

## 암반균열폭 분포 모사를 위한 수학적 방법론 개발

박정균, 한필수  
한국원자력연구소

요 약

지하암반층에 처분한 방사성핵종들의 이동방식을 이해하기 위한 방법의 일환으로 다차원 불균일장에 대한 모사기법에 대해 다루었다. 이차원 암반균일평면을 설정하고 균일틈 값이 공간적으로 다양한 형태를 가질 때 지하수가 흐르는 유형과 핵종들이 이동하는 특성을 이해하기 위해, 공간적으로 다양하게 변해가는 균일틈을 가진 암반층을 모사한 다음, 여기서 지하수와 방사성핵종들의 흐름특성을 파악하고 물질 이동에 영향을 미치는 중요한 수리학적 매개변수들에 대해 논의하였다. 암반 균열폭 값은 추계적 방식으로 설정한 확률밀도분포와 공간상호간섭길이를 함수로 하여 통계적방식으로 계산하였다. 각 매개변수들의 값의 차이에 따라 달라지는 분포상태변화를 그림으로 표현하여 설명하였다.

### 1. 서 론

지하에 처분된 방사성핵종들이 지하수에 용해되어 지하수흐름을 타고 지하매질속을 이동해 가는 것을 기술하기 위해 많은 모델들이 개발되었고 현재도 개발중이다. 특히 암반층에 처분했을 때에는 주된 흐름이 암반균열층을 따라 형성되므로, 지하수나 오염물질 이동을 기술하기 위해서는 암반내 균일대 분포를 파악하는 작업이 우선 되어야 한다. 지하암반에 존재하는 균일은 서로 복잡하게 그물처럼 얽혀있고 분포가 대체로 일정치 않다. 따라서 지하수나 핵종들은 전체 암석을 균일하게 통과하지 않고 국부적으로 편중된 경로만을 통과할 가능성이 크다. 이런 균일틈의 다양성을 고려한 첫 국부통로모델을 Neretnieks나 Moreno[1]등이 개발하였다. 이 모델에서 핵종들은 다른 균일틈을 가진 평행한 경로다발을 이동하는 것으로 표현하였다. Tsang[2]은 이 개념을 확장해서 각 이동경로들을 따라 균일폭이 변하는 것으로 간주한 가변균열폭통로모델을 제시했다. 가변균열폭통로모델에서 관건은 실제 균일폭의 크기와 분포를 제대로 모델에 반영할 수 있는가에 달려있다.

다차원의 불균일 장에 대한 모사기법으로 nearest neighbor method, matrix decomposition method는 특정한 불연속점들로 장을 표시한다. 정체성을 간주하면 이 모델들에서는 두 점간에 장의 공분산(covariance)을 보존한다. 행렬분해법은 대칭이고 음이아닌 행렬을 더 낮은 삼각행렬로 분해하는 방법이다. 불균일장은 불균일지점에서 뿐만 아니라 관심영역 어떤 지점에서도 특성치를 구할 수 있다면 유용하다. spectral method, turning-band method등은 이 목적을 위해 개발되었다.

이 논문에서는 이차원 암반균일평면을 설정하고 균일틈 값이 공간적으로 다양한 형태를 가질 때 지하수가 흐르는 유형과 핵종들이 이동하는 특성을 이해하기 위해, 위에 언급한 방법을 사용해, 공간적으로 다양하게 변해가는 균일틈을 가진 암반층을 모사한 다음, 여기서 지하수와 방사성핵종들의 흐름특성을 파악하고 물질이동에 영향을 미치는 중요한 수리학적 매개변수들에 대해 논의할 예정이다.

