

## 균질화 해석법을 이용한 단열 간극변화에 따른 투수계수 해석

채병곤\*

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

### The homogenization analysis for permeability coefficients by fracture aperture variations

Byung-Gon Chae\*

Korea Inst. Geoscience and Mineral Res.

이 연구에서는 간극변화에 따른 단열 기하양상을 충분히 고려한 투수계수를 구하고자 균질화 해석법을 이용하여 투수계수를 산정하였다. 공초점 레이저 스캔 현미경을 이용하여 압력 단계별 간극을 측정된 결과 한개 시료 내에서 각 측정지점별 간극 크기는 모두 다르게 나타나며 단열 면 양쪽이 서로 평행하지 않고 불평탄한 양상임을 잘 나타낸다.

각 시료별로 압력 단계별 간극양상을 이용하여 단열모델을 각각 작성하고 균질화 해석법을 통해 간극 양상에 따른 투수성 변화를 살펴본 결과, 각 시료별로 산정한 투수계수는  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  cm/sec의 범위에 분포한다. 시료들은 대체로 압력이 증가함에 따라 일반적으로 투수계수가 감소하는 양상을 나타낸다. 그러나, 시료별로 압력에 따른 투수계수 감소 비율이 일정하지 않고 다양한 변화양상을 보인다. 이와 같은 양상은 Chae et al. (2003)의 관찰결과와 잘 일치하며, 이는 간극의 변화가 투수성에 미치는 영향이 크다는 것을 입증한다.

동일 시료 내에서도 3등분한 지점별로 각기 다른 투수계수 값이 계산되었다. 이는 투수계수가 간극의 크기와 분포형태에 따라 민감하게 변화함을 지시하는 것이다. 따라서, 간극 분포가 일정하지 않은 암석 내 단열에서의 투수특성 해석 시에는 정확한 단열 기하양상을 반영하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 단열 내 투수계수 산정을 위해서는 단열 기하양상을 충분히 고려할 필요가 있다.

**주요어:** 공초점 레이저 스캔 현미경, 균질화 해석법, 간극, 투수계수, 단열 기하

The permeability coefficients were calculated by the homogenization analysis method with sufficient consideration of fracture geometry dependent on aperture change. According to the results of aperture measurements using a confocal laser scanning microscope, apertures on each measuring point display different magnitudes, indicating that fracture walls can not be assumed as parallel feature. After construction of fracture model based on the aperture values measured on each pressure level, the homogenization analysis was conducted to compute permeability coefficients. The calculated permeability coefficients distribute in the ranges of  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  cm/sec. Most of the specimens show decreasing permeability coefficients with the increase of the applied pressure. However, the decreasing rates of permeability coefficients do not show a constant trend on each pressure level. This phenomenon is well

\* Corresponding author: bgchae@kigam.re.kr

matched to the observation results of Chae et al. (2003). It proves that aperture change strongly influences on permeability characteristics.

Three sections of each specimen have all different values of permeability coefficient. It suggests that the variation of permeability coefficient depends sensitively on aperture magnitudes and characteristics of fracture geometry. It is very important to consider accurate fracture geometries for analysis of permeability characteristics in rock fractures bearing different aperture distribution. Therefore, it needs to consider sufficiently the fracture geometries for calculating the permeability coefficients of fractures.

**Key words:** confocal laser scanning microscope, homogenization analysis method, aperture, permeability coefficients, fracture geometry

## 서론

고준위방사성폐기물 처분안전성 평가와 관련한 다양한 연구가 시작되면서 1970년대부터 단열암반 내 지하수 유동특성을 구명하기 위한 노력들이 활발히 진행되어 왔다. 과거 고전적 개념의 다공질 매체 내에서의 지하수 유동과는 달리 암반 내 지하수 유동은 유동경로 역할을 하는 단열의 특성에 크게 지배된다. 따라서, 단열특성의 영향을 파악하기 위한 연구들이 진행되면서 초기에는 단열 면 양쪽이 서로 평행한 것으로 가정하고, 이를 토대로 투수계수는 단열 간극(aperture)의 제곱에 비례하는 삼승법칙(cubic law)이 유도되었다(Snow, 1965; Long, 1961).

그러나, 실제 암반 내에 발달하는 단열 표면은 서로 평행하지 않고 단열 면 형태가 불규칙적으로 발달하므로 단일 단열 내에서도 간극이 다르게 분포한다. 이와 같은 실제적 단열기하특성을 반영하여 단열 내 투수특성을 해석한 결과, 단열을 따른 투수성은 삼승법칙을 만족하지 않는 것으로 밝혀졌다(Tsang and Witherspoon, 1981; Kranz et al., 1979; Gale, 1990). 간극이 일정하게 발달하지 않기 때문에 단열 내부에서는 간극이 상대적으로 큰 부분을 따라서 유로유동(channel flow) 형태로 지하수 또는 유체 유동이 일어난다(Rasmuson et al., 1986; Tsang and Tsang, 1987; Tsang et al., 1988; Berkowitz and Braester, 1991).

따라서, 단열 간극을 비롯한 기하양상을 정확하게 측정하고 특성을 파악하는 것이 중요함을 인식하고, 이를 정밀하고 효율적으로 측정하고자 많은 노력을 기울여 왔다. 대부분의 연구에서는 단열 내

에 레진(resin), 에폭시(epoxy) 또는 형광물질 등의 이물질을 주입하여 이를 고화시킨 후, 여러 방향으로 시료를 절단하여 간극을 측정하였다(Gale, 1987; Pyrak-Nolte et al., 1987; Gentier et al., 1989; Hakami and Stephansson, 1993). 또한 단열 양쪽의 형상을 복제한 것을 모듈더로 사용하여 단열 복제 형상을 제작하여 단열 간극을 측정하기도 하였다(Hakami and Barton, 1990, Hakami, 1992; Persoff and Pruess, 1995).

그러나, 이와 같은 방법은 동일한 시료를 이용하여 압력이나 전단 등에 의해 연속적으로 변화하는 간극을 측정할 수는 없다. 즉, 어느 한 상태에서만의 간극 특성을 파악할 수는 있지만, 동일 시료에서의 연속적인 간극 변화는 알 수 없다. 또한, 절단된 시료를 대상으로 사진을 촬영하거나 스캐닝을 한 후 단열 면을 따라 디지털화(digitizing)를 실시하여 간극 값을 획득하게 된다. 이는 자료획득의 과정이 복잡하고 디지털화의 정확도에 따라 자료가 다르게 획득되는 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 Chae et al. (2003)은 공초점 레이저 스캔 현미경을 이용하여 동일 시료에 다양한 압력을 가하면서 연속적으로 간극 변화를 측정하는 방법을 보고하였다. 이를 통해 압력에 따른 간극크기의 변화를 구명할 수 있고, 과거보다 더욱 정밀한 간극 측정 값을 획득할 수 있게 되었다.

