사)한국지하수토양환경학회
춘계학술대회 2001. 4.13-14
한양 대학교 신소재공학관

박테리아에 의한 클로깅 현상에 따른 임계 상태 균열 암반의 유체투과율 감소에 관한 전산 연구

한충용 · 강주명 · 최종근
서울대학교 지구환경시스템공학부 (hcy@geofluid.snu.ac.kr)

요 약 문

We have simulated the effect of fracture characteristics on reduction of effective permeability of the fractured rocks due to in-situ bacteria growth. A nutrient is injected continuously for growth of in-situ bacteria. We used a power law for fracture length distribution and a fBm for fracture aperture spatial distribution. The results show that in-situ bacteria growth reduces the permeability hyperbolically, but the porosity of backbone fracture does not change significantly. It shows that reduction of the permeability proceeds at faster speed for smaller value of length exponent(a) and for larger value of Hurst exponent(H). The fracture length distribution has stronger effect on speed of reduction than the aperture spatial distribution. The time needed to reduce permeability is inversely proportional to the hydraulic gradient.

key word : clogging, fracture, permeability, biofilm, fBm, power law

1. 서론

지하수 유동로의 국부적 막힘 현상을 클로깅(clogging)이라고 하는데, 지중 박테리아 성장도 이 현상을 일으키는 주요한 원인 중의 하나이다. 탄화수소 지하저장기지의 수벽공 주위나 저장공동 상부에 지중 박테리아 성장에 의한 클로깅 현상이 발생하여 유체투과율이 감소하게 되면, 주입수의 압력이 저장공동에 설계된 양만큼 전달되지 못하여 저장물의 누출이 발생할 가능성이 크다. 이러한 탄화수소 지하저장기지와 같은 균열 암반에서의 박테리아 성장에 필요한 용질 거동은 균열의 형태적 특성(균열의 길이 및 간극 분포)의 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 균열의 형태적 특성이 박테리아 클로깅에 의한 균열 암반의 유체투과율 감소 양상에 미치는 영향을 전산 시뮬레이션을 통하여 살펴보고자 하였다.

2. 연구 내용 및 방법

1) 균열 간극 및 길이 분포의 특성화와 균열망 생성

본 연구에서는 균열을 길이 방향으로 가변 간극을 가지는 평판으로 가정하고, 지하 암반의 유체투과율의 공간적 분포가 허스트 지수(Hurst exponent), H로 특성화되는 fBm(fractional Brownian motion)을 따른다고 알려져 있으므로, 균열 간극의 공간적 분포도 fBm을 따른다고 가정하였다. 균열의 길이 분포로는 길이 지수(length exponent), a로 특성화되는 멱법칙(power law) 분포를 사용하였다. 한편, 스미기 이론(percolation theory)[1]에 의

하면 거대 규모 암반의 균열망은 암반의 외부 경계가 처음으로 모두 연결되는 임계 상태(percolation threshold)에 있다고 간주될 수 있다. 따라서 정사각형으로 모사되는 무균열 불투수성 암반 내에 네 변이 모두 연결될 때까지 전술한 균열 간극 및 길이 분포를 가지는 균열을 계속 생성시켜 임계 상태의 균열망을 구하였다.

2) 유체 유동장 해석 및 유체투과율 결정

임계 상태의 균열망을 생성한 후에는 암반의 외부 경계와 연결되는 균열망, 즉 스미기 망(percolation network)을 구한 후, 이로부터 지하수 유동에 관여하는 균열만으로 구성되는 백본(backbone)을 구해야 한다. 본 연구에서는 균일 격자망에서 백본을 구할 때 자주 사용되는 버닝(burning) 알고리즘[2]을 무작위 격자망에 알맞게 변형하여 백본을 구하였다. 정사각형으로 모사되는 균열 암반의 상부 및 하부 경계에는 비유동 경계조건(no flow boundary condition)을 설정하였으며, 좌측 경계 압력을 우측 경계 압력보다 크게 가하여 전체적으로 좌측에서 우측으로 수평 유체 유동이 발생하게 하였다. 다음으로, 균열 간극의 공간적 분포를 고려할 수 있도록 본 연구에서 개발된 단위 균열의 개념을 도입하여 균열 암반의 유체투과율과 백본 공극률을 구하였다.