### 2. 암반균열틈분포모델 및 수학적 생성

암반층에서 지하수와 핵종들의 이동을 기술하는 데에는 균일층의 분포와 균일 상하면 사이의 균일틈이 중요하다. 균일표면은 공간적으로 거칠고 균일틈의 기복이 심하다. 균일표면에서 균일틈의 변화를 수학적으로 표현하면 공간상관길이보다 작은 거리안에서 균일틈 값들은 서로 관련성이 있지만, 상관거리보다 더 먼 곳에서 균일틈 값들은 서로 상관관계가 없다는 뜻이다. 가변균열틈분포의 수학적 모형을 만들기 위해 균일평면을 작은 평면으로 나누고 각 평면에 다른 균일틈값을 지리통계적 방법(geostatistical method)으로 생성해 대입한다. 이 연구에서는 균일평면을 20 x 20으로 나누고 균일틈은 로그정규분포(lognormal distribution)를 갖고, 균일틈은 공간공분산함수(special covariance)로서

지수함수를 설정하였다. 로그정규분포로 균일틈 값(Y)을 설정하기 위해 행렬분해법(matrix decomposition method)을 사용하였다.

$$Y = L \varepsilon + v \quad (1)$$

여기서,  $v$ 은 Y의 평균이다.  $\varepsilon$ 는 평균이 0이고 표준편차가 1인 벡터 N [0,1]의 값이고, L 은 다음의 공분산행렬(covariant matrix)로 정의된다.

$$A = LL^T \quad (2)$$

공분산함수로서 다음의 지수함수를 사용하였다.

$$A = \sigma^2 \exp(-ar) \quad (3)$$

여기서  $\sigma^2$ 는 Y의 분산(variance)이고, r는 이웃한 두 지점간의 거리이며,  $\sigma^2$ 는 거리의 역수의 차원을 갖는 자동상관(autocorrelation) 매개변수이다. (3)식의 지수형태는  $2/a$  범위의 거리내에 있는 양을 나타내며, 서로 상호연관되어 있으므로 상관길이( $\lambda$ )는  $2/a$ 로 나타낼 수 있다. (3)식은 선택한 공분산함수가 등방성임을 나타낸다. 뒷 식으로 생성한 균일면을 그림1,2에 실었다. 사용한 입력자료들은 표 1에 실었다. 이들 그림에서 상관길이와 편차가 바뀔때에는 전반적인 균일표면의 형상과 유체이동경로는 일정하게 유지되도록 하였지만, 초기시작점 숫자가 다를때에는 표면형상과 이동경로가 다양하다.

### 3. 암반균열에서 지하수흐름과 해중이동

앞에서 생성한 암반균열에서 지하수가 흐를 때를 상정해 보자. 지하수의 진입점 및 배출구는 임의로 선정하여 인입구는 (0.71, 0.79), 배출구는 (0.11, 0.11)로 설정하였다. 평행한 균열상하면을 따라 흐르는 유량은 절점(node) i에서 j로 흐르는 유속을  $Q_{ij}$  라하면, 다음식으로 표시할 수 있다.

$$Q_{ij} = (P_i - P_j) / R_{ij} \quad (4)$$

여기서  $P_i$ 는 절점 i에서 압력이며,  $R_{ij}$ 는 절점 i와 j 사이의 흐름저항이다. 그래서 각 절점에서 물질수지식은 다음식으로 쓸 수 있다.

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j (P_i - P_j) / R_{ij} = E_i \quad (5)$$

여기서  $E_i$ 는 절점 i에서 주입량 또는 추출량이다. j는 절점 i에서 이웃한 네 면을 나타낸다. 각 절점에서 압력은 미지수이며 뒷식을 사용해 반복수치해법으로 구한다. 계산한 압력분포를 그림3에 실었다. 압력은 지하수 인입구에서 가장 높고, 배출구에서 가장 낮으며 대기압과 같은 수준이다. 또, 균일틈이 큰 곳에서 압력차가 적고 균일틈이 적은 곳에서는 압력차가 큰 것으로 나타났다. 이는 식에서 균일틈이 클수록 흐름저항이 적어지므로 압력이 적게 걸림을 나타낸다. 이웃한 두 지점에서 지하수흐름은 식(4)로 구한다. 계산한 지하수 유속벡터 분포를 그림4에 나타내었다. 지하수는 인입구에서 출발해 배출구까지 연결하는 직선형 이동을 하지 않고, 균일폭이 큰 경로를 따라 주된 흐름이 형성됨을 보여준다. 이는 앞에서 설명한 것과 같이 균일폭이 큰 곳에서는 흐름저항이 작아지고 흐름저항이 작은 곳으로 흐름이 몰리기 때문이다.

