on-line data 측정 및 저장 시스템을 구축하였다.

실험에 사용한 용액은 암석을 채취한 지역의 지하수 성분과 유사한 조건을 갖추기 위해, 실험대상 화강암을 오랜시간동안 지하수와 접촉시켰다. 최종지하수 조성은 표3에 나타내었다. 이 지하수를 핵종이동 실험전에 계속 실험 암석에 주입하여 충분히 평형에 도달하도록 하였다. 용액주입은 미량펌프(HPLC Syringe Pump)로 하였다. 2번 시추공을 인입구로, 7번 시추공을 출구로 해서 0.2 ml/min의 유속으로 비수착성 추적자로 고분자 유기염료인 Eosine과 NaLS, 음이온인 Bromide와 Chloride를 Band input의 형태로 총 1.2ml 주입하였다. 유출구에는 Fraction collector를 연결하여 시료를 균일한 부피로 시간에 따라 채취하였다.

농도분석은 Eosine과 NaLS는 UV/Vis Spectrophotometer로 각각 524nm와 284nm에서 분석하였고, 음이온인 Bromide와 Chloride는 Orion Research Inc.의 Ionplus series의 Electrode를 사용해 분석하였다.

표 3. Composition of the synthetic groundwater

Species	Initial Conc.(mg/l)	Final Cons.(mg.l)
Na ⁺	57.8	57.4
K ⁺	0.07	1.63
Ca ²⁺	101	74.5
Mg ²⁺	0.025	0.226
Fe	0.0164	<0.01
Si	<0.04	1.4
Al	<0.1	0.179
F ⁻	<0.05	<0.05
Cl ⁻	182	187
NO ₃ ⁻	<0.16	<0.1
SO ₄ ²⁻	<0.1	0.28
Alk.(as CaCO ₃)	131	113
pH	8.3	8.0

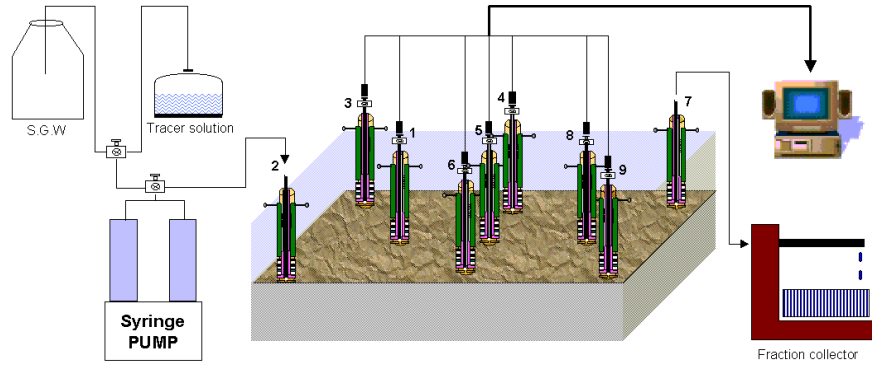


그림 2. Large Block Experimental set-up

압력측정은 Validyne pressure sensor UPC 601-L과 LVAT & variable reluctance sensor interface card를 사용해 PC 와 연결한 다음, 제어프로그램을 작성하여 측정결과를 PC 화면상에서 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다.

비수착성 추적자들의 자연균열 암반내에서의 물리화학적 특성과 그 거동이 어떤 양상을 보이는가 알아보기 위해 각 추적자들에 대해 Elution Curve와 Cumulative Curve를 그림 3과 그림4에 나타내었다

