한국지하수토양환경학회 추계학술발표회
2004년 9월 9~10일 전 주 대 학 교

기하양상을 고려한 균열 내 투수계수 산정

채병곤, Ichikawa, Y.*, 김용제**

*한국지질자원연구원 지질환경재해연구부, *일본 나고야대학 환경학연구과,*
***한국지질자원연구원 지하수지열연구부 (bgchae@kigam.re.kr)*

<요 약 문>

This study was conducted to calculate the permeability coefficient in a single fracture while taking the true fracture geometry into consideration. The fracture geometry was measured using the confocal laser scanning microscope (CLSM). The CLSM geometry data were used to reconstruct a fracture model for numerical analysis using a homogenization analysis (HA) method. The HA is a new type of perturbation theory developed to characterize the behavior of a micro-inhomogeneous material that involves periodic microstructures. The HA permeability was calculated based on the local geometry and local material properties (water viscosity in this case). The results show that the permeability coefficients do not follow the theoretical relationship of the cubic law.

key word : permeability coefficient, fracture geometry, confocal laser scanning microscope, homogenization analysis method, the cubic law

1. 서론

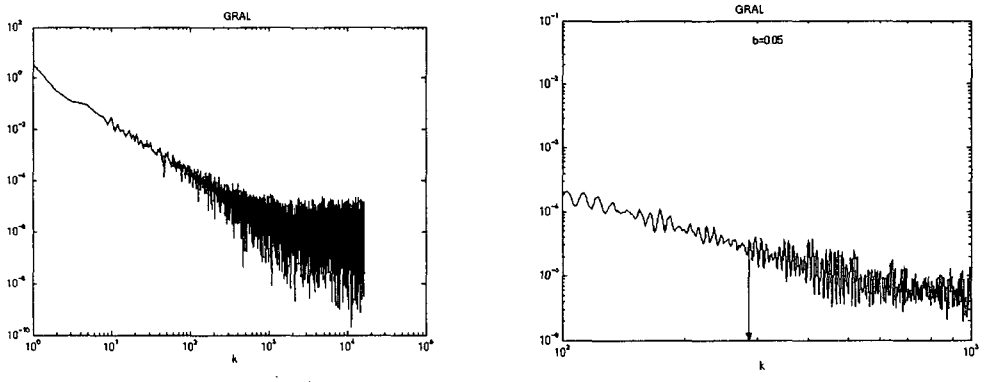
암석 내 균열을 따른 수리전도도는 균열을 구성하는 기하학적 요소, 즉 방향, 간극, 거칠기 그리고 상호 연결도에 주로 좌우된다. 따라서, 수리전도도를 정확하게 계산하기 위해서는 이와 같은 기하 요소들을 최대한 계산모델에 반영할 필요가 있다. 암석 균열을 따른 수리전도도는 특히 균열 기하요소들 중 간극의 변화에 매우 민감하게 좌우됨이 밝혀지면서 간극의 영향을 고려하기 위해 전술한 바와 같은 평행판 모델을 가정한 삼승법칙을 사용하였으나, 최근에 삼승법칙은 다수의 연구에 의해 불평탄한 균열을 따른 유체유동을 정확하게 해석할 수 없음이 나타났다[1-3]. 그러므로, 암반 균열을 대상으로 불평탄한 균열 형태와 이에 기인한 간극변화를 정밀하게 측정하고 이를 이용하여 정확한 투수계수를 계산하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 공초점 레이저 스캔 현미경에서 획득한 단열 거칠기자료를 이용하여 거칠기 변화에 따른 단열기하양상을 정밀하게 반영한 단열 모델을 생성한 후, 이 모델에서의 투수계수를 산정하기 위한 수치해석을 실시하였다. 전술한 바와 같이 다양한 단열분포 조건에서는 투수특성 삼승법칙을 따르지 않음을 감안해 간극변화에 따른 단열 기하양상을 충분히 고려한 투수계수를 산정하고자 균질화 해석법 (homogenization analysis method)을 이용하여 투수특성을 구명하였다.