가변균일폭통로와 같이 흐름장이 불균일할 때, 물질이동을 쉽게 표현하는 방법으로 입자추적법을 사용할 수 있다. 균일내에서 방사성핵종의 이동은 임의의 입자들로 가정하였다. 주어진 유체의 부피내에서 방사성핵종의 무개를 나타내는 이 입자는 주어진 유체의 부피내에서 두가지 형태의 운동을 하며 이동한다. 하나는 평균흐름방향을 따라가는 운동이고, 다른 하나는 확률함수로 결정지워지는 불규칙운동이다. 인입구에서 임의로 정한 개수의 입자를 투여하면 입자들은 각 방향의 흐름통로로 유속에 비례하는 확률과 같이 분포할 것이다. 입자들은 출구에 도달할때까지 절점에서 절점으로 단계적으로 이동한다고 가정한다. 비수착성핵종의 경우 단위면에서 체류시간은 단위면의 부피와 흐름총량과의 비로써 결정하였다. 유출된 입자의 체류시간은 이 입자가 지나온 단위균일면들에서 체류시간을 모두 합하였다. 시간에 따라 출구로 빠져나오는 입자들의 양을 계산하면 이것이 유출곡선이 되고, 임의의 정해진 시간에 균일내에 분포하고 있는 입자들의 분포를 파악하면 이것이 이동궤적(migration plum)이 된다.

### 4. 이동관련 매개변수들에 대한 수리역학적 평가

각 모사경우에 대한 이동특성들을 상호 비교해보기 위해 평균체류시간  $t_m$  과 수리분산도  $\sigma_t^2$  를 비교하였다. 평균체류시간과 분산은 피콜렛수( $P_e$ )를 결정하는데 사용할 수 있으며,  $P_e$ 는 수리분산도를 나타내는 무차원의 측정자이다.

$$2 / P_e = \sigma_t^2 / t_m^2 \quad (6)$$

여기서  $t_m$  은 평균체류시간이고,  $\sigma_t^2$  는 수리분산도를 측정하기 위한 이차적률(second moment)이다.  $C(t)$  를 시간  $t$ 에서 핵종의 균일내 농도라 하고 이상적인 맥동이 주입되었다면, 정규화한 유출곡선의 농도곡선은 다음식을 만족한다.

$$C_\theta = \frac{2}{\sqrt{\pi P_e}} \exp\left[-P_e \frac{(1-\theta)^2}{4}\right] \quad (7)$$

여기서  $\theta$  는 무차원시간으로서  $\theta = t/t_m$  이다. 비록 시험예들이 이상적인 흐름계를 반영하고 있지 않지만, 각 경우에 대해 수리역학적 매개변수값들을 비교해 봄으로써 유용한 정보를 얻을 수 있다.

## 5 이동궤적(Migration Plume)과 유출곡선

유출곡선은 인입구에 들어가서 출구로 나오는 모든 입자들을 유출시간에 따라 갯수를 관찰한 것인데, 비록 입출구는 같지만 균일내 이동경로는 대부분 서로 다르다. 평균체류시간은 전체 입자의 체류시간을 평균한 것이다. 그림5는 표1에서 집합1의 경우에 유출곡선의 양태를 보여주는 것인데, 곡선이 형성되는 초기시간에 대부분의 입자들이 저항이 적은 빠른 경로로 이동해 곡선 기울기가 급격히 상승한다. 그리고 균일내부에 복잡한 이동경로를 가지며 움직인 입자들이 느리게 빠져나와 긴 곡선의 꼬리를 형성한다. 유출곡선에서 다중정점을 관찰할 수 있는데 이는 균일내에서 여러갈래로 국부동로이동이 일어났음을 암시한다.