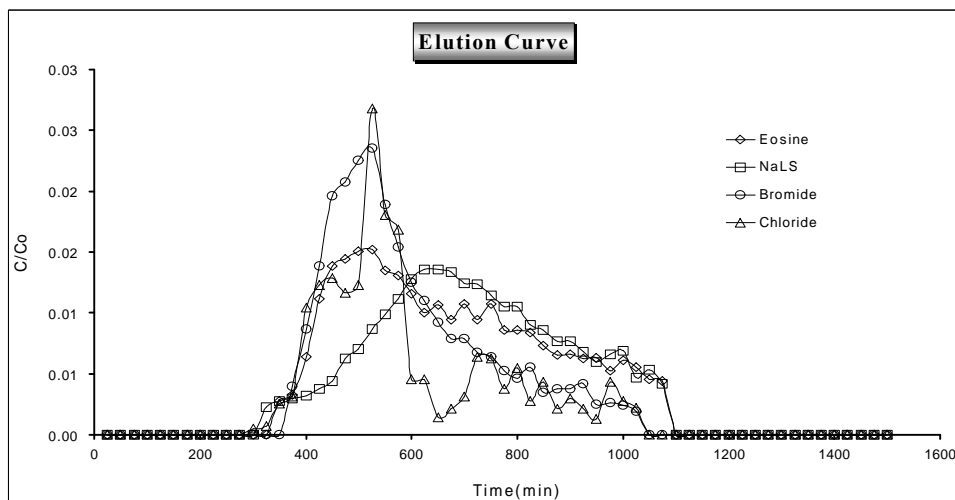


그림 3. 추적자들의 Elution Curve

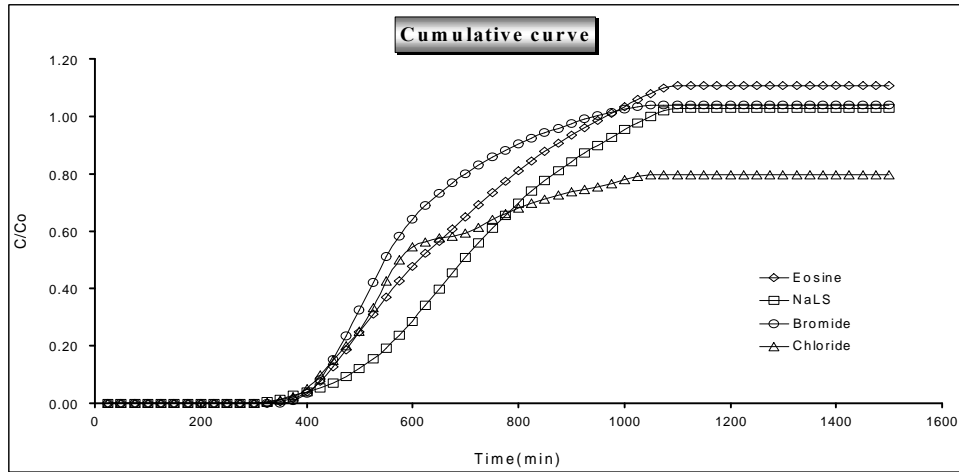


그림 4. 추적자들의 Cumulative curve

두 그림에서 보여준 실험결과에서 비수착성 유기염료인 Eosine과 NaLS는 μm 이하의 암반내 공극을 고분자 이온이 통과하질 못해 Elution curve의 도달시간이 빠르고, 곡선의 peak가 높은 점과 Cumulative curve의 초기시간에 기울기가 급경사를 나타내는 점으로 보아 암반매질 내로 확산이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다.

또 음이온인 Bromide와 Chloride는 암반매질의 이차광물 함유로 이차광물의 표면이 음전기를 띄어 외부에 있는 양이온과 결합해 전기적 중성을 이루려는 성질이 강하기 때문에 이로 인한 음이온 배제효과(anion exclusion)현상으로 확산효과를 거의 볼 수 없었다. 그리고 추적자들이 최고 peak 이후에도 잔여농도로 검출됨을 볼 수가 있는데 이는 암반내 균열폭이 불규칙하게 분포함에 따라 각 지점에서의 흐름저항이 다르게 나타나고, 유량은 균열폭의 삼승에 비례하므로, 추적자들은 흐름저항이 가장 적은 경로를 따라 이동하는 국부통로 이동현상을 보여, 균열내로의 이류와 분산이 계속해서 일어났음을 말해준다.