2. 균열 거칠기 측정 및 해석

거칠기는 공초점 레이저 스캔 현미경(confocal laser scanning microscope; CLSM)을 이용하여 측정하였다(Fig.1 in Chae et al., 2003[4]). 이 연구에서 사용한 CLSM은 488nm의 파장을 갖는데, 이는 측정 정확도를 결정하는 주요한 인자이다. 즉, 파장이 짧을수록 더 정확한 측정자료를 획득할 수 있다. 현미경의 스캔 방법은 두 개의 검류계(galvanometer) 스캐너 반사경(mirror)를 이용한 광 편광(light polarization) 방법이다. 공진 검류 반사경은 넓은 면적에 대해 빠른 속도와 높은 해상도로 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이 CLSM은 공초점 형식을 취하므로 광축방향으로의 해상도와 대비(contrast)를 크게 향상시켰다[4]. 또한, CLSM은 측정과 동시에 거칠기 자료를 수치형식으로 바로 획득할 수 있으므로, 과거 기존 연구에서처럼 정량화된 자료를 얻기 위한 부수적 작업이 필요없다. 시료측정 간격은 x와 y방향으로 2.5㎛이고, z방향으로 0.05㎛의 높은 해상도로 측정하였다. 2차원 거칠기 자료를 얻기 위해 균열 면의 가운데 부분에서 시료 장축방향으로 하나의 선을 설정하여 이를 따라 측정하였다. 측정 해상도는 x방향과 y방향으로 1,024×768 pixels (2.56×1.92 mm)로 설정하였고 z방향 해상도는 10㎛이다.

균열 거칠기 특성을 정량적으로 파악하기 위해 고속 퓨리에 변환(fast Fourier transform)을 이용한 스펙트럼 분석을 실시하였다(Fig. 1a). 퓨리에 변환은 거칠기를 구성하는 복잡한 성분을 단순한 주파수 성분으로 변환하여 각 주파수별 크기를 구분할 수 있다. 그러므로, 이 과정을 통해 거칠기를 구성하는 성분 중 가장 영향력이 큰 주파수 성분을 파악할 수 있다. 잡음 제거 후, 영향력이 큰 주파수 성분만을 선택하여 거칠기를 재현한다. 이때, 잡음을 제거한 스펙트럼의 고주파 영역에는 일부의 잡음이 여전히 남아 있으며, 이로 인해 스펙트럼의 형상이 급격히 변화하는 부분이 있다. 스펙트럼 형태의 급격한 변화점을 선택한 후, 그 지점보다 저주파 영역의 주파수만을 선택하여 각 주파수의 코사인 곡선을 그려 이를 중첩하면 잡음이 제거된 매끄러운 균열 거칠기가 재현된다(Figs. 1b & 2). 이렇게 재현한 균열 거칠기는 균열을 통한 지하수 유동특성 해석의 균열모형 입력자료로 활용하고, 이 모형을 이용해 다음에 설명할 수치해석 방법을 이용하여 거칠기를 반영한 균열을 따른 투수계수를 산정하였다.

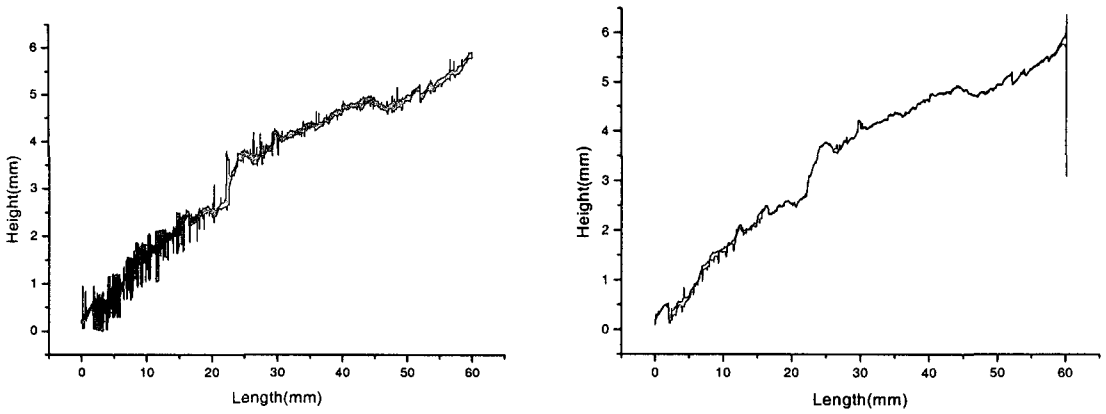


(a) (b)

Fig. 1. Results of the FFT analysis for the GRA. (a) Noise contained spectrum, (b) Threshold of low pass filter.

