

암반균열내에서 선형흐름 오염물질의 이동해석

박정균[†] · 한필수

한국원자력연구소

(1997년 1월 22일 접수, 1997년 5월 28일 채택)

Interpretation of Migration of Line Source Contaminant through a Rock Fracture

Chung-Kyun Park[†] and Pil-Soo Hahn

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 22 January 1997; accepted 28 May 1997)

요 약

자연암반균열에서 오염물질 이동실험을 하였다. 실험은 크기가 $91.5 \times 86.5 \times 49(\text{cm})$ 이고 평균균열폭이 0.6 mm인 자연 암반균열에서 비수착성핵종인 우라늄과 수착성핵종인 세슘을 사용해 이동현상을 관찰하였다. 오염물질은 균열 한쪽면에서 계단함수로 주입하여 맞은 편 균열면으로 이동하도록 하였다. 유속은 20 ml/h, 선속도는 3.71 cm/h였다. 전체균열폭이 일정치 않음에 따라 오염물질은 흐름저항이 가장 작은 균열틈을 따라 이동하는 국부통로 이동현상을 보였다. 전체계에서 수리분산은 국부통로이동에 주로 기인한 것으로 나타났다. 오염물질은 지하수에 비해 매질에 수착, 매질로의 확산 등으로 이동이 지연되었다. 수착성핵종인 세슘의 경우 이동지연효과는 매질에 수착능이 결정적인 역할을 하였다. 유출곡선을 해석해를 사용해 모사한 결과 수착과 수리분산에 민감하게 반응하고 암반매질로의 확산도에는 큰 영향이 없었다.

Abstract—Experiment on contaminant transport in a natural rock fracture was carried out. The scale of rock fracture was $91.5 \times 86.5 \times 49(\text{cm})$. Mean of the aperture was 0.6 mm. Uranine and cesium were used as nonsorbing and sorbing tracer, respectively. Tracer was injected along the fracture line on one fracture side as a step function and collected at the opposite side. Volumetric flow rate was 20 ml/h and linear velocity was 3.71 cm/h. Channeling flow appeared dominantly due to heterogeneous aperture distribution. Channeling flow was the main source of hydraulic dispersion. Breakthrough curves were analyzed with an analytical solution. Sorption onto the fracture surface was the most important retarding mechanism in the contaminant migration. Simulated results did not respond sensitively to diffusion into the rock matrix at the flow rate of 20 ml/h.

Key words: Migration, Rock Fracture, Dispersion, Sorption, Diffusion, Retardation

1. 서 론

전세계적으로 산업화로 인한 오염물질의 증가로 생태환경에 대한 관심이 집중되고 있다. 이에 따라 오염물질의 처분방식에도 점점 더 완벽성을 요구하고 있다. 이전에 폐기물을 일정지역에 단순히 집적 하던 수준에서, 인공방벽을 보강하고 지하에 더 깊이 매설하는 단계에 와있다. 특히 방사성폐기물의 경우, 지하 수백미터 깊이의 암반층에 처분하는 방식으로 통일되고 있다. 그래서 암반층에서 오염물질 이동특성을 규명하는 것이 새로운 연구과제로 대두되고 있다.

암반에서 오염물질이동은 이론이 정립단계에 있는 다공성 매질의 경우와 다른점이 많다. Tsang, Moreno 등은 실험자료 분석을 토대로, 암반 매질을 다공성의 균질한 매질로 보기는 한계가 있다고 지적하였다[1, 2]. 암반 매질은 투수도가 매우 낮아 실제로 지하수의 이동이 거의 일어나지 않는 불투수층에 가깝고, 이들 매질은 균열을

불규칙하게 포함하고 있어, 지하수의 흐름은 이러한 균열을 통하여 주로 일어난다. 스웨덴에서 지하 360 m의 화강암반내에 시험 동굴을 굴착하여 추적자의 이동 현상을 관찰한 결과, 지하수의 흐름이 매우 편중되었다[3]. 즉 지하수의 흐름이 일어나는 면적은 약 30% 이었고, 그나마 대부분의 지하수는 약 2% 면적에서 집중적으로 흘렀다. 따라서 지하수의 흐름이나 핵종 이동이 암반 매질의 전영역을 통하여 일어난다고 보기 힘들다. 따라서 오염물질은 균열에서 이류와 분산 등으로 지하수를 따라가면서, 지하매질과 상호작용에 의해 균열표면에 수착하고 암반 매질로 확산해 들어가 지하수에 비해 이동이 지연되었다. Elikson은 균열이 있는 $\phi 4 \times 10 \text{ cm}$ 크기의 원통형 화강암에서 악티나이드핵종들의 이동실험을 하였다[4]. 이 실험에서 핵종들이 균열내에서 이동하면서 화학특성이 변하는 것을 추적하여 핵종들이 산화상태변화에 민감함을 보여주었다. Cliffe 등[5]은 1 m 크기의 점판암에서 비수착성핵종인 삼중수소의 이동현상을 관찰