암반층에서 핵종이동을 기술하는 데에는 앞에서 보았듯이 암반균일의 분포 또는 균일폭의 분포가 가장 중요하고 기본적인 인자이므로 균일폭 분포를 결정짓는 매개변수들중 상대적인 중요성을 평가하는 것이 필요하다. 균일분포함수에 관한 매개변수들의 민감도는 유체흐름과 핵종이동을 균일폭 특성을 변화시켜가면서 관찰하였다. 도입한 특성은 (1) 균일침투도함수에서 로그정규분포상 표준편차  $\sigma$ , (2) 균일틈의 공간상관길이  $\lambda$ , (3) 이동경로 등의 세가지이다.

각 경우들을 비교하기 위한 척도로서 선택한 흐름특성변수들은 평균체류시간  $t_m$  과 수리분산도  $\sigma_t^2$  (또는  $P_e$ )이다.  $P_e$  는 유출곡선에서 식(7)을 사용해 계산하였다. 극단적으로 긴 꼬리로 인한 영향을 배제하기 위해 90%이상의 입자들이 유출곡선을 빠져 나왔을 경우에는 더 이상 꼬리부분을 감안하지 않았다. 또한, 정확한 매개변수들의 값을 구하는 것보다 각 경우들의 상대적인 값의 비교에 목적이 있으므로 긴 꼬리부분을 제외하더라도 큰 영향이 없다. 계산한 매개변수들의 값을 표1에 실었다.

## 6. 결과 평가

불균일한 균일틈을 가진 지하매질에서 지하수의 흐름과 핵종이동은 인입구와 출구사이를 가로지르는 가장 짧은 경로를 택하지 않고, 흐름저항이 가장 적은 부분을 찾아가는 국부동로 이동양상을 보였다. 핵종의 대부분은 흐름저항이 적은 빠른 이동경로를 따라 가지만, 일부는 균일내에서 우회이동하여 유출곡선에서 긴 꼬리부분을 형성한다. 가변균일틈에서 핵종이동에 관계되는 매개변수들의 민감도를 분석한 결과, 핵종이동동로인 균일틈의 분포가 가장 결정적으로 작용하며, 이 균일틈 분포로 그 평장은 매개변수중 상관길이가 가장 민감한 것으로 나타났다. 상관길이가 증가하면 핵종의 체류시간과 수리분산효과가 감소했다. 만약 상관길이가 아주 작다면 다공성매질에서 이동모델을 적용할 수 있을 것이다. 균일틈분포의 표준편차가 다음으로 중요한 역할을 하였다. 모든 기하학적 매개변수들을 일정하게 유지시킨 가운데 이동경로만 바뀌었을 때에는 유출형태에 별반 차이를 주지 않았다.

## 참 고 문 헌

1. Dagan, G., Models of groundwater flow in statistically homogeneous porous formations, Water Resour. Res., 15(1), 47-63, 1979.
2. El-Kadi.A.I. Model variability in groundwater flow, international groundwater modelling center, GWM184-10, Holcomb Research Institute, Butler Univ. (1984)
3. Mantoglou,A. and Wilson,J.L. , The turning band method for simulation of random fields using line generation by a spectral method, Water Res. Res., 18, 1379 (1982)

4. Nash, J.C., Compact numerical method for computers ; linear algebra and function minimization, John Wiley and Sons, New Yorkm 1979
5. Tsang. T.W., C.F. Tsang, I.Neretnieks, and L.Moreno, Flow and tracer transport in fracture media - A variable-aperture channel model and its properties, Water Resour. Res., 24
6. Vandergraaf, T.T., Park,C.K., and Drew,D.J., Migration of conservative and poorly sorbing tracers in granite fractures, Proceedings of 5th IHRWM, 1994.
7. R. Yamashita and H. Kimura, Particle-tracking technique for nuclide decay chain transport in fractured porous media, J. of Nucl. Sci. and Tech. 27, 1041, (1990).
8. L. Moreno and I. Neretnieks, Flow and nuclide transport in fractured media, J. of Contaminant Hydrology, 13, 49, (1993).