3. 균질화 해석법

균질화 해석법은 섭동이론을 적용한 것으로서, 주기적 미세구조를 가지는 불균질 물질의 거동을 연구하기 위해 개발되었다[5,6]. 이 연구에서는 기본적 이론을 바탕으로 단열 내에서의 유체유동 문제를 해석하기 위해 균질화법을 응용하였다.



(a) (b)

Fig. 2. Comparison of the measured roughness data of GRA which bear noises (a) with the smoothed roughness data which were filtered by a low pass filter (b).

균질화 해석법은 미시규모와 거시규모에서의 특성을 동시에 계산하므로 두 종류의 좌표체계를 바탕으로 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 기본으로 하여 전개된다. 균질화 해석법은 해석 대상체의 단위 셀(unit cell)에서 미시방정식(micro scale equation)을 구하여 특성속도(characteristic velocity)와 특성압력(characteristic pressure)을 계산한 후, 균질화 투수계수(HA-permeability coefficient)를 구한다. 또한, 단위 셀에서의 평균물체속도와 균질화 투수계수를 이용하여 거시방정식(macro scale equation), 즉 균질화 흐름 방정식(HA-flow equation)을 도출하게 되는데, 여기서 단열 내 거시압력(macro pressure)을 구하게 된다. 따라서, 미시규모 매질특성과 거시규모 매질특성을 동시에 고려하여 투수계수를 계산할 수 있으므로 단열 기하양상의 국부적 영향을 고려한 투수특성을 정확히 해석할 수 있다[7].

4. 거칠기를 고려한 균열모형에서의 투수계수 산정

균질화 해석법을 이용하여 불평탄 균열에서의 투수특성을 파악하기 위해 수치해석을 실시하였다. 균질화 해석법의 타당성은 기존의 선행연구에서 이미 입증되었으며[6,7], 이 연구에서는 균열 거칠기를 최대한 반영하여 거칠기 형태에 따른 투수계수 변화양상을 파악하고자 하였다.

앞에서 측정한 균열 거칠기 자료를 토대로 개별 시료에서 각기 다른 형태의 거칠기 조건을 부여하기 위해 균열 양쪽 면 중 상부 면을 1mm씩 전단방향으로 5단계에 걸쳐 이동시켰다. 이에 따라 개개 균열에서 다양한 거칠기 형태가 만들어 졌고, 또한 거칠기 변화에 수반되어 간극도 함께 변화하였다(Table 1). 대부분의 시료에서 평균간극은 전단변이 단계와 간극 값이 정비례하는 관계를 보이지만, GRC의 경우는 전단 변이량이 증가함에 따라 평균 간극이 감소하는 반비례 관계를 나타낸다. 이는 GRC의 균열은 좌측에서 우측으로 경사져 있고, 전단변이는 우측에서 좌측으로 진행되기 때문에 반비례 관계가 나타나는 것이다.

이와같은 균열모형을 이용하여 균질화 해석을 수행하여 각 전단변이 단계별로 C-투수계수(C-permeability)를 구하였다. 수치해석 결과에 따르면, 투수계수는 각 단계별로 10^{-4}에서 10^{-1} cm/sec의 범위에 불규칙적으로 분포한다. 채병곤(2004)[7]에 의하면 평행판 모델을 가정한 균질화 해석에서는 투수계수가 대체로 삼승법칙(cubic law)의 이론적 관계를 따르는 것으로 나타났다. 그러나, 이 연구에서 수행

한 투수계수 산정 결과는 삼승법칙의 이론적 관계와는 무관한 투수계수 분포를 보여준다(Fig. 3). 각 시료별 투수계수는 특정한 경향성을 보이지 않고 비선형적인 양상을 나타낸다.