하였다. 국부통로이동과 분산이 중요하게 관찰되었으며 매질내로의 확산은 이 시스템에서 큰 역할을 못했다. Park[6, 7], Vandergraaf[8, 9] 등은 1 m 규모의 자연균열을 가진 화강암에서 수착성 및 비수착성 핵종들을 점형입력(point source)-점형출력(point withdraw) 형태로 이동실험을 하였다. 전반적으로 금속양이온들은 암석에 강하게 수착되고 암반매질로의 확산도 큰 역할을 하였다.

이 연구에서는 이동실험 및 모델 평가를 통해 최근 암반균열에서 핵종이동과 관련하여 중요한 문제로 부각되고 있는 수리분산, 매질 내로의 확산, 수착 등의 상대적 역할에 대한 실험적 평가를 다루려고 한다. 특히, 이전의 Park[6, 7]과 Vandergraaf[8, 9]가 실행한 점형입출력시 이동특성과 관련하여 선형입출력(line in-out)시 이동특성과 두 시스템과의 차이점 분석에 주력하고자 한다.

2. 오염물질 이동모델

이 시스템에 도입한 이동모델은 Gureghian이 1990년도에 개발한 이차원 해석모델인 FRACFLO를 실험시스템에 맞게 고쳐 일차원적으로 해석한 것이다[10]. 이 시스템은 일정 균열폭을 가진 단일균열을 가정하고 수착과 매질내로 무한 확산을 고려하였다.

물질수지식은 암반균열에서

$$R \frac{\partial A}{\partial t} - D_L \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + u \frac{\partial A}{\partial x} + \lambda RA + \frac{J}{b} = 0 \quad (1)$$

암석매질에서

$$R' \frac{\partial B}{\partial t} - D_p \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \lambda R' B' = 0 \quad (2)$$

매질내로의 확산속도는 Fick's law를 따른다고 가정한다.

$$J = -D_e \left. \frac{\partial B}{\partial z} \right|_{z=b} \quad (3)$$

균열내에서 수리분산은

$$D_L = a_L u + \tau D_w \quad (4)$$

지연인자(retardation factor, R)는 물의 속도와 오염물질의 이동속도간의 비를 나타내는데, 균열내와 암반내에서 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$R = u_w / u_n = 1 + K_f / b \quad (5)$$

$$R' = 1 + [(1 - \phi) / \phi] \rho_s K_d \quad (6)$$

여기서 K_f 는 표면적기준 분배계수, K_d 는 매질무게기준 분배계수이다. 즉,

$$K_f = \frac{q_f}{A} = \frac{\text{암석단위표면적당 핵종수착량}}{\text{수용액 농도}} \left[\frac{\text{g/cm}^2}{\text{g/cm}^3} = \text{cm} \right]$$

Table 2. Chemical composition of the granite

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

Table 3. Composition of the synthetic groundwater

Species	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	Si	Al	F ⁻
mg/l	57.4	1.63	74.5	0.226	<0.01	1.4	0.179	<0.05
Species	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	Alkalinity (as CaCO ₃)			
mg/l	187	<0.1	0.28	8.0	113			

$$K_d = \frac{q}{A} = \frac{\text{암석단위무게당 핵종수착량}}{\text{수용액 농도}} \left[\frac{\text{g/g}}{\text{g/cm}^3} = \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \right]$$

초기조건은 다음과 같다.

$$A(x, 0) = 0, \quad 0 < x < \infty \quad (7)$$

$$B(x, z, 0) = 0, \quad x > 0, z \geq b \quad (8)$$

균열면에서 경계조건은 다음과 같다.

$$A(0, t) = A(t) U(t), \quad t > 0 \quad (9)$$

$$A(\infty, t) = 0, \quad t > 0 \quad (10)$$

암반매질내에서 경계조건은

$$B(x, b, t) = A(x, t), \quad x > 0 \quad (11)$$

$$B(x, \infty, t) = 0, \quad t > 0 \quad (12)$$

띠모양유입(band release)일 때

$$A(0, y, t) = A(t) [U(t) - U(t - T)], \quad t > 0 \quad (13)$$

띠모양유입시 해석하는 가상점기법(superposition technique)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다[11, 12].

$$A(x, y, t) = [A(x, t; A^0) - A(x, t - T; A^0 e^{-\lambda T})] U(t - T) \quad (14)$$

$$B(x, z, t) = [B(x, t; B^0) - B(x, t - T; B^0 e^{-\lambda T})] U(t - T) \quad (15)$$