이 연구에서는 공초점 레이저 스캔 현미경에서 획득한 단열 간극자료를 이용하여 간극 변화에 따른 단열기하양상을 정밀하게 반영한 단열 모델을 생성한 후, 이 모델에서의 투수계수를 산정하기 위한 수치해석을 실시하였다. 전술한 바와 같이 다양

한 단열분포 조건에서는 투수특성 삼승법칙을 따르지 않음을 감안해 간극변화에 따른 단열 기하양상을 충분히 고려한 투수계수를 산정하고자 균질화 해석법(homogenization analysis method)을 이용하여 투수특성을 구명하였다. 이를 통해 압력에 따른 간극 변화에 기인한 다양한 단열 기하양상을 정확히 파악하고, 평행하지 않은 단열의 특성을 최대한 반영한 투수계수 산정의 새로운 방법을 소개하고자 한다.

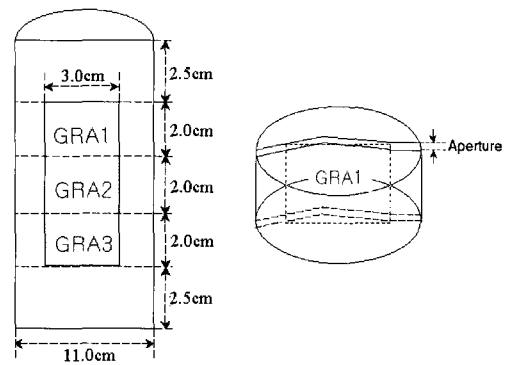
**균질화 해석법**

균질화 해석법은 섭동이론을 적용한 것으로서, 주기적 미세구조를 가지는 불균질 물질의 거동을 연구하기 위해 개발되었다(Sanchez-Palencia, 1980; Ichikawa et al., 1999). 이 연구에서는 기본적 이론을 바탕으로 단열 내에서의 유체유동 문제를 해석하기 위해 균질화법을 응용하였다.

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 흐름방정식(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(See Chae, 2003 for detailed explanation).

**단열 간극 측정방법**

이 연구에 사용한 암석시료는 익산지역에서 시추를 통해 채취한 유라기 조립질 화강암이다. 시료는 채취된 코어 중에서 코어 장축에 대체로 평행한 단일 단열을 갖는 신선한 부분을 선택하여 길이 11cm, 폭 5.5cm의 크기로 총 7개(GRA ~ GRG) 제작하였다(See Fig. 1 in Chae et al., 2003). 이 중 GRG는 사전 예비실험을 위



**Fig. 1.** Three sections of a specimen for aperture measurement.

해 제작한 시료로써 실제 데이터 해석에는 포함되지 않았으며, GRA~GRF의 6개 시료를 최종적으로 이용하였다.

제작된 시료는 공초점 레이저 스캔 현미경(confocal laser scanning microscope (CLSM); Olympus OLS 1100)을 이용한 간극측정을 위해 이 시료를 길이 2cm로 5등분하였다. 간극측정은 5개의 절단시료 중 가운데 3개 부분만 이용하여 실시하였다. 또한, 폭 5.5cm 중 코어 중심, 즉 단열 중심에서 양쪽으로 폭 3cm 이내의 영역만을 대상으로 간극을 측정했다. 그 이유는 11cm 길이의 시료 상단과 하단부분, 코어 폭 가장자리 부분은 시료절단 과정에서 단열 일부가 깨어져 인위적으로 간극 폭이 넓어진 부분들이 있으므로 이 부분을 제외하기 위해 가운데 3개 부분과 폭 3cm 영역만 측정하였다(Fig. 1).

단열간극은 CLSM을 이용하여 측정하였으며, 측정 간격은 2mm로서 모두 15개 지점에서 2차원 단열간극을 측정하고 이미지를 촬영하였다. 단열 전체의 양상을 관찰하고 이미지를 얻기 위해서는 5배 대물렌즈를 이용해 촬영한 후, 간극이 매우 좁은 관계로 측정오차를 줄이기 위해 10배 대물렌즈를 이용하여 각 측정지점에서 간극 값을 획득하였다(Chae et al., 2003).

한편, 압력변화에 따른 단열 간극변화를 유도하고자 CLSM의 스테이지에 시료를 장착시킨 상태에서 시료에 임의의 압축력을 가하면서 간극 변화를 측정하였다. 이를 위해 CLSM의 스테이지상에서 직접 일축압축력을 가할 수 있는 특수 제작한 압축장비를 사용하였다. (See Fig. 5 in Chae et al., 2003). 이 실험은 기존의 실험들과는 달리 공시체에 압력을 다양하게 가한 상태에서 현미경을 통해 직접 간극을 측정할 수 있음이 큰

