

인공균열암반을 통한 비수착성 추적자의 이동 특성 평가

Estimation of Migration Characteristics of
a Nonsorbing tracer through an Artificial Rock Fracture

류보현, 박정균, 한필수

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

크기가 50x20x5(cm)인 인공균열암반에서 비수착성 추적자의 이동 특성을 관찰하였다. 추적자로는 유기성 염료인 에오신을 사용하여 맥동 입력의 형태로 주입하였다. 균열면은 이차원 형태를 가지며, 점형 입력-점형 출력 형태로 이동 실험을 하였다. 유속은 0.5ml/min으로 유지하였다. 이동현상을 digital camera로 촬영해서 직접적으로 관찰하고 이동모델과 비교 평가하였다.

Abstract

Experiment on the transport of a nonsorbing tracer in an artificial rock fracture was carried out. The scale of an artificial rock was 50x20x5cm. The migration field was assumed as a two dimensional system. Eosine, a kind of an organic dye, was used as a nonsorbing tracer. This tracer was injected as a pulse function in a point source and point withdraw system. Volumetric flow rate was 0.5ml/min. The migration plume of the tracer was captured by a digital camera and compared with a result from transport modeling.

1. 서 론

원자력발전을 하는 많은 나라에서 방사성폐기물을 지하 수 백 미터 깊이의 암반 층에 처분하는 방안이 간구 되고 있다. 따라서 암반층에서 오염물질 이동특성을 규명하는 것이 중요한 연구과제로서 대두되고 있다. 암반 매질은 투수도가 매우 낮아 지하수의 이동은 거의 일어나지 않는다고 보며 이들 매질이 포함하고 있는 불규칙한 균열들이 오염

물질 이동의 주된 경로로서 제시되고 있다. 오염물질은 균열에서 이류와 분산으로 지하수를 따라가면서, 지하매질과 상호작용에 의해 균열표면에 수착하고 암반매질에 확산해 들어가 지하수에 비해 이동이 지연된다. 이런 효과를 정량적으로 평가하기 위한 일환으로 이번 실험을 진행하였다.

이 연구에서는 이동실험 및 모델 평가를 통한 암반균열에서 오염물질이동과 관련하여 중요한 문제로 대두되고 있는 수리분산, 매질 내로의 확산, 수착 등에 대한 상대적 평가와 국부이동흐름을 추적, 평가하기 위한 실험의 일부로서 비수착성 추적자를 점형 입력(point source)-점형 출력(point withdraw)형태로 주입하여 이동현상을 관찰하였다. 특히 중점을 두고 새롭게 시도한 부분은 균열 내 흐름을 육안으로 관찰하고 카메라로 영상을 촬영하여 실험결과와 부합 여부를 평가해 본 점이다.

2. 오염물질 이동모델

일정 균열 폭을 가진 이차원 암반 균열시스템에서 오염물질이동을 기술하기 위해, 암반균열표면에 x, y좌표를 설정하고 각 좌표를 임의 갯수로 나누었을 때, 부분 사각형 i에서 j로 흐르는 유량은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{ij} = (P_i - P_j) / R_{ij} \quad (1)$$

여기서, Q_{ij} : 부분사각형 i에서 j로 흐르는 유량

P_i : 부분사각형 i에서 압력

P_j : 부분사각형 j에서 압력

R_{ij} : 부분사각형 ij사이의 흐름 저항

$$R_{ij} = 12 \mu \frac{\Delta x}{\Delta y} \frac{1}{b^3} \quad (2)$$

$\Delta x, \Delta y$: 단위 사각형에서 x와 y축 상의 길이

μ : 지하수의 점도

b : 균열 틈 값

부분균열면 i에서 이웃한 4가지 방향을 모두 고려한 흐름식은 아래와 같다.

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j (P_i - P_j) / R_{ij} = E_i \quad (3)$$

여기서 E_i : 부분사각형 i에서 주입량 또는 추출량이며 j는 i에서 이웃한 네 면을 가리킨다.