3. 암반균열내 핵종이동 실험

3-1. 암석 및 전처리

실험에 사용한 암석은 화강암으로서 크기가 91.5×86.5×49(cm)이며 가운데로 단일균열이 있도록 잘랐다. 암석의 공극률은 0.002, 밀도는 2.65 g/ml이다. 실험화강암의 광물 및 화학조성을 Table 1 및 2에 실었다. 이동실험전에 전처리 과정으로 밀폐된 공간에서 감압하여 암석내 기체를 뽑아내었다. 그후 다시 암석을 지하수로 포화시켰다. 실험에 사용한 지하수는 암석을 채취한 지점의 지하수 주요성분 조성을 모사해 실험실에서 합성한 것이다. 인공지하수의 조성을 Table 3에 실었다. 이동실험시 암석겉면은 증발을 막기 위해 실리콘고무로 얇은 막을 만들었다.

3-2. 오염물질 이동 실험

Fig. 1에 자연균열을 가진 실험암석 및 이동 실험 설비개요를 나타

Table 1. Mineralogical composition of the granite

Component	Quartz	Corundum	Zircon	Orthoclase	Albite	Anorthite
%	28.5	1.6	0.03	28.3	32.32	4.61
Component	Magnetite	Apatite	Calcite	Biotite	Sphene	
%	0.84	0.09	0.2	2.94	0.5	

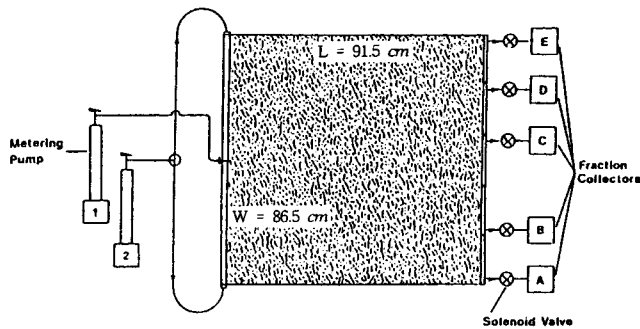


Fig. 1. Schematic view of the experimental setup.

내었다. 균열 한쪽면에 균열면을 따라 HPLC pump로 용액 주입장치를 만들어 지하수를 20 ml/h 속도로 흘려보냈다. 유출면은 Fig. 1에서와 같이 다섯 등분하여 각각에서 시간에 따라 시료를 채취하였다. 시료는 1 ml씩 분급기(fraction collector)로 채취하였다. 1차로 비수착성핵종으로 유기염료인 우라닌(Na-fluorescein)을 2×10^{-5} mol/l 농도로 주입하여 이동현상을 관찰하였다. 다음단계로 수착성핵종인 세슘(Cs)을 사용했는데, 추적자로서 방사성핵종인 Cs-137을 사용함과 동시에 이동시간을 줄이고 비선형수착의 영향도 파악하기 위해, 비방사성 세슘을 1000 mg/l의 농도로 같이 주입하였다. 비방사성 세슘의 농도가 높아질수록 분배계수값이 감소하므로 이동속도를 빠르게 할 수 있다. Cs-137의 방사선세기는 1.2×10^6 Bq/였다. 우라닌 농도분석은 UV/VIS spectrophotometer로 파장 488 nm의 세기를 분석하였다. Cs-137 시료의 방사선세기는 Ge(Li)검출기를 사용하였다.

3-3. 회분식 수착실험

이동 실험 자료해석에 필요한 기초자료를 확보하기 위해 회분식 수착실험을 따로 하였다. 수착실험은 두 가지를 하였는데, 먼저 암석균열표면에서 수착능을 파악하기 위해 암석박편을 만들어 암석표면에서 세슘의 수착실험을 하였다. 또 암석매질에서 수착능을 파악하기 위해 암석을 분쇄하여 다음과 같은 방법으로 수착실험을 하였다[13].

Polypropylene 용기에 암석시료를 일정량 넣고 여기에 추적자를 함유한 지하수 용액을 넣어 수착시킨다. 일정시간이 지난후 용액을 채취하여 용액상의 추적자 농도변화를 계산해 암석에 수착한 핵종의 양을 계산한다. 수착량을 평가하기 위한 매개변수로 앞에서 정의한 분배계수를 사용하였다. 시료형태에 따라 표면적기준인 K_d 와 무게기준인 K_d 를 병용하였다.