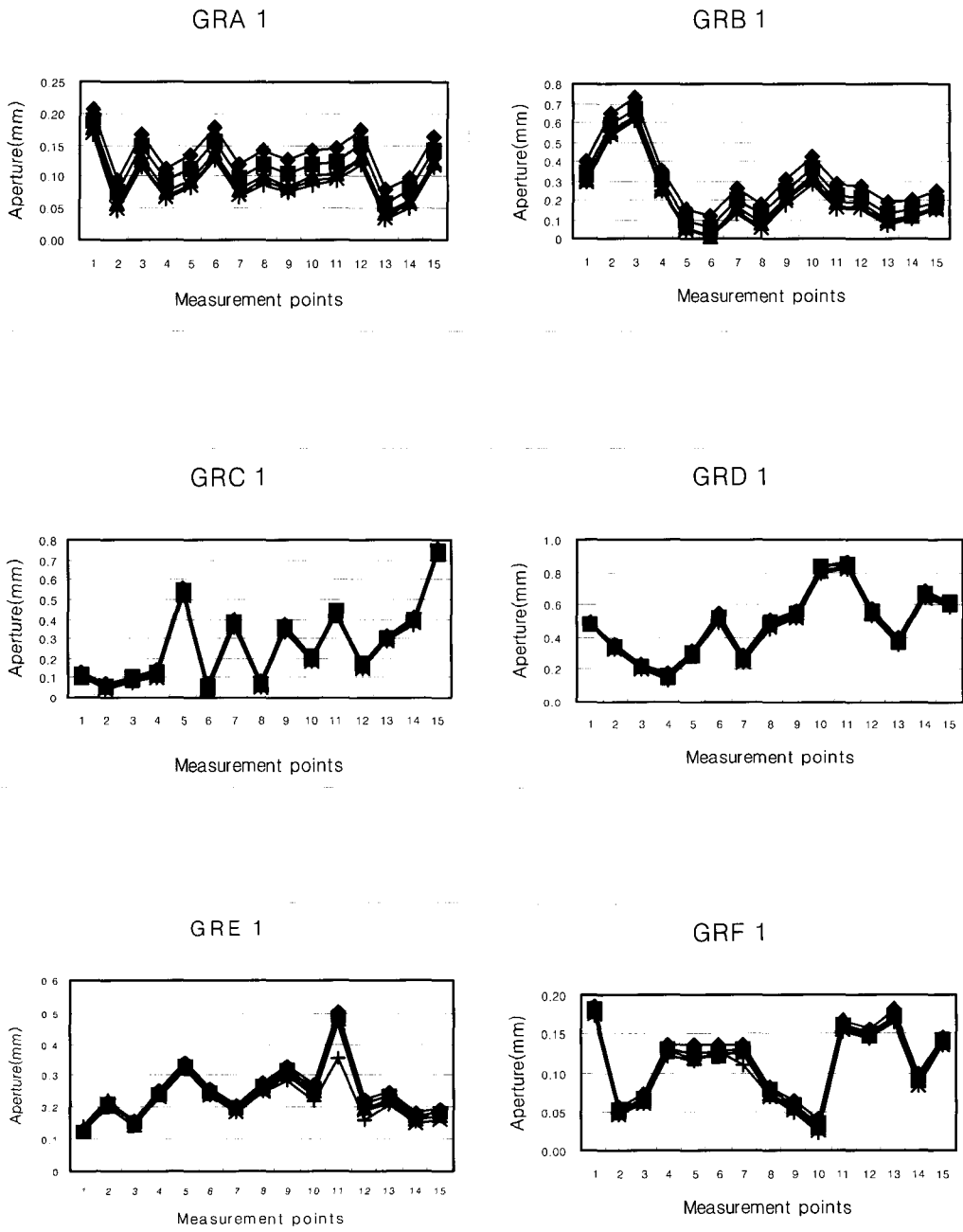


Fig. 2. Examples of aperture values measured under the five stress levels.

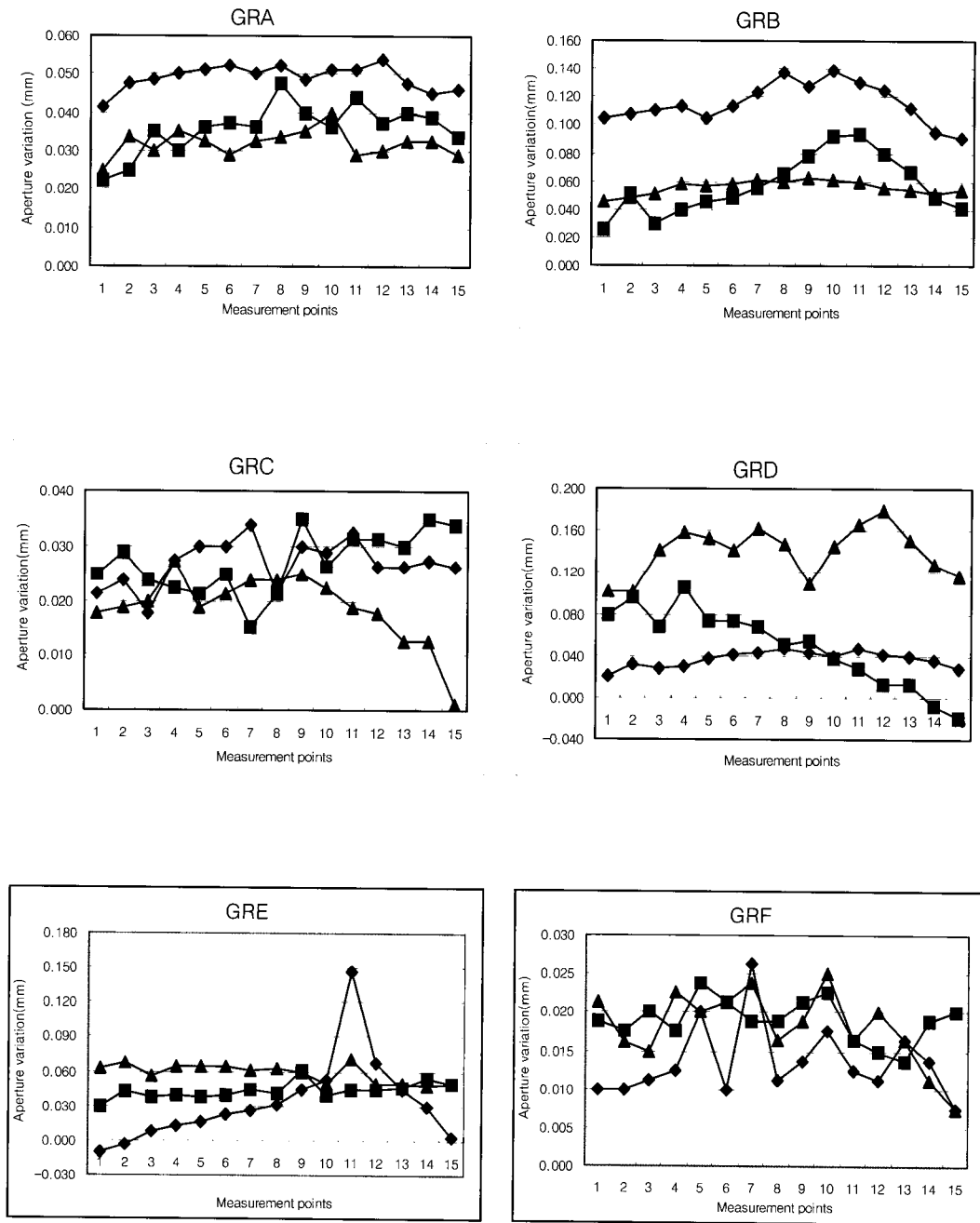


Fig. 3. Aperture variations for each specimen. (◆: the first section such as GRA 1; ■: the second part such as GRA 2; ▲: the third one such as GRA 3).