4. 결론

실험에 사용한 국내산 화강암 균열에서 균열폭은 평균 0.08mm~0.25mm 사이에 분포하였다. 이동 mechanism을 위한 자연암반균열에서 점형 입력(point source) - 점형 출력(point withdraw)형태의 이동실험 결과 해석에서 수리학적 분산은 국부통로 이동에 따른 통로간 이동속도차이가 주요인 이었다. 추적자들의 주된 흐름은 흐름저항이 가장 적은 국부통로 이동현상을 보였다. 매질내로의 확산은 상대적으로 일어날 기회가 적어 비수착성 추적자인 고분자 유기염료 Eosine과 NaLS, 음이온인 Bromide와 Chloride는 매질내 확산 역할에 큰 역할을 하지 못했다.

가변균열 국부통로 모델에서 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 것은 압력차이 등 다른 요인보다 가변 균열 틈에서 핵종이동의 통로인 균열 틈의 분포가 가장 결정적으로 작용하였다. 또 실험을 통한 추적자들이 이동 특성이 실제 상황에 대한 이동 모델의 타당성을 검증해 주었다.

5. 참고문헌

- 1) Abelin, H., Birgersson, L., Widen, H., Agren, T., Mreno, L., and Neretnieks, I., 1994. Channeling experiments in crystalline fractured rocks. J. Contam. Hydrol., 15 : 129
- 2) Cliff, K., Gilling, D., Jefferies, N. and Lineham, T., 1993. An experiment study of flow and transport in fractured slates. J. Contam. Hydrol., 13 : 73
- 3) Chung-Kyun Park, Tjalle T. Vandergraaf, Douglas J. Drew, Pil-Soo Hahn, "Analysis of the migration of nonsorbing tracers in a natural fracture in granite using a variable aperture channel model", J of Contam. Hydrology, Vol.26, 1997
- 4) L. Moreno, Tsang C.F., Hale, F.V. and Neretnieks, I. "Flow and tracer transport in a single fracture", Water Res. 24, 2033, (1998)
- 5) AERE-R-11287, Analysis of steady-state hydraulic tests in fractured rock, 1984
- 6) R. Yamashita and H. Kimura. "Particle-tracking technique for nuclide decay chain transport in fractured porous media", J. of Nuclear Sci. and Tech. 27, 1041, (1990)
- 7) Chung-Kyun Park, Tjalle T. Vandergraaf, Douglas J. Drew, Pil-Soo Hahn, "Interpretation of Migration of Radionuclides in a Rock Fracture using a Particle tracking method" J. of the Korean Nuclear Society. Vol. 27, No 2, April 1995
- 8) Chung-Kyun Park, Pil-Soo Hahn, "Interpretation of Migration of Line Source Contaminant through a Rock Fracture" Hwahak Konghak. Vol. 35, No4, August, 532, 1997
- 9) Tsang. T.W., C.F. Tsang, I.Neretnieks, and L.Moreno, "Flow and tracer trasport in fracture media-A variable-aperture channel model and its properties, Water Resour. Res., 24(12), 1988

- 10) Rasmuson, A., "Analysis of hydrodynamic dispersion in discrete fracture network using the method of moments", Water Resour. Res., 21, 1677, 1985
- 11) Tsang.Y.W., and C.F.Tsang channels model of flow through fractured media, Water Resour. Res., 23(3), 467-479, 1987
- 12) Tjalle T. Vandergraaf, Douglas J. Drew, Sumio Masuda, "Radionuclides migration experiments in a natural fracture in a quarried block of granite" J. of Cont. Hydrology 21, 153-164, 1996
- 13) Kohler,M., Curtis, G., Kent, D., and Davis, J., Experimental investigation and modeling of uranium transport under variable chemical conditions", Water Res. Res. 32: 3539, 1996