3) 용질, 박테리아, EPS(Extracellular Polymeric Substances)의 지하수 내 거동 모사

단위 균열의 간극값에 영향을 미치는 인자들은 크게 다섯 가지, 즉 유체를 따라 움직이는 용질(기질 및 영양분)의 농도(c_n), 박테리아의 농도(c_b), 박테리아가 용질을 소모하면서 생산하는 EPS의 농도(c_e) 및 균열면에 흡착 또는 탈착되는 박테리아의 농도(B), EPS의 농도(E)이다. 이 중에서 균열면에 흡착 또는 탈착되는 박테리아와 EPS가 균열면에 바이오필름(biofilm)을 형성하면서 직접적으로 단위 균열의 간극값에 영향을 미치게 된다. 단위 균열 내에서의 위치(x)와 시간(t)에 따른 다섯 가지 인자들의 거동은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[3].

$$\frac{\partial c_n}{\partial t} + v_f \frac{\partial c_n}{\partial x} - D\frac{\partial^2 c_n}{\partial x^2} = -\frac{1}{Y_b} r_{n,b} - \frac{1}{Y_e} r_{n,e} - \frac{1}{Y_B} r_{n,B} - \frac{1}{Y_E} r_{n,E}$$

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} + v_f \frac{\partial c_b}{\partial x} - D\frac{\partial^2 c_b}{\partial x^2} = r_{n,b} - r_{b,B} + r_{B,b} \qquad \frac{\partial c_e}{\partial t} + v_f \frac{\partial c_e}{\partial x} - D\frac{\partial^2 c_e}{\partial x^2} = r_{n,e} - r_{e,E} + r_{E,e}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = r_{n,B} + r_{b,B} - r_{B,b} \qquad \frac{\partial E}{\partial t} = r_{n,E} + r_{e,E} - r_{E,e}$$

위 식들에서 v_f는 단위 균열 내에서의 유속이고, D는 수리 분산 계수(hydraulic dispersion coefficient)이며, Y_i는 단위 질량의 용질을 소모하고 생산되는 i 인자의 질량이다. $r_{i,j}$는 각 인자들의 거동 방정식을 연관시켜주는 항으로서 i 인자가 소모되어 발생되는 j 인자의 단위 시간당 농도를 나타낸다. 다섯 가지 변수(c_n, c_b, c_e, B, E)에 대한 방정식의 해를 구하기 위하여 Suchomel 등[3]이 제안한 유한차분법을 이용하였다. 단, 단위 균열의 분산도(dispersivity)의 균열 길이 및 시간에 대한 의존성[1, 4]을 고려하기 위해 Suchomel 등[3]의 모델을 부분적으로 수정하였다.

4) 박테리아 및 EPS에 의한 균열 간극 변화 계산

단위 균열의 간극은 균열면에 흡착 또는 탈착되는 박테리아와 EPS에 의하여 변하게 되는데, 이로 인하여 균열 암반 내 유체 유동장 및 유체투과율의 변화가 발생하게 된다. 본 연구

에서는 박테리아와 EPS가 균열면에 균일하게 흡착되면서 바이오필름을 형성한다고 가정하고, 질량 보존의 법칙을 이용하여 시간에 따른 단위 균열 간극을 유도하였다. 모든 단위 균열 간극이 구해지면 그 값들을 이용하여 균열 암반 내 유체 유동장 및 유체투과율, 그리고 백본의 공극률을 다시 계산하고, 이 과정을 주어진 시간까지 반복하게 된다.

전술한 과정을 동일한 H 및 a값에 대하여 반복 수행한 후, 결과값들의 산술 평균을 대표 결과값으로 사용하였다. 초기조건으로 균열 암반 내의 용질의 농도를 0으로 설정하였으며, 박테리아는 균열면에 균일하게 흡착되어 있다고 가정하였다. 경계조건으로는 용질이 일정 농도로 계속 주입되는 상황을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션 결과, 유체투과율은 하이퍼볼릭(hyperbolic)하게 크게 감소하지만, 백본의 공극률은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 1). 이것은 용질을 주입하는 경계면과 가까운 암반 내에서 박테리아 클로깅에 따른 균열 간극의 감소가 대부분 일어났기 때문이다. 즉, 국부적으로 균열 간극의 감소가 발생하였기 때문에 전체적인 백본 공극률은 크게 감소하지 않은 반면, 임계상태에 있는 균열 암반의 유체투과율은 국부적인 균열 간극의 감소에도 큰 영향을 받기 때문에 크게 감소하였다. 유체투과율이 하이퍼볼릭하게 감소하면서 0이 되지 않는 이유는 바이오필름이 두꺼워질수록 탈착되는 박테리아와 EPS의 양도 점차 증가하기 때문에 시간이 지나면 더 이상 균열 간극이 감소하지 않는 평형 상태에 다다르기 때문이다. 이 결과는 균열 암반이 아닌 다공성 매질을 대상으로 한 기존 실험 결과[5]와 유사하다.

한편, a가 작을수록 유체투과율의 감소가 빠르게 진행되었다(Fig. 2). 이것은 a가 작을수록 용질이 용이하게 이동할 수 있기 때문에 균열 암반 내 더 많은 부분에서 균열 간극의 감소가 발생했기 때문으로 사료된다.

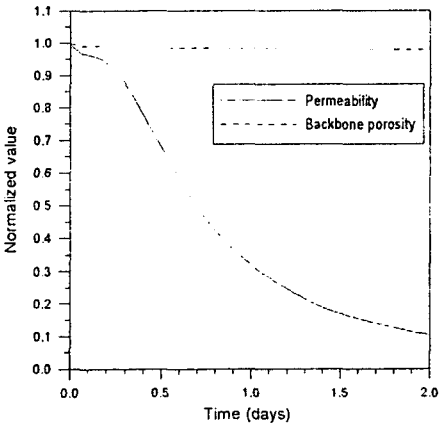

Fig. 1. The change of normalized permeability and normalized backbone porosity by bacteria clogging (a = 1.8, H = 0.5).