표 4.1 균일폭분포함수 및 수리학적 매개변수들의 값

집합번호	시험번호	$\nu$	$R_0$	$\sigma$	$\lambda$	$t_m$	$\sigma_t^2$	$P_e$
집합1: 경로변화	1	1	1	0.6	0.5	48	5.71	0.35
	6	1	2	0.6	0.5	56	1.75	1.14
	7	1	3	0.6	0.5	60	3.17	0.63
집합2: $\sigma$ 변화	4	1	1	0.1	0.5	25	0.77	2.6
	5	1	1	0.3	0.5	30	1.43	1.4
	1	1	1	0.6	0.5	48	5.71	0.35
집합3: $\lambda$ 변화	2	1	1	0.6	0.1	98	200	0.01
	3	1	1	0.6	0.25	60	11.1	0.18
	1	1	1	0.6	0.5	48	5.71	0.35

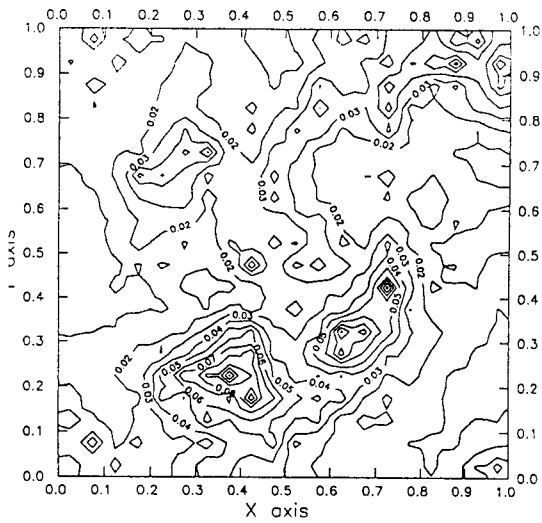
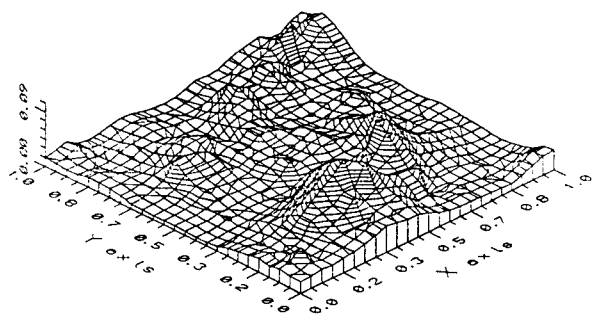