Table 1. Mean aperture values on the five stages of shear displacement

Shear disp. (mm)	Mean aperture (cm)					
	GRA	GRB	GRC	GRD	GRE	GRF
1.0	0.020	0.031	0.032	0.045	0.037	0.025
2.0	0.029	0.042	0.026	0.047	0.047	0.038
3.0	0.038	0.053	0.023	0.048	0.056	0.050
4.0	0.047	0.063	0.021	0.051	0.066	0.063
5.0	0.056	0.074	0.020	0.053	0.075	0.074

이러한 관계를 토대로 삼승법칙은 불평탄한 균열을 따른 투수특성을 정확히 표현할 수 없음을 알 수 있다. 즉, 균열 거칠기와 간극 변화는 삼승법칙에서 제안한 간극과 투수성 간의 관계와는 달리, 균열의 조건별로 상당히 불규칙적인 투수특성을 가지는 것으로 해석된다.

그러므로, 불평탄 균열을 이용한 투수특성 해석 시에는 과거에 삼승법칙을 바탕으로 제안된 경험식과는 다른 새로운 방법이 사용되어야 하며, 특히 균열의 기하조건에 따라 투수계수가 불규칙적으로 변화하므로 균열 기하양상을 최대한 반영하여 투수계수를 산정할 수 있는 수치해석이 수행되어야 한다. 이러한 점을 감안할 때, 전술한 바와 같이 균질화 해석법은 균열 기하양상을 미시규모와 거시규모에서 동시에 고려할 수 있고, 이에 따른 투수계수 산정이 가능하므로 균열의 전체적 양상뿐만 아니라 국부적 영향까지 포함된 투수특성 파악이 가능하다. 따라서, 균질화 해석법은 기존에 제안된 경험식들에 의한 계산결과 보다 훨씬 정확한 결과를 도출해 낼 수 있으며, 실제 자연계에서 수집한 복합적인 균열을 따른 투수특성 평가에 효과적이고 정확한 결과를 가져올 수 있다.

5. 결론

균열의 기하양상을 정확히 반영하여 균열을 따른 투수특성을 파악하고자 균질화 해석법을 도입하여 투수계수를 산정하였다. 불평탄 균열에서의 투수계수 산정을 위해 균열 양쪽 면 중 상부 면을 1mm씩 전단방향으로 5단계에 걸쳐 이동시켰다. 이에 따라 개개 균열에서 다양한 거칠기 형태가 만들어 졌고, 또한 거칠기 변화에 수반되어 간극도 함께 변화하였다. 각 전단변이 단계별로 C-투수계수를 구한 결과, 투수계수는 각 단계별로 10^{-4}에서 10^{-1} cm/sec의 범위에 불규칙적으로 분포한다. 이 연구에서 수행한 투수계수 산정 결과는 삼승법칙의 이론적 관계와는 무관한 투수계수 분포를 보여, 각 시료별 투수계수는 특정한 경향성을 보이지 않고 비선형적인 양상을 나타낸다. 이러한 관계를 토대로 삼승법칙은 불평탄한 균열을 따른 투수특성을 정확히 표현할 수 없음을 알 수 있다. 즉, 균열 거칠기와 간극 변화는 삼승법칙에서 제안한 간극과 투수성 간의 관계와는 달리, 균열의 조건별로 상당히 불규칙적인 투수특성을 가지는 것으로 해석된다.