특징이다. 그러므로, 이 실험은 동일 간극을 대상으로 현미경 하에서 압력 변화에 따른 간극 변화를 연속적으로 측정할 수 있기 때문에 훨씬 효과적인 결과를 도출해 낼 수 있다. 이 실험에서는 공시체에 수동으로 조절 가능한 최저 압력인 2MPa, 10MPa, 35.17MPa, 52.76MPa, 70.34MPa의 압축력을 5단계에 걸쳐 가하면서 상위 세 단계의 압축력을 가하여 단일 간극변화 양상을 살펴보았다. 상위 세 단계의 압력은 11cm × 5.5cm의 시료 전체면적에 각각 10MPa, 15MPa, 20MPa의 압력을 가하는 것과 동일한 크기의 압력이다.

### 시료별 단일간극 측정결과

각 시료의 단열면에 수직방향으로 다섯 단계의 일축압축력을 가하면서 각 측정지점마다 10배 확대 대물렌즈를 이용해 간극크기를  $10^4$ cm의 오차범위 내에서 측정하였다(Fig. 2). 각 시료의 간극을 살펴보면 GRA의 경우 0.003~0.026cm, GRB는 0.0006~0.070cm, GRC는 0.001~0.09cm, GRD는 0.014~0.086cm, GRE는 0.0015~0.065cm, 그리고 GRF는 0.0008~0.0223cm 범위에 각각 분포한다. 또한, 각 시료별 평균 간극은 GRA부터 GRF의 순서로 각각 0.0094cm, 0.0172cm, 0.0308cm, 0.0409cm, 0.0255cm, 그리고 0.0110cm이다. 한개 시료 내에서 각 측정지점별 간극 크기는 일정하지 않고 다양하게 분포한다. 즉, 동일 단열 면 내에서 간극 크기가 모두 다르게 나타나는데, 이는 단열 면 양쪽이 서로 평행하지 않고 불평탄한 양상임을 잘 보여준다. 이를 통해 단열은 평행판이 아님을 입증할 수 있다.

각 시료는 대부분 압력이 증가함에 따라 간극이 감소하는 양상을 나타낸다(Fig. 2). 하위 3단계의 압력에서 각 시료는 간극변화 값이 상대적으로 큰 반면, 상위 압력 2단계에서의 간극 변화는 매우 작다. 이것은 압력이 증가함에 따라 단열 양쪽 면이 서서히 마주치기 시작하고, 전술한 바와 같이 단열 면이 평탄하지 않아 상위 압력단계에서는 단열 면 중 돌출된 부분들이 이미 접촉해 있기 때문에 더 이상의 압력이 가해지더라도 간극 감소가 발생하지 않기 때문이다. 그러나, GRD3의 경우는 초기 4단계의 압력에서는 유사한 비율로 간극이 감소하였으나, 마지막 5번째 단계의 압력에서는 오히려 간극 변화율이 더 크게 나타나 기타 시료와는 다른 특이한 양상을 나타낸다. 이는 압력이 증가함에 따라 단열 양쪽이 점차 접촉하게 되고, 더 이상의 간극 감소가 불가능하게 되면서 단열 면 사이에 작은 규모

의 전단변이가 생기거나 미세 단열이 이차적으로 발생함으로써 간극이 다시 넓어진 후 압력 증가에 따라 간극이 변화한 것이다(Chae et al., 2003).

Fig. 3은 각 시료별 간극변화 양상을 나타낸 것이며, 각 측정지점별 일정한 변화양상을 나타내지 않는다. 이 역시 단열 면이 불평탄한 관계로 압력이 가해지지 않은 초기의 기하양상이 부분마다 다르기 때문이다. 즉, 앞에서 설명한 바와 같이 초기 압력상태에서 단열 면의 어떠한 부분은 이미 서로 접촉해 있기 때문에 이러한 부분은 간극변화가 작다. 반면, 다른 부분에서는 단열 면이 서로 평행하거나 초기 상태의 간극이 큰 경우가 있는데, 이러한 경우는 간극변화가 비교적 크게 나타난다. 따라서, 간극변화는 초기 단열 기하양상에 영향을 받는다. 이를 통해 단열기하 양상을 정확히 표현하기 위해서는 평행판 모델이 적합하지 않음을 잘 알 수 있다.

### 균질화 해석법을 이용한 투수계수 산정

앞 절에서 살펴 본 바와 같이 단열 면은 서로 평행하지 않으므로 이와 같은 조건에서 단열을 따른 투수계수를 정확하게 계산하기 위해서는 단열의 기하양상을 최대한 고려하여야 한다. 이는 기존의 많은 연구에서도 이미 입증된 것이다(Brown, 1987; Gale, 1982a; Zimmerman and Bodvarsson, 1996; Gale, 1982b; Olsson and Brown, 1993; Durham and Bonner, 1994; Hakami and Larsson, 1996; Neretnieks, 1983). 그러나, 그동안 단열의 기하양상을 현실적으로 최대한 고려한 투수계수 산정은 원활하게 진행되지 못했다. 따라서, 이 연구에서는 불균일한 간극분포로 인한 국부적 기하양상 변화를 감안하여 투수계수를 산정하고자 균질화 해석법을 이용하여 수치해석을 실시하였다.

균질화 해석법은 미시규모(microscale) 매질특성과 거시규모(macroscale) 매질특성을 동시에 고려하여 투수계수를 계산할 수 있는 것이다. 즉, 균질화 해석법은 주기적 미세구조(microstructure)를 갖는 미소 불균질 물질의 거동특성을 구명하기 위해 개발된 새로운 형태의 섭동(perturbation) 이론이다. 이는 균질한 미시규모에서 미시 투수특성을 계산한 후, 거시규모에서의 균질화 투수계수를 계산하게 된다. 그러므로, 이 방법은 단열 기하양상의 국부적 영향을 고려한 투수특성을 정확히 해석할 수 있다(Sanchez-Palencia, 1980; Ichikawa et al., 1999; Chae, 2003). 균질화 해석법의 타당성은 기존의 선행연구에서 이미 입증되었다(Ichikawa et al., 1999,