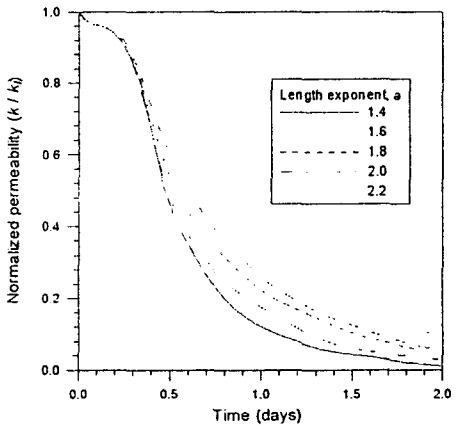

Fig. 2. The change of normalized permeability by bacteria clogging due to a (constant aperture).

H가 클수록 유체투과율의 감소도 비교적 빨리 진행되었으나(Fig. 3), 차이가 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 이것은 전술한 바와 같이 균열 간극의 감소가 국부적인 부분에서 발생하기 때문에 전체적인 균열 간극의 공간적 분포가 유체투과율 감소 속도에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다. 반면 균열의 길이 분포 특성은 Fig. 2에서 보았듯이 균열 간극의 공

간적 분포 특성보다 유체투과율 감소 속도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수가 있다.

동수구배와 유체투과율의 감소 시간은 선형적으로 반비례하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 이것은 동수구배가 클수록 용질의 이동 속도 및 이에 따른 균열 간극의 감소가 빨라지기 때문이다.

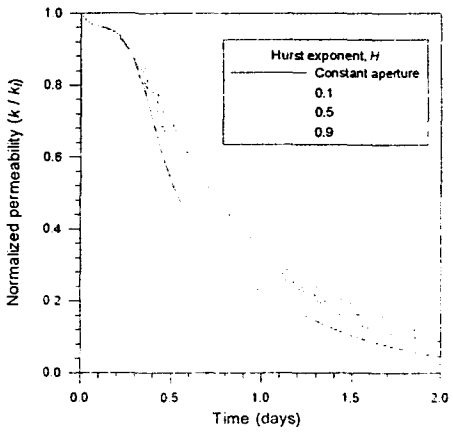

Fig. 3. The change of normalized permeability by bacteria clogging due to H (a = 1.8).

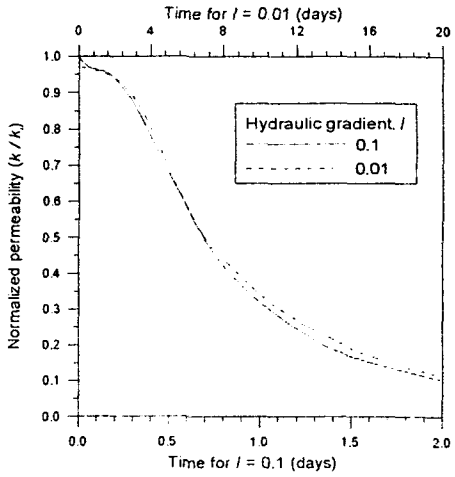

Fig. 4. The change of normalized permeability by bacteria clogging due to hydraulic gradient (a = 1.8, H = 0.5).

4. 결론

1) 유체투과율은 하이퍼볼릭하게 감소하지만, 백본의 공극률은 큰 변화가 없다.

2) a가 작을수록 또는 H가 클수록 유체투과율의 감소가 빠르게 진행된다.

3) 균열 길이 분포의 특성이 균열 간극의 공간적 분포 특성보다 유체투과율 감소 시간에 더 큰 영향을 미친다.

4) 동수구배와 유체투과율의 감소 시간은 선형적으로 반비례한다.

5. 사사

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1) Sahimi, M., *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock*, VCH, New York, 1995.

2) Herrmann, H. J., D. C. Hong, and H. E. Stanley, Backbone and elastic backbone of percolation clusters obtained by the new method of 'burning', *J. Phys. A: Math. Gen.*, 17, L261-L266, 1984.

3) Suchomel, B. J., B. M. Chen, and M. B. AllenⅢ, Macroscale properties of porous media from a network model of biofilm processes, *Transp. Porous Media*, 31, 39-66, 1998.

4) Arya, A., T. A. Hewett, R. G. Larson, and L. W. Lake, Dispersion and reservoir heterogeneity, *SPERE*, 4(1), 139-148, 1988.

5) Cunningham, A. B., W. G. Characklis, F. Abedeen, and D. Crawford, Influence of biofilm accumulation on porous media hydrodynamics, *Environ. Sci. Technol.* 25, 1305-1311, 1991.