시간에 따라 측정한 세슘의 표면적기준 분배계수(K_d)값을 Table 4에 실었다. 분쇄암석에 비해 암석박편은 용질과 접촉면적이 적고 용질이 공극을 통해 매질내부로 확산해 들어가는데 기하학적 저항이 크므로 장시간이 소요되었다. Park 등[6, 13]이 수행한 수착반응 속도 실험에서 세슘은 수시간내에 암석외부표면에 수착하고 이후에는 매질내부로 확산이 속도결정단계로 작용하는 느린 수착과정을 나타내었다. 그러므로 Table 4에서 접촉시간 1일 이후 K_d 값의 증가는 매질내 확산이 속도결정단계로 작용하는 과정으로 해석할 수 있다. 이때 계산한 세슘의 확산계수는 1.8×10^{-3} cm²/h이었다. 반면, 무게기준 분배계수(K_d) 값은 접촉면적이 넓고 접촉저항이 적어 1일 이후에는 큰 변화가 없었다. $K_d=0.34$ ml/g을 얻었다.

Table 4. Distribution coefficients of cesium with time

Time(days)	0.1	0.3	1.0	3.0	10.0	30.0	100.0
K_d (cm)	0.01	0.02	0.03	0.06	0.09	0.18	0.38

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 비수착성핵종의 수리학적 이동특성

암반균열에서 오염물질이동이 다공성매질에서와 다른 점, 특히 국부통로이동(channeling flow)에 주목하였다. 즉 핵종이 주입면에서 유출면까지 직선 경로를 따라 이동하는지에 1차적인 관심을 두었다. 이 실험에서는 지하수이동에서 흐름저항에 가장 큰 역할을 하는 암반내부 균열폭분포를 알지 못하기 때문에, 전체 균열에서 물질이동 과정을 정확히 추적할 수 없다. 그래서, 임의로 전체 암반균열을 유출구들을 중심으로 다섯 부분으로 나누어, 각 부분에서 독립적으로 이동이 일어난다고 가정하고, 각 통로에서 핵종이동을 일차원적으로 평가해 보았다[12].

편의상 용액 인입면에서 다섯 출구까지 서로 독립적으로 흐른다고 가정하면, 각 통로의 평균균열폭을 다음 방법으로 계산할 수 있다.

각 이동통로에서 물질수지식은,

$$L(W/N) 2b_i/t_i = Q/N \quad (16)$$

여기서, 균열길이 $L=91.5$ cm, 균열가로길이 $W=86.5$ cm, 시료채취 지점개수 $N=5$, 유속 $Q=20$ cm³/h 이다.

윗식을 균열폭에 대해 정리하면

각 통로의 균열폭,

$$2b_i = (Q/LW) t_i \quad (17)$$

전체 균열폭,

$$2b_o = (Q/LW) t_o \quad (18)$$

각 통로균열내 부피는,

$$V_i = L(W/N) 2b_i \quad (19)$$

전체균열내 부피는

$$V_o = \Sigma(V_i) \quad (20)$$

전체 균열폭을 다시 정리하면,

$$2b_o = V_o/(LW) \quad (21)$$

균열내 선속도는

$$u = Q/W 2b_o \quad (22)$$

여기서, t_i 는 계단식 유입일 때 유출곡선의 정규농도가 0.5에 도달하

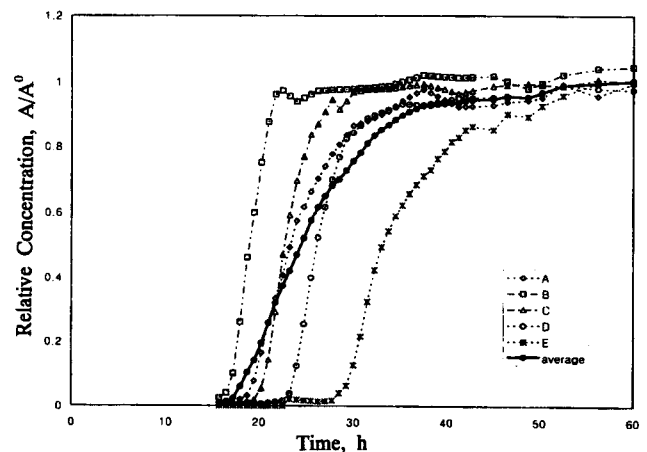


Fig. 2. Breakthrough curves of uranine for five sampling locations.

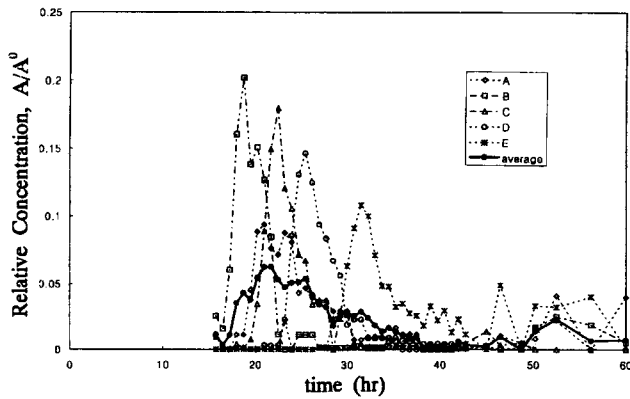


Fig. 3. Differentiated elution curves of uranine for five sampling locations.