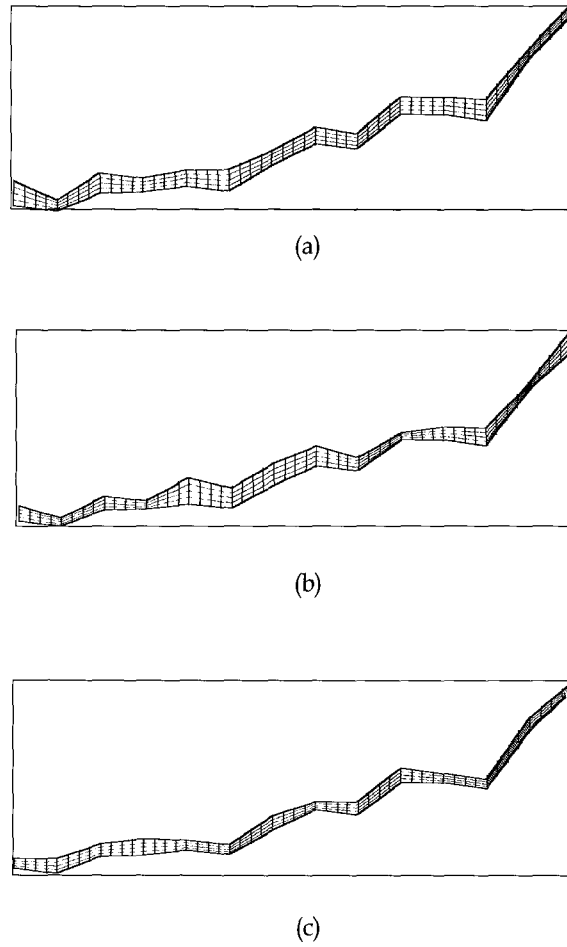


Fig. 4. Examples of fracture models constructed using the measured aperture data. (a) GRA 1, (b) GRA2, (c) GRA3. 100 times exaggerated in vertical direction.

Chae, 2003).

이 연구에서 측정된 간극 값을 토대로 투수계수 산정을 위해 단열모델을 작성하였다 (Fig. 4). 각 시료별로 3등분한 부분에 대해 압력 단계별 간극양상을 이용하여 단열모델을 각각 작성하여 간극 양상에 따른 투수성 변화를 살펴보고자 하였다. 이에 따라 각 단열모델은 서로 다른 간극 값을 갖는 다양한 형태로 구현되었다. 단열모델은 수치해석 결과의 정확성을 향상하기 위해 단일 단열의 내부를 최대한 조밀하게 나누었고, 화강암에서 단열을 제외한 기타 매질에서는 투수가 거

의 진행되지 않음을 감안하여 단열 경계부와 외부는 물의 흐름이 없는 것으로 가정하였다.

균질화 해석법을 이용하여 각 시료별로 산정한 투수계수는  $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 의 범위에 분포한다 (Table 1). 6개 시료 중 GRD의 투수계수 값이 다른 시료들보다 약 10배 정도 더 크게 나타나고, 기타 시료들은 대부분 비슷한 값의 분포를 보인다. 이는 GRD의 경우 3등분한 시료들은 0.033cm~0.050cm의 범위에 해당하는 평균 간극을 가지므로 다른 시료에 비해 큰 단열간극을 나타내기 때문이다.

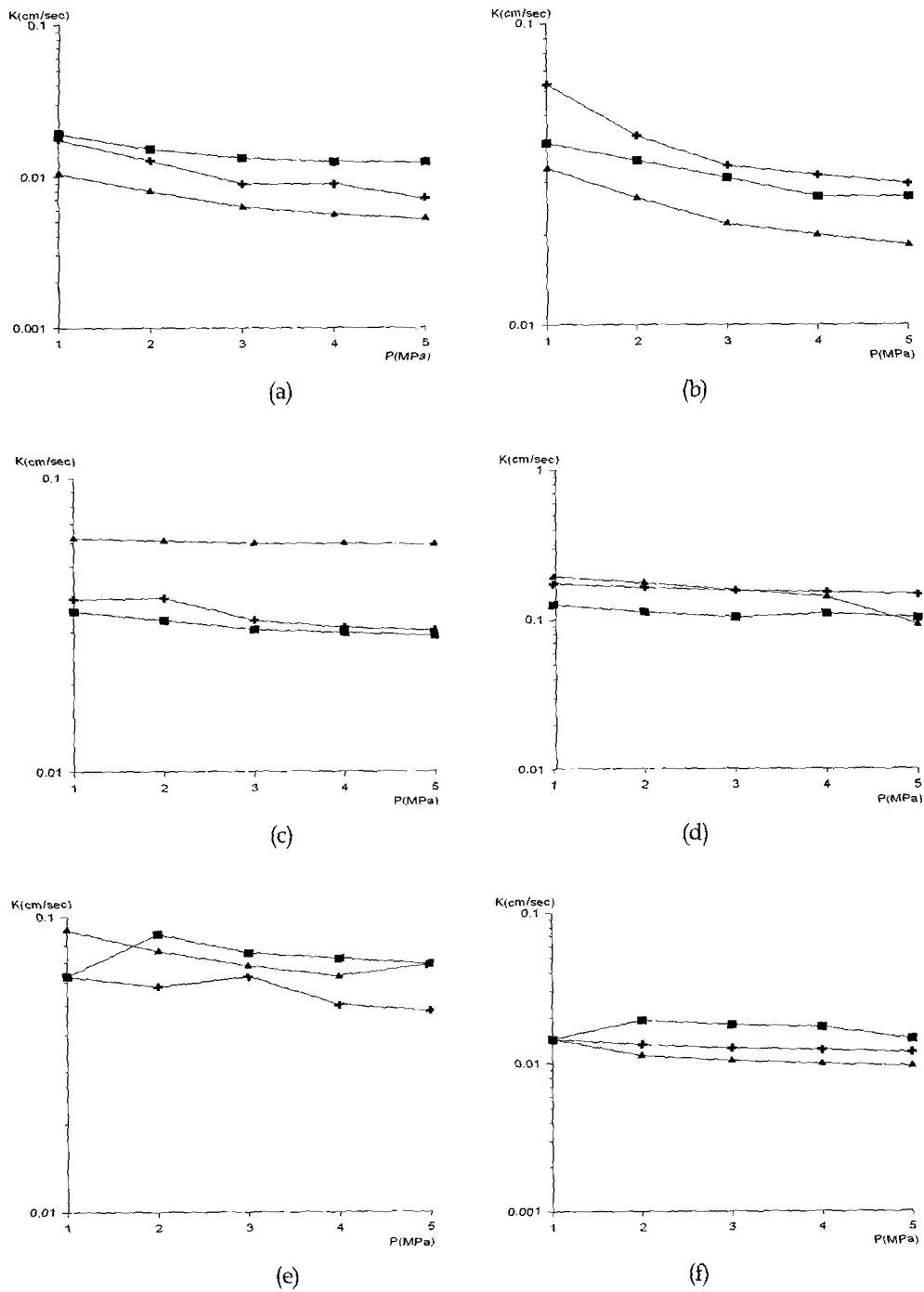


Fig. 5. Relationships between the applied pressure and the calculated permeability coefficients. (a) GRA, (b) GRB, (c) GRC, (d) GRD, (e) GRE, (f) GRF. (+: the first section among the three sliced sections; ■: the second section; ▲: the third section).