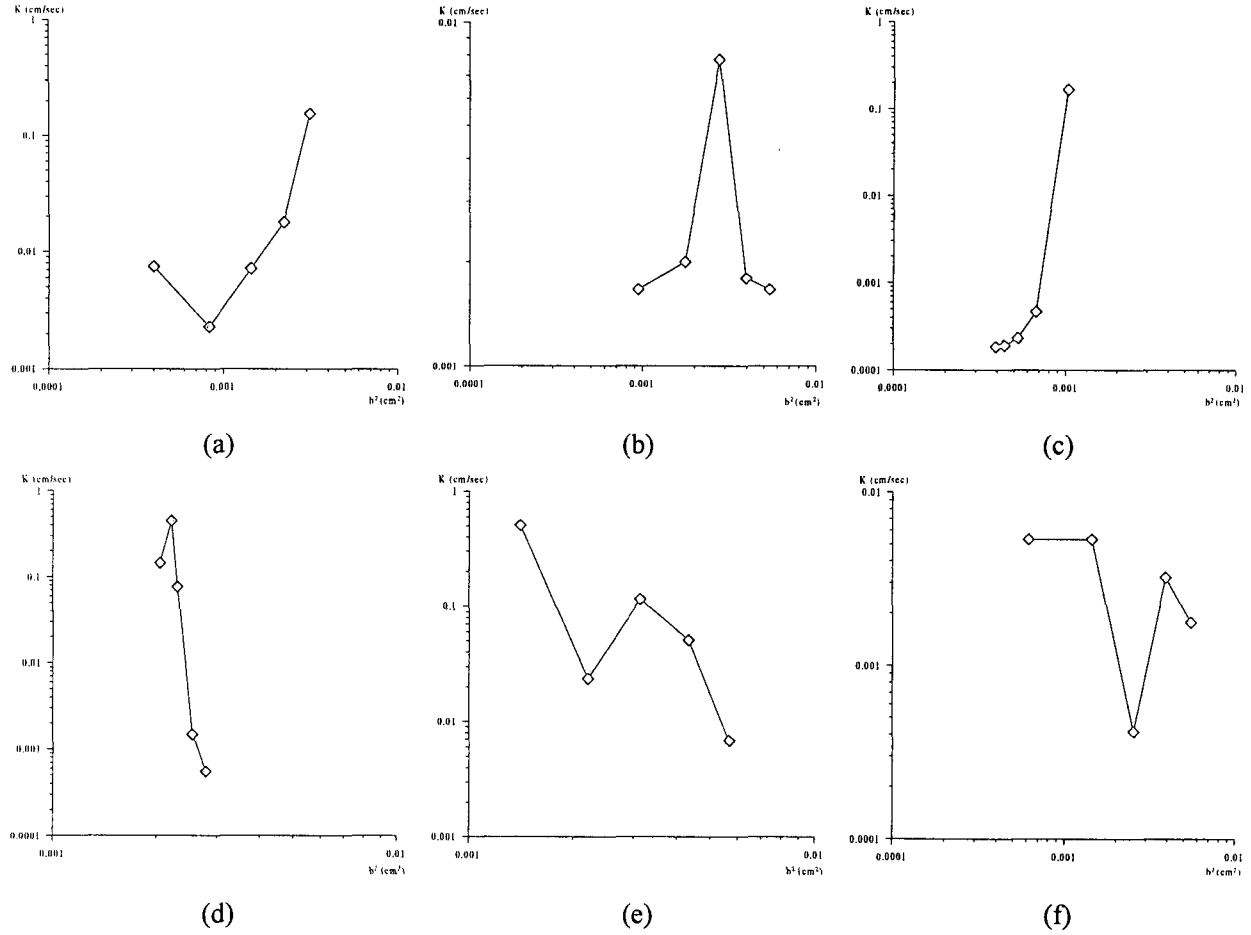


Fig. 3. Relationship between C-permeability coefficients and aperture square. (a) GRA, (b) GRB, (c) GRC, (d) GRD, (e) GRE, (f) GRF.

참고문헌

1. Brown, S. R., Fluid flow through rock joints; The effect of surface roughness, Jour. Geophys. Res., 92(B2), pp. 1337-1347, 1987.
2. Zimmerman, R. W. and Bodvarsson, G. S., Hydraulic conductivity of rock fractures, Transp. Porous Media, 23, pp. 1-30, 1996.
3. Raven, K. G. and Gale, J. E., Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 22(4), pp. 251-261, 1985.
4. Chae, B. G., Ichikawa, Y., Jeong, G. C. and Seo, Y. S., Aperture of Granite Fracture and Effects for Fluid Flow, Materials Sci. Res. Int., 9(4), pp. 270-277, 2003,
5. Sanchez-Palencia, E., Non-homogeneous media and vibration theory, Springer-Verlag, p. 398, 1980.
6. Ichikawa, Y., Kawamura, K., Nakano, M., Kitayama, K. and Kawamura, H., Unified molecular dynamics and homogenization analysis for bentonite behavior: current results and future possibilities, Engineering Geol., 54, pp. 21-31, 1999.
7. 채병곤, 투수계수산정을 위한 균질화 해석법의 적용, 한국지하수토양환경학회지, 9, pp. 79-86, 2004.