는 시간으로 정했다. 맥동(pulse) 주입시에는 주된 유출곡선이 정점에 도달하는 시간이다.

Fig. 2에 다섯 개 통로별로 계단함수(step function)를 주입해서 나타나는 파과곡선(breakthrough curve)을 나타내었다. 각 통로별로 이동속도에 차이가 나타났다. 이를 좀더 명확히 파악하기 위해, 이 곡선들을 시간에 따라 미분하여 Fig. 3에 도함수곡선으로 나타내었다. 이곡선의 물리적 의미는 맥동주입(pulse input)시 나타나는 유출곡선의 형태다. 다섯 개 유출곡선을 살펴보면 각 선마다 다중정점(multi-peak)이 나타났는데, 이는 암반균열내 균열폭이 일정치 않고 불규칙하게 분포하여 핵종이 일차원적으로 유입구에서 유출구를 따라 직선형태로 흐르지 못하고 각 지점에서 흐름저항이 가장 적은 통로를 따라 이동해 국부통로이동(channeling flow)의 형태를 나타내는 것으로 해석된다. 만약 암반균열내 흐름을 평행한 두 평판사이의 흐름으로 가정한다면, Hagen-Poiseuille 식에서 (23)식을 유도할 수 있는데, 이 식에서 보듯이 유량은 균열폭의 삼승에 비례해 변하므로, 지하수는 흐름저항이 가장 작은 쪽을 따라가는데 그 중에서 균열폭이 가장 민감한 변수임을 알 수 있다.

$$Q = \frac{1}{12\mu} \frac{b^3 W}{L} \Delta P \quad (23)$$

또, 각 유출구에서 주 유출곡선이 나타나는 시간이 다른데 이 또한 암반균열 전체적으로 국부이동통로들이 존재해 균열폭, 이동저항, 이동속도 등이 서로 다름을 의미한다. (16)에서 (20)까지 식을 사용해, 각 통로별로 균열폭을 계산해 보면 각각, 0.580, 0.475, 0.570, 0.655, 0.835 mm가 된다. 이를 평균해 보면 실험암석의 평균 균열폭은 0.623 mm이 된다. 계산결과를 Table 5에 실었다. 또 균열내 총 부피 V 는 493 cm^3 , 선속도 u 는 3.71 cm/h 이다. 또, 역으로 인입면에서 출구까지 $L=91.5 \text{ cm}$ 를 선속도 3.71 cm/h 로 직선으로 이동하면 통과하는데 약 25시간 소요된다. 그러므로, Fig. 3에서 25시간 이후에도 계속 피크가 나타나는 것은 흐름이 직선상을 흐르지 못한 것이

Table 5. Estimated values of the parameters

Migration path	Retention time of uranine(hr)	Retention time of cesium(hr)	Aperture (mm)	Retardation factor
A	23	62	0.58	2.73
B	18.8	67.5	0.475	3.6
C	22.5	74	0.57	3.3
D	25.9	62	0.655	2.4
E	33	85	0.835	2.6
AVERAGE	22.3	73	0.623	3.27

상당 비율 있음을 나타낸다.

4.2. 수리학적 분산도 측정

분산도는 유출곡선의 모양을 결정하는 중요한 매개변수다. 이를 측정하기 위해서는 다른 영향을 없애거나 최소한으로 만들어야 한다. 횡방향분산은 일차원 흐름을 만들거나, 본 실험과 같은 이차원 흐름에서는 균열 한쪽면 전체에 추적자를 주입해 선형입력(line source) 형태로 만들어 그 영향을 최소화하였다. 또 매질내로의 확산영향을 줄이기 위해, 이동속도를 빠르게 하고 우라닌같은 분자량이 큰 물질을 추적자로 선정하였다. 이 실험에서는 내부 균열폭분포를 알지 못하기 때문에, 우선적으로 전체 균열에서 물질이동을 평균해 일차원적으로 평가하였다[11]. 우라닌의 파과곡선들을 시간별로 평균한 곡선과 이 시스템을 일차원으로 해석한 수리분산 해석해인 식 (14), (15)를 사용해 모사한 결과를 비교해 Fig. 4에 실었다. Fig. 4의 실험자료를 가장 잘 만족하는 것은 수리분산이 지배적인 경우로 우라닌의 측방향 분산도(a_x)가 3 cm 일 때 실험자료와 가장 잘 일치하였다. 이 분산의 주요 원인은 Fig. 2 및 3에서 보듯이 균열내 각 지점에서 이동통로별로 나타나는 이동속도의 차이때문으로 파악된다. 즉 국부통로 이동에 기인한 이동통로간 이동속도 차이가 분산으로 나타난 것이다.