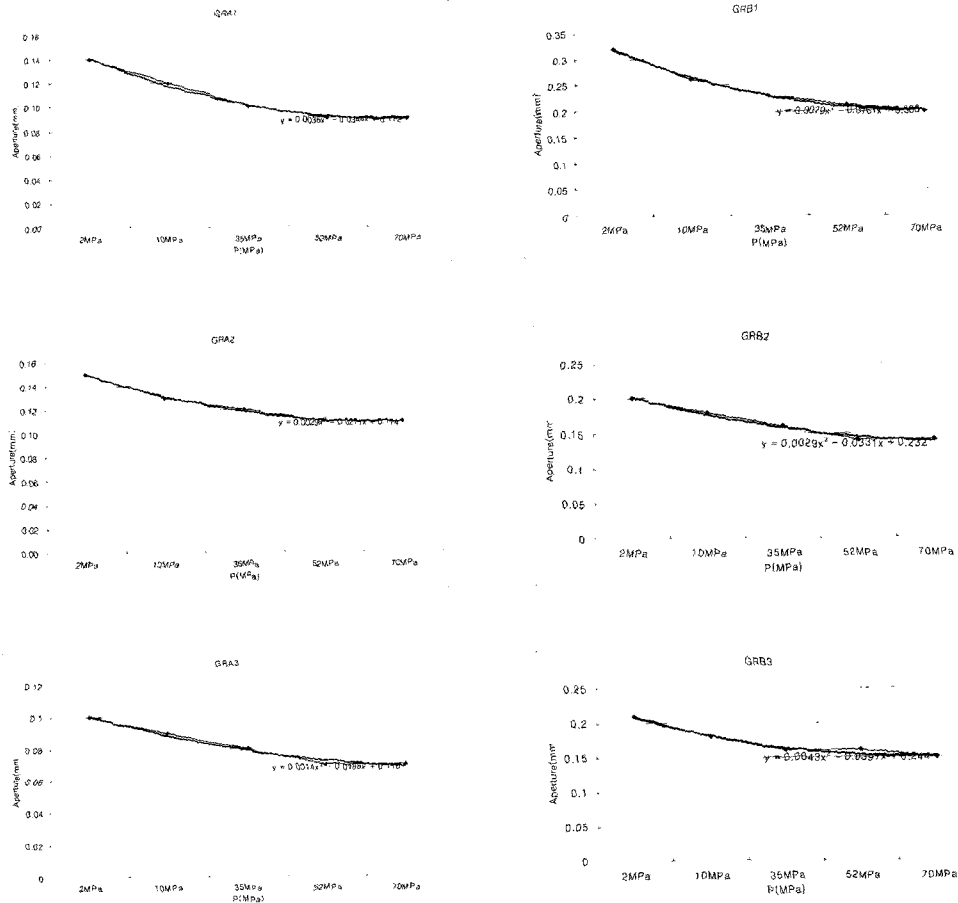


Fig. 6. Examples of relationship between the applied pressure and aperture values.

이 연구에 사용한 시료들은 대체로 압력이 증가함에 따라 일반적으로 투수계수가 감소하는 양상을 나타낸다. 즉, 압력이 증가하면 간극이 감소하므로, 단열 내부를 따른 투수성도 감소함을 보여준다(Fig. 5). 그러나, 시료별로 압력에 따른 투수계수 감소 비율이 일정하지 않으며, GRC3, GRD1, GRF1, GRF3 시료 등은 압력이 증가하더라도 투수계수의 변화가 거의 없다. 이 시료들의 간극측정 결과를 살펴보면, 압력 증가에 따른 간극변화가 거의 없는 시료들이다. 따라서, 간극의 변화가 미약함으로 인해 투수계수도 큰 변화를 보

이지 않은 것으로 설명할 수 있다. 한편, 일부 시료는 압력이 증가함에도 불구하고 오히려 투수계수가 증가하는 양상을 나타낸다. 이와 같은 양상은 GRE에서 두드러지게 나타나서 매우 불규칙적인 관계를 보인다. 그 외에도 GRA1, GRB2, GRD2, GRF2 시료에서도 압력이 증가함에 따른 투수계수의 상승 현상이 나타났다. Chae et al. (2003)에 의하면, 이 시료들에서는 압력이 증가하면서 특정 단계에서는 미세한 전단변이가 발생하였거나, 새로운 미소 균열(micro crack)이 발생한 관계로 간극이 일시적으로 증가한 양상이 관찰되

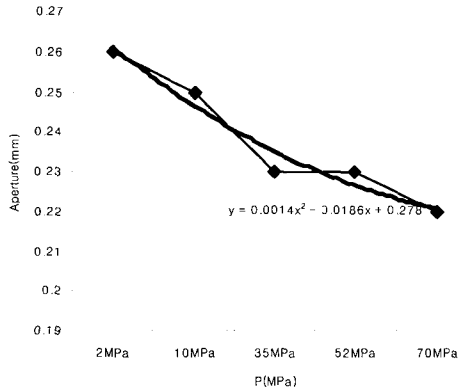


Fig. 7. Relationship between the averaged aperture and pressure (after Kim, 2003).