물질이동을 모사하기 위해 입자 추적법을 사용하였다. 균열 내에서 추적자들을 임의의

입자들로 가정했다. 주어진 유체의 부피 내에서 추적자의 무게를 나타내는 이 입자는 2가지 형태의 운동을 하며 이동한다. 하나는 평균흐름방향을 따라가는 운동이고, 다른 하나는 수리학적 분산을 나타내는 확률함수로 결정 지워지는 불규칙운동이다. 인입구에서 임의로 정한 갯수의 입자를 투여하면, 입자들은 각각 방향의 흐름통로로 유속에 비례하는 확률과 같이 분포한다. 입자들은 출구에 도달할 때까지 이 운동규칙을 따라 이동한다고 가정한다.

비수착성 추적자의 경우 단위면에서 평균 체류시간은 단위면의 부피와 흐름총량과의 비로써 결정하였다. 유출된 입자의 체류 시간은 이 입자가 지나온 단위균열 면에서 체류시간을 모두 합하였다. 시간에 따라 출구로 빠져 나오는 입자들의 양을 계산하면 이것이 유출곡선이 되고, 임의의 정해진 시간에 균열내에 분포하고 있는 입자들의 분포를 파악하면 이것이 이동 궤적이다.

3. 암반 균열 내 비수착성 추적자 이동 실험

3-1. 암석 및 전처리

실험에 사용한 암석은 크기가 50x20x5(cm)인 황등 화강암이며 암석의 공극률은 0.0031이며, 밀도는 2.945g/ml이다. 암석윗면에 아크릴 판을 설치하여, 아래 암석면과 위 아크릴 판 사이로 오염물질이 통과하도록 하고 윗면에서 이동과정을 관찰할 수 있도록 하였다. 실험 장치를 항온조에 담아 20℃로 유지시키고 계속 실험용 지하수를 주입하여 암석이 물에 포화되도록 하였다. 아크릴 판과 화강암의 맞닿은 외부틈은 실리콘으로 밀폐시켰다.



Fig.1. View of the experimental setup of 50 x 20 x 5(cm) scale

3-2. 비수착성 추적자 이동실험

비수착성 추적자인 에오신을 맥동형태로 2cc주입하였다. 인입구를 따라 HPLC용 펌프로 지하수를 0.5ml/min속도로 흘려보내고, 이동현상을 디지털 카메라로 포착하여 관찰

하였다. 출구에 분급기(fraction collector)를 연결하여 1ml씩 채취하였다. 에오신 농도 분석은 UV/VIS spectrophotometer 로 파장 524nm에서 세기를 분석하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 비수착성 추적자의 이동 경로

붉은 색을 띠는 에오신 이동경로를 육안으로 관찰한 결과 추적자는 인입구와 출구를 직선으로 잇는 가장 짧은 단거리 코스를 선택하지 않았다. 한편, 이동모델로 모사한 균열내 압력분포를 Fig.2에 나타내었다. 입구와 출구간 압력차이는 대략 12000 dyne/cm^2 이었다. 이는 또한 이동모델로 모사해 Fig.3에 나타낸 유속벡터분포와도 잘 조화되는 결과이다. 즉, 물질은 균열내 흐름장에서 흐름저항이 가장 작은 경로를 택해 주로 이동이 이루어짐을 나타냈다. 이 시스템에서는 주로 양쪽 균열 가장자리 쪽이 흐름 저항이 작은 부분이다. 이 사실은 또한 Fig.3에 모사한 이동궤적(stream trace)과도 일치한다.

이웃한 두 지점의 유속 벡터 분포를 Fig.3에 나타냈으며 이동궤적(stream trace)을 그래픽 프로그램인 tecplot을 이용해 함께 도시하였다.