4.3. 매질내로의 확산

암석매질 자체가 핵종을 가두는 큰 저장매체 역할을 할 수 있으므로 핵종특성별로 매질로의 확산도를 평가하는 것이 필요하다. 암반의 크기가 91.5×86.5×49(cm^3)이고, 평균균열폭이 0.6 mm 이므로 균열 총 부피는 약 500 cm^3 로 볼 수 있다. 실험암반의 공극률이 0.002, 암반 총 부피가 388,000 cm^3 이므로, 암반내 지하수가 쉽게 침투할 수 있는 연결된 공극부피는 770 cm^3 로 볼 수 있다. 그러므로 1차적으로 약 770 cm^3 부피의 공극으로 핵종들이 확산해 들어갈 수 있다. 이동 실험에서는 매질로의 확산영향을 줄이기 위해, 분자량이 큰 우라닌을 사용하고 유속도 20 ml/h 로 빠르게 했으므로 확산영향을 파악하기 어렵다. 그래서 유속을 5 ml/h 로 느리게 추가실험을 하여 매질내 확산이 일어날 가능성을 높인 다음, 유출곡선을 비교하였다. 5 ml/h 시 유출곡선은 통로 A와 D의 유출순서가 바뀐 것외에는 20 ml/h 때와 차이가 거의 없었다. Park 등[6, 14]이 같은 종류의 암석에서 비수착성핵종인 트리튬(THO)을 3 ml/h 유속으로 점형 입출력했을 때 공극확산은 $3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{h}$ 였다. 우라닌의 경우 분자량이 376으로 일반 양이온에 비해 크고 매질내로의 확산이 일어나기에는 5 ml/h 의 속도가 너무 빠른 것으로 추정된다. 별도로 관통확산 실험방법으로 측정한 우라닌의 확산계수값은 $1.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{h}$ 이었다. Fig. 4와 같이 이

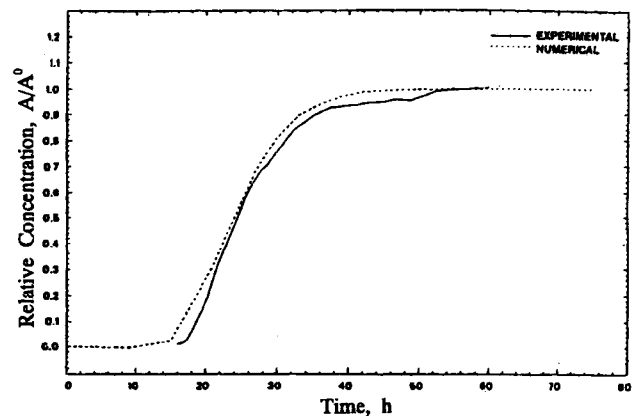


Fig. 4. Comparison of the uranine breakthrough curves between the experimental and the calculated.

동모델로 확산계수값을 0에서 $3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{h}$ 까지 채용해 실험조건에서 파과곡선을 모사해 보면 확산계수값에 따른 차이가 거의 없다. 우라늄의 이동이 확산계수값의 크기에 영향을 받지 않는 것은 다른 이동 메커니즘이 지배적이어서 확산이 큰 기여를 하지 못하는 것으로 해석된다.

한편, 세습의 경우, 세습의 확산계수값을 0에서 $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{h}$ 까지 증가시켜 가면서 계산하면, Fig. 6과 같은 도함수 유출곡선에서는 peak 크기가 감소하고 꼬리부분이 늘어지며, Fig. 7에 파과곡선에서는 상대농도가 1.0에 도달하는 시간이 늘어났다. 그러므로 세습의 경우, 매질내로의 확산이 이동에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 매질내 확산값이는 균열내 세습의 농도가 일정하다고 가정할 경우, 다음 식으로 표현된다[15].

$$\frac{A}{A^0} = \text{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_t}} \right]$$

이동 실험후, 암석을 균열면을 따라 절개한 후 매질내 확산깊이를 측정된 결과 분석가능한 농도범위인 10^2 Bq/l 범위는 1 cm 이내였다. 이 농도는 원액의 10^{-4} 수준이다.