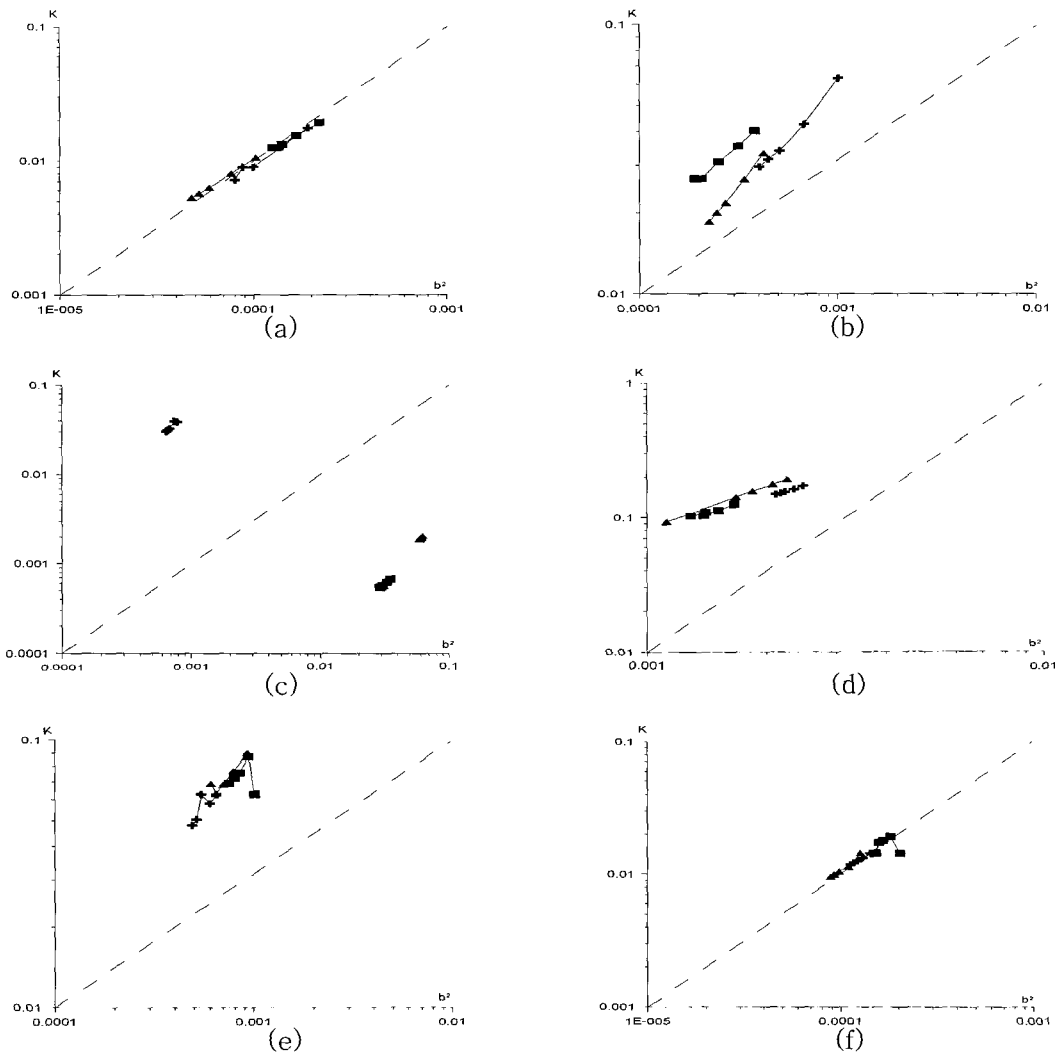
었다. 따라서, 압력 증가에 따른 불규칙적인 투수계수 증가 현상은 이러한 관찰결과와 잘 일치한다. 이와 같은 양상은 간극의 변화가 투수성에 직접적으로 미치는 영향이 크다는 것을 잘 설명해 준다.

### 토 의

이 연구에서 사용한 시료의 간극 측정값을 토대로 압력증가에 대한 간극변화 관계를 도출해 보았다(김성호, 2003). 각 압력 단계별로 측정된 값을 평균하여 그래프로 나타내고(Fig. 6), 이 그래프를 토대로 압력과 간극 간의 관계를 2차 방정식으로 표현하였다. 간극변화 값이 일정하지 않기 때문에 시료 별로 평균을 취한 값 역시 일정한 변화율을 보이지 않기 때문에 2차식으로 표현된다. 그런데, 이 연구에서 사용한 시료는 지표 하에서 채취한 시추코아 중 단일 수직 단열에서 채취

Table 1. Permeability coefficients of each specimen calculated by the homogenization analysis method. Unit of the permeability coefficient is cm/sec.

Specimen	GRA1	GRA2	GRA3	GRD1	GRD2	GRD3
1	1.76E-02	1.93E-02	1.05E-02	1.73E-01	1.26E-01	1.94E-01
2	1.28E-02	1.53E-02	8.05E-03	1.64E-01	1.13E-01	1.77E-01
3	9.00E-03	1.33E-02	6.33E-03	1.56E-01	1.04E-01	1.57E-01
4	9.00E-03	1.26E-02	5.68E-03	1.52E-01	1.10E-01	1.42E-01
5	7.18E-03	1.25E-02	5.27E-03	1.48E-01	1.03E-01	9.26E-02
Specimen	GRB1	GRB2	GRB3	GRE1	GRE2	GRE3
1	6.32E-02	4.03E-02	3.33E-02	6.27E-02	6.27E-02	8.99E-02
2	4.27E-02	3.53E-02	2.66E-02	5.80E-02	8.71E-02	7.64E-02
3	3.39E-02	3.10E-02	2.18E-02	6.27E-02	7.55E-02	6.82E-02
4	3.16E-02	2.68E-02	2.00E-02	5.04E-02	7.23E-02	6.31E-02
5	2.96E-02	2.68E-02	1.85E-02	4.80E-02	6.91E-02	6.91E-02
Specimen	GRC1	GRC2	GRC3	GRF1	GRF2	GRF3
1	3.87E-02	3.52E-02	6.24E-02	1.44E-02	1.44E-02	1.44E-02
2	3.91E-02	3.29E-02	6.11E-02	1.33E-02	1.92E-02	1.13E-02
3	3.28E-02	3.06E-02	5.99E-02	1.25E-02	1.78E-02	1.04E-02
4	3.11E-02	2.98E-02	5.98E-02	1.22E-02	1.73E-02	9.94E-03
5	3.03E-02	2.91E-02	5.94E-02	1.18E-02	1.44E-02	9.54E-03



**Fig. 8.** Relationships between permeability coefficients and aperture square. Permeability coefficients do not always follow the theoretical relationship of the cubic law that is displayed as the dashed line. a) GRA, (b) GRB, (c) GRC, (d) GRD, (e) GRE, (f) GRF. (+: the first section among the three sliced sections; ■: the second section; ▲: the third section).