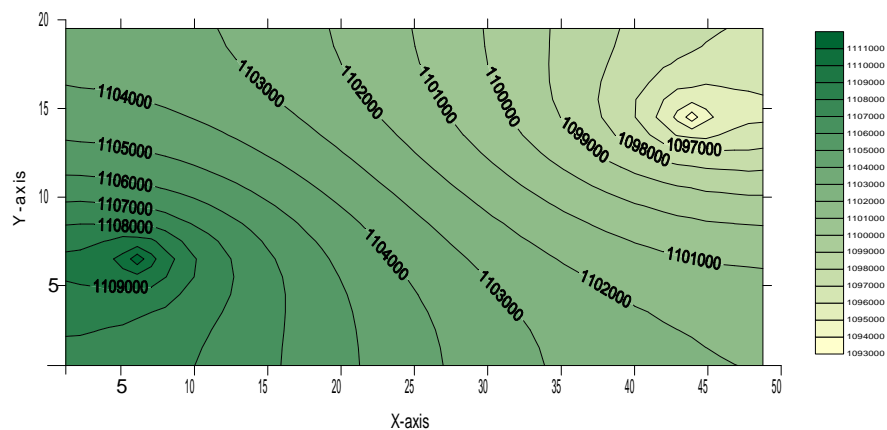


Fig.2 Calculated pressure distribution
(pressure unit :[dyne/cm^2])



(a) Migration plume of the eosine
(time=2min 39sec)



(b) Migration plume of the eosine
(time =3min 6sec)



(c) Migration plume of the eosine
(time =12min 10sec)

Fig.5.

전체 균열폭과 선속도를 식(4)로부터 유도된 식(5),(6)을 이용해서 구했다.

전체 균열폭은,

$$b = (Q/LW) t_0 \quad (5)$$

균열내 선속도는,

$$u = Q / (W \cdot b) \quad (6)$$

Fig.4에서 보면 유출곡선이 정점에 도달하는 시간은 약 12 min인 것으로 나타났으며 식(5)에 대입하여 계산해 본 결과 전체 균열 폭은 0.06mm이었다. 이 균열 폭을 식(6)에 대입한 결과 선속도(linear velocity)는 4.167cm/min이었다. 입구와 출구를 잇는 직선

경로를 추적자가 이동한다면, 그 직선거리 53.852cm를 이동하는 데 걸리는 시간은 약 9.58min이다. 하지만 유출곡선을 보더라도 정점이 나타나는 시간은 12min이고 이 차이는 흐름이 최단거리 직선코스를 경유하지 않았음을 나타낸다. 실험으로 관찰한 이동궤적을 나타내는 Fig.5을 보더라도 흐름은 직선 코스를 경유하지 않았다.

5. 결 론

비수착성 유기 염료인 예오신을 추적자로 선정하여 이차원 인공균열암반에서 이동현상을 관찰하고, 이동궤적의 영상이미지를 디지털 카메라로 촬영하였다. 이 실험결과는 이동모델로 모사한 이동궤적과 잘 일치하였다. 이동모델에서 구한 압력분포와 유속 벡터분포를 분석한 결과 실제 이동이 직선 상으로 이루어지기 보다 전체 흐름장에서 흐름저항이 가장 작은 부분들을 찾아가는 형태를 보임으로써 타당한 결과로 검증되어 실험이 성공적으로 수행되었으며 이동 모델의 타당성 또한 뒷받침해 주었다.

<참고문헌>

1. A. B. Gureghian, FRACFLO , Analytical solutions for two dimensional transport of decaying species in a discrete planar fracture and equidistant multiple parallel fractures with rock matrix diffusion., BMI/OWTD-5(1990)
2. Keum, D.K.et al., A stratified channel model with local longitudinal dispersion, Nuclear Technology, December(in press), (1997)
3. Y. W. Tsang, 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,(1998)
4. Schwarts, F.W., L. Smith, and A.S.Crow, A stochastic analysis of macroscopic dispersion in fractured media, Water Resour.Res., Vol19(5),1253,(1983)
5. 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)
6. Chung-Kyun Park, Dong-Kwon Keum, Pil-Soo Hahn, Stochastic Analysis of Contaminant Transport through a rough-surfaced Fracture, Korean J of Chem.Eng.,12,(1995)
7. 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)

8. Neretnieks I., Erksen, T. and Tahtinen, P., Tracer movement in a single fissure in granitic rock, Resour. Res., 18, (1982)
9. Cliffe, K., Gilling, D., Jefferies, N. and Lineham, J., An experimental study of flow and transport in fractured slabs, J. Contam. Hydro. 13, (1993)