4.4. 수착성핵종의 이동특성

비수착성핵종을 사용한 수리학적 특성평가가 끝난 후, 수착성핵종인 Cs-137을 사용해 이동 실험을 수행해 핵종과 암반표면과 상호작용을 평가하였다. Fig. 5는 수착성핵종인 Cs-137의 다섯 개 출구에서 파과곡선을 나타낸 것이다. 우라늄과 마찬가지로 이동통로에 따

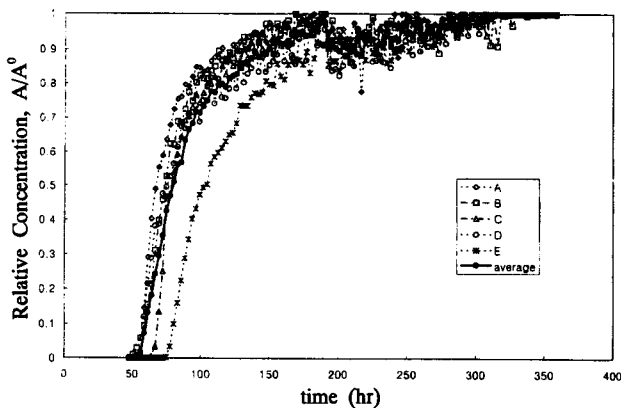


Fig. 5. Breakthrough curves of Cs-137 for five sampling locations.

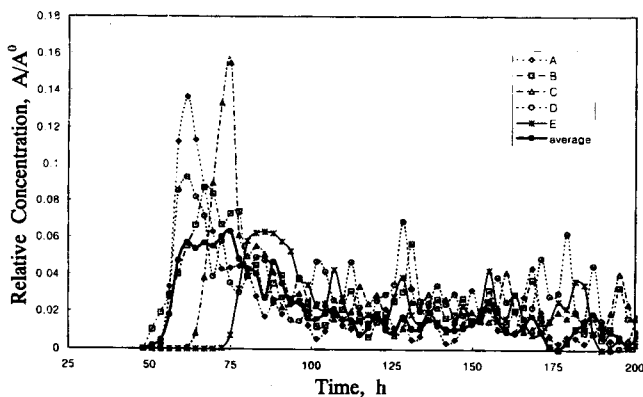


Fig. 6. Differentiated elution curves of Cs-137 for five sampling locations.

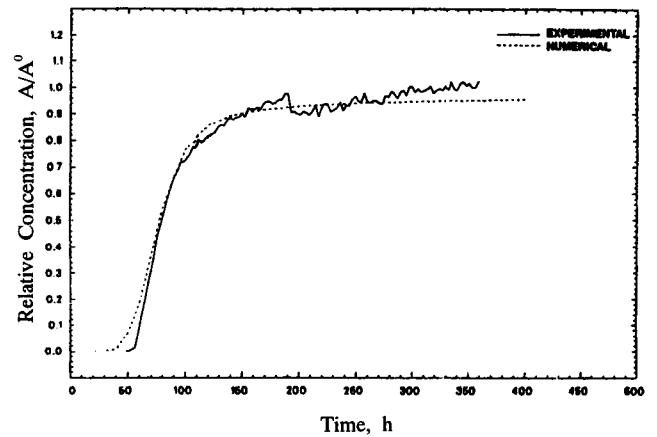


Fig. 7. Comparison of the Cs-137 breakthrough curves between the experimental and the calculated.

라 체류시간의 차이가 많이 났다. 이는 균열폭이 전체 균열면을 통해 일정치 않음을 다시 한 번 확인해 준다. Fig. 6은 우라늄과 마찬가지로 시간별로 파과곡선을 미분해 도함수곡선을 나타낸 것이다. 각 통로별로 이동속도 지연효과를 평가해 보기 위해, Fig. 5와 6에서 다섯 개 유출통로별로 주 peak가 나타나는 시간을 기준으로 우라늄과 세습의 체류시간의 비를 계산하였다. 그 결과를 Table 5에 실었다. 식 (4)와 (5)를 사용해 계산한 각 통로별 지연인자값은 2.4에서 3.6사이에 분포하였다. 각 유출곡선별로 차이가 나는 것은 핵종들이 각 지점별로 구성광물 차이로 인한 상호작용 차이로 지연효과가 서로 틀리기 때문으로 여겨진다. 즉, 화강암은 복합광물로 구성되어 있고 그 중 세습을 강하게 수착하는 운모(mica) 같은 광물이 균열내에 편중되어 존재하기 때문으로 여겨진다[9, 14]. 유출곡선 평균에서 계산한 지연인자값 3.27을 가지고 식 (5)를 이용해 분배계수(K_d) 값을 계산해 보면 0.072 cm가 된다. 이는 Table 4에서 약 3일간 암석과 세습을 접촉시켰을 때 K_d 값 0.06 cm와 비슷한 값이다. 세습의 균열내 평균체류시간이 약 3일이므로 이 계산은 상당히 합리적인 결과이다. Fig. 7는 Cs-137의 다섯군데 유출곡선들을 우라늄과 같은 이유로 평균한 곡선과 식 (14), (15)를 사용해 모사한 결과를 비교한 것이다. 기초실험과 유출곡선에서 계산한 $a_c=3 \text{ cm}$, $K_d=0.06 \text{ cm}$, $K_d=0.34 \text{ ml/g}$, $D_p=1.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{h}$ 를 사용했을 때 유출곡선과 상당히 접근하였다.