그림 1 시험번호1의 경우 균열표면에서 균열폭의 등고선형 분포  
 $\sigma = 0.6, \lambda = 0.5, R_0 = 1$



(a) 시험번호1:  $\sigma = 0.6, \lambda = 0.5, R_0 = 1$

그림 2 매개변수 차이에 따른 균열폭의 분포에 대한 입면도

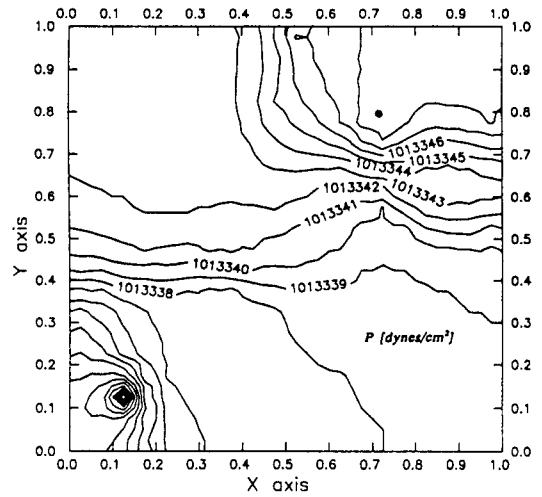


그림 3 시험번호1의 경우 균열표면에서 압력의 분포

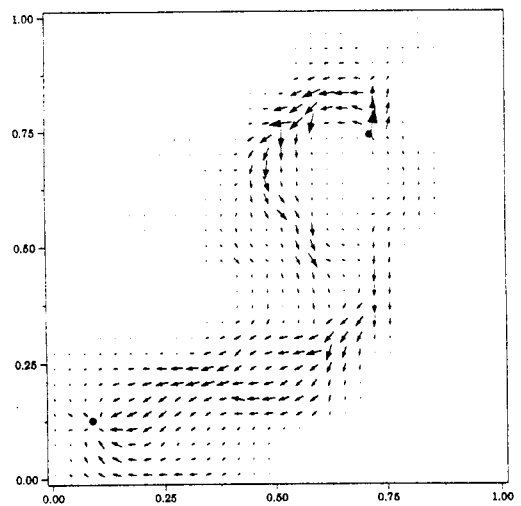


그림 4 시험번호1의 경우 균열표면에서 지하수 흐름방향 및 경로

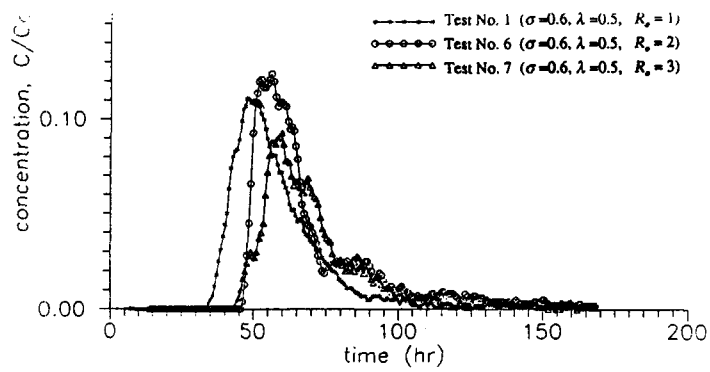


그림 5 수학적 관계는 같고 흐름경로가 다를 때 유출곡선의 차이

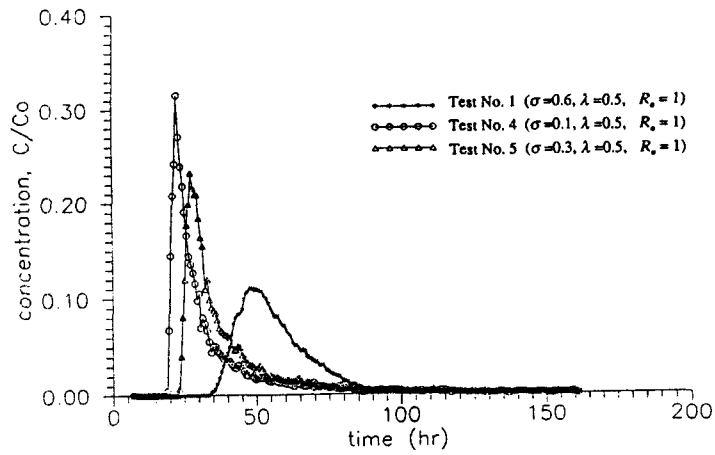


그림 6 균열폭의 표준편차 변화에 따른 유출곡선의 차이  
 $\sigma = 0.1, 0.3, 0.6$

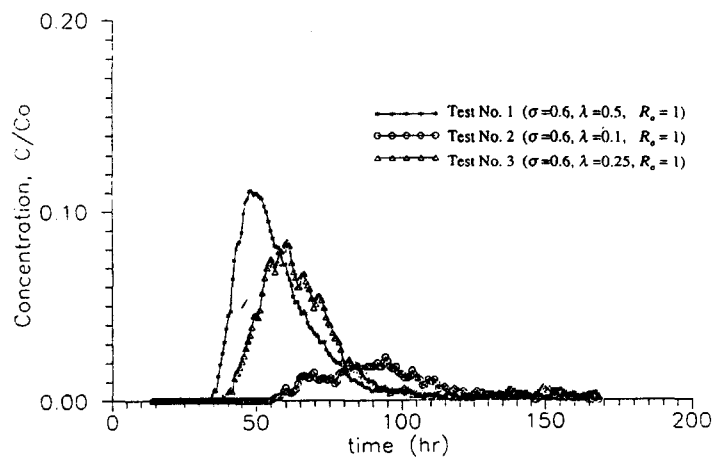


그림 7 균열폭 상관길이 변화에 따른 유출곡선의 차이  
 $\lambda = 0.1, 0.25, 0.5$