

암반균열의 기하양상을 고려한 단일균열 내 투수계수 산정기법

채병근, 김용제

한국지질자원연구원, 대전광역시 유성구 가정동 30

bgchae@kigam.re.kr

1. 서론

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

2. 균열의 거칠기 분석결과를 토대로 한 투수특성 균질화 해석

거칠기는 공초점 레이저 스캔 현미경(confocal laser scanning microscope; CLSM)을 이용하여 측정하였다. 이 연구에서 사용한 CLSM은 488nm의 파장을 갖는데, 이는 측정 정확도를 결정하는 주요한 인자이다. 현미경의 스캔 방법은 두 개의 검류계(galvanometer) 스캐너 반사경(mirror)를 이용한 광 편광(light polarization) 방법이다. 시료측정 간격은 x와 y방향으로 2.5 μ m이고, 측정 해상도는 x방향과 y방향으로 1,024 x 768 pixels (2.56 x 1.92 mm)로 설정하였고 z방향 해상도는 10 μ m이다. 균열 거칠기 특성을 정량적으로 파악하기 위해 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform)을 이용한 스펙트럼 분석을 실시하였다. 푸리에 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.

균질화 해석법은 섭동이론을 적용한 것으로서, 주기적 미세구조를 가지는 불균질 물질의 거동을 연구하기 위해 개발되었다. 이 연구에서는 기본적 이론을 바탕으로 단일 내에서의 유체유동 문제를 해석하기 위해 균질화법을 응용하였다. 균질화 해석법은 미시규모와 거시규모에서의 특성을 동시에 계산하므로 두 종류의 좌표계를 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 단일 내 거시압력(macro pressure)을 구하게 된다. 따라서, 미시규모 매질특성과 거시규모 매질특성을 동시에 고려하여 투수계수를 계산할 수 있으므로 단일 기하양상의 국부적 영향을 고려한 투수특성을 정확히 해석할 수 있다.

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. 대부분의 시료에서 평균간극은 전단변이 단계와 간극 값이 정비례하는 관계를 보였다.

이와같은 균열모형을 이용하여 균질화 해석을 수행하여 각 전단변이 단계별로 C-투수계수(C-permeability)를 구하였다. 수치해석 결과에 따르면, 투수계수는 각 단계별로 10⁻⁴에서 10⁻¹ cm/sec의 범위에 불규칙적으로 분포한다. 이 연구에서 수행한 투수계수 산정 결과는 삼승법칙의 이론적 관계와는 무관한 투수계수 분포를 보여준다(Fig. 1). 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.

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. 이

러한 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.

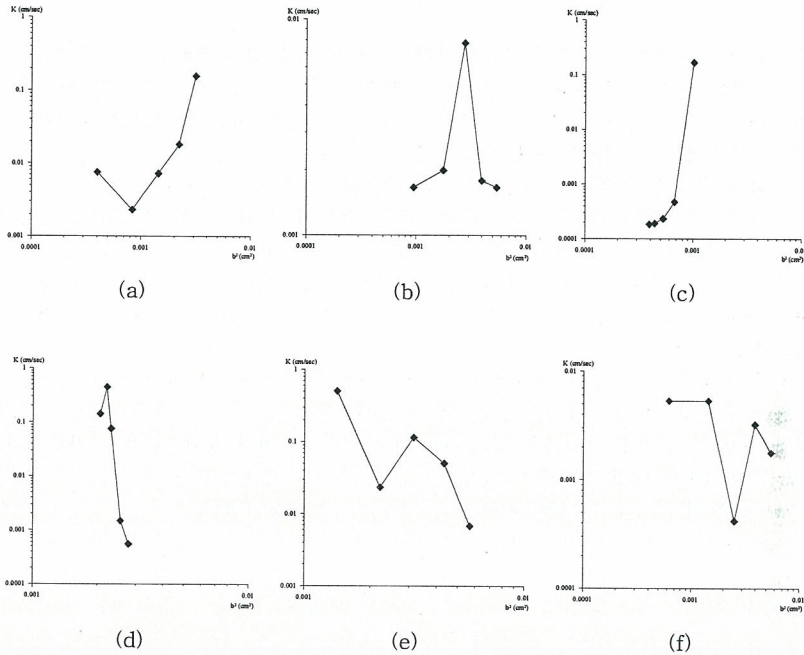


Fig 1. Relationship between C-permeability coefficients and aperture square.
 (a) GRA, (b) GRB, (c) GRC, (d) GRD, (e) GRE, (f) GRF

3. 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.

사 사

본 연구는 원자력연구개발사업의 하나인 “심지층처분환경 타당성평가” 연구의 위탁연구인 “처분장 후보부지 평가 기본방안 구축”의 일부로 수행되었다.