5. 결 론

자연암반균열에서 오염물질이 선형입력-선형출력 형태로 이동할 때, 균열폭이 불규칙하게 분포함에 따라 각 지점에서 흐름저항이 다르게 나타나고, 유량은 균열폭의 삼승에 비례해 변화하므로, 오염물질은 흐름저항이 가장 적은 경로를 따라 이동하는 국부통로 이동현상을 보였다. 유출곡선에서 수리분산 및 다중정점(multi-peak)은 국부통로이동에 따른 통로간 이동속도 차이가 주 요인이었다. 오염물질은 매질과 상호작용으로 지하수에 비해 이동이 지연되었다. 수착성핵종인 세습의 경우 이동지연효과는 매질에 수착능이 결정적인 역할을 하였다. 특히, 선택적으로 수착하는 광물이 균열표면에 편중되어 존재함에 따라 각 지점에서 다른 지연효과를 나타내었다. 제시한 1차원적 해석해로 균열내 전체적인 평균이동양상을 기술할 수 있었다. 비수착성인 우라늄의 경우, 이 시스템에서 유속이 5 ml/h 이상이면 이류 및 분산이 지배적으로 작용하고, 매질로의 확산은 유출곡선에 큰 영향을 미치지 못했다. 세습의 경우에는 유속이 20 ml/h에서도 수착으로 인한 체류시간이 길어 매질내로의 확산이 상당량 일어

남을 확인하였다.

사용기호

A	: concentration of the species in the fracture [g/cm ³]
A ⁰	: concentration of the species at time equals zero [g/cm ³]
a _l	: longitudinal dispersivity [cm]
B	: concentration of the species in the rock matrix [g/cm ³]
2b	: thickness of the fracture [cm]
D _e	: effective diffusivity [cm ² /sec]
D _p	: pore diffusivity [cm ² /sec]
D _w	: molecular diffusion of contaminant in water [cm ² /sec]
D _t	: hydrodynamic dispersion coefficient [cm ² /sec]
J	: diffusive rate of contaminant at surface of fracture [g/cm ² sec]
K _f	: surface distribution coefficient in the fracture [cm]
K _w	: distribution coefficient in the rock matrix [cm ³ /g]
R	: retardation factor in the fracture
u	: average groundwater velocity in the fracture [cm/sec]
U(t)	: unit function

그리스 문자

λ	: first order rate constant for decay [1/sec]
ρ_r	: rock density [g/cm ³]
ϕ	: rock porosity
τ	: tortuosity of the fracture

참고문헌

1. Tsang, Y. W., Tsang, T. S., Neretnieks, I. and Moreno, L.: *Water Resour. Res.*, **24**(12), 2049(1988).
2. Moreno, L. and Neretnieks, I.: *J. of Contaminant Hydrology*, **13**, 49(1993).
3. NEA: the International INTRAVAL Project to Study Validation of Geosphere Transport Models for Performance Assessment, NEA, OECD, 1993.
4. Eriksen, T.: *Nuclear Technology*, **70**, 261(1985).
5. Cliffe, K., Gilling, D., Jefferies, N. and Lineham, T.: *J. of Contaminant Hydrology*, **13**, 73(1993).
6. Park, C. K., Hahn, P. S. and Vandergraaf, T. T.: *J. of Contaminant Hydrology*, **17**(in Press) (1997).
7. Park, C. K., Keum, D. K. and Hahn, P. S.: *Korean J. of Chem. Eng.*, **12**, 428(1995).
8. Vandergraaf, T. T., Park, C. K. and Drew, D.: Proceedings of the 5th International High Level Radioactive Waste Management Conference, ASCE, Las Vegas, May(1994).
9. Vandergraaf, T. T., Park, C. K. and Drew, D.: Radionuclide Migration Experiments in a Natural Fracture in Granite: a joint KAERI/NEMAC-AECL WL project, 1994.
10. Gureghian, A. B.: BMI/OWTD-5, 1990.
11. Foglia, M., Iwamoto, M., Harada, P., Chambre and Pigford, T.: UCB-NE-3335, Univ. of Cal. *ANS Transactions*, **33**, 384(1979).
12. Gureghian, A. B., Noronha, C. J. and Vandergraaf, T. T.: Large Block Migration Experiments INTRAVAL Phase 1, Test Case 9. BMI/OWTD-7, 1990.
13. Park, C. K., Woo, S. I., Tanaka, T. and Kamiyama, H.: *J. of Nucl. Sci. & Tech.*, **29**, 1184(1992).
14. Park, C. K., Park, H. W. and Woo S. I.: *J. of Nucl. Sci. & Tech.*, **29**, 786(1992).
15. Crank, J.: "The Mathematics of Diffusion", 2nd ed., Clarendon Press, Oxford(1975).