**Table 2.** Permeability coefficients of GRA on each pressure level calculated using mean aperture value.

	1	2	3	4	5
K(cm/sec)	1.63E-02	1.22E-02	9.49E-03	8.56E-03	7.98E-03

한 것이다. 따라서, 실제 지표 하에서 이 단열 전체에 압력이 가해 질 경우 단열 전체가 압력에 대해 반응하는 간극양상을 예측해 볼 필요가 있다. 이를 위해 각 시료의 평균 간극과 관계식을 동시에 그래프 상에 표현하면 Fig. 7과 같이 나타나고, 이를 통해 단열 전체의 압력에 대한 간극의 관계는 다음과 같다.

$$a(y) = 0.0014p^2(x^2) - 0.0186p(x) + 0.278 \quad (1)$$

여기서  $p(x)$ 는 깊이  $x$ 에 따른 압력(MPa)을 의미하고,  $a(y)$ 는 간극 값(mm)을 나타낸다. 이 식은 불평탄한 단열을 대상으로 간극 평균값을 이용하여 도출한 것이므로, 실제로는 약간의 오차가 발생할 수 있는데 예상되는 오차는 0.1~0.5mm 범위이다.

한편, 각 시료별 투수계수는 다양한 투수계수 분포를 나타내는데, 특히 동일 시료 내에서도 3등분한 지점별로 각기 다른 투수계수 값이 계산되었다. 이는 투수계수가 간극의 크기와 분포형태에 따라 민감하게 변화함을 지시하는 것으로써, 단열 세부 기하양상에 따라 값이 달라짐을 명확하게 나타낸다. 그런데, GRA1에서부터 GRA3의 각 측정지점별 간극을 이용하여 시료 전체의 평균 간극을 구한 후, 평균 간극을 따른 압력 단계별 투수계수를 구해보면 Table 2와 같다. 이 결과를 Table 1과 비교해 보면, 시료 내부에서는 각 지점별로 투수계수가 다르게 나타나지만, 평균 간극을 통해 계산한 투수계수는 시료 내부에서 변화하는 투수계수를 세밀하게 나타내지 못한다. 즉, 평균 간극과 같은 개략적인 단열 기하정보만을 이용할 경우 단열을 따른 유체의 유동특성을 제대로 파악할 수 없을 가능성이 있다. 그러므로, 압력 내 단열에서의 투수특성 해석 시에는 정확한 단열 기하양상을 인지하여 반영하는 것이 매우 중요하다. 다공질 매질에서와 같이 비교적 균질한 매질을 따른 흐름과는 달리 단열 간극이나 거칠기에 따라 유동경로의 형태가 불규칙적으로 변화할 경우 투수계수가 크게 차이나기 때문에 단열 기하특성의 정확한 분석이 필수적이다(Tsang et al., 1988; Tsang and Tsang, 1987; Tsang and Witherspoon, 1981; Gale, 1982a, Chae, 2003)

측정한 단열 간극과 이를 이용하여 균질화법을 통해 구한 투수계수와의 관계를 살펴보면, 대부분의 시료는 기존에 제안되었던 삼승법칙(cubic law)을 따르지 않는다(Fig. 8). 즉, 평행판 모델을 가정하여 단열을 따른 투수계수는 간극의 제곱에 비례한다는 경험적 이론과는 달리 이 연구에서 수행한 수치해석 결과는 투

수계수와 간극 제곱의 관계를 보이지 않는다. 이는 단열 간극측정 결과에서 이미 나타난 바와 같이 단열 면은 서로 균일한 간극분포가 아니라 측정지점별로 다양한 간극 값을 가지므로 불평탄한 양상을 나타내기 때문이다. 따라서, 평행하지 않은 단열 면을 따른 투수계수 산정에는 삼승법칙을 적용할 수 없음을 알 수 있다. 그러므로, 간극 분포가 각기 다른 단열을 따른 실질적 투수계수를 산정하기 위해서는 과거에 제안된 경험식들에 의존하는 것 보다, 이 연구에서 시도한 바와 같이 단열의 기하양상을 충분히 반영한 수치해석 이론들을 적극적으로 활용하여야 할 필요성이 제기된다.

## 결론

이 연구에서는 간극변화에 따른 단열 기하양상을 충분히 고려한 투수계수를 구하고자 균질화 해석법을 이용하여 투수계수를 산정하였다. 공초점 레이저 스캔 현미경을 이용하여 압력 단계별 간극을 측정된 결과 한개 시료 내에서 각 측정지점별 간극 크기는 모두 다르게 나타나는데, 이는 단열 면 양쪽이 서로 평행하지 않고 불평탄한 양상임을 잘 보여준다. 이를 통해 단열은 평행판이 아님을 입증할 수 있다.

각 시료별로 3등분한 부분에 대해 압력 단계별 간극 양상을 이용하여 단열모델을 각각 작성하고 균질화 해석법을 통해 간극 양상에 따른 투수성 변화를 살펴본 결과 각 시료별로 산정한 투수계수는  $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 의 범위에 분포한다. 시료들은 대체로 압력이 증가함에 따라 일반적으로 투수계수가 감소하는 양상을 나타낸다. 그러나, 시료별로 압력에 따른 투수계수 감소 비율이 일정하지 않고, 일부 시료는 압력이 증가하더라도 투수계수의 변화가 거의 없다. 특히, GRA1, GRB2, GRD2, GRF2 시료의 경우는 압력이 증가함에 따른 투수계수의 상승 현상이 나타나는데, 이 시료들에서는 압력이 증가하면서 특정 단계에서는 미세한 전단변이가 발생하였거나, 새로운 미소 단열이 발생한 관계로 간극이 일시적으로 증가한 양상이 관찰되었다. 따라서, 압력 증가에 따른 불규칙적인 투수계수 증가 현상은 이러한 관찰결과와 잘 일치하며, 이와 같은 양상은 간극의 변화가 투수성에 직접적으로 미치는 영향이 크다는 것을 잘 설명해 준다.

동일 시료 내에서도 3등분한 지점별로 각기 다른 투수계수 값이 계산되었다. 이는 투수계수가 간극의 크기와 분포형태에 따라 민감하게 변화함을 지시하는 것

으로써, 단열 세부 기하양상에 따라 값이 달라짐을 명확하게 나타낸다. 따라서, 평균 간극과 같은 개략적인 단열 기하정보만을 이용할 경우 단열을 따른 유체의 유동특성을 제대로 파악할 수 없을 가능성이 있다. 그러므로, 암석 내 단열에서의 투수특성 해석 시에는 정확한 단열 기하양상을 인지하여 반영하는 것이 매우 중요하다. 측정된 단열 간극과 균질화법을 통해 구한 투수계수와와의 관계를 살펴보면, 대부분의 시료는 기존에 제안되었던 삼승법칙을 따르지 않는다. 따라서, 간극 분포가 각기 다른 단열을 따른 실질적 투수계수를 산정하기 위해서는 이 연구에서 시도한 마와 같이 단열의 기하양상을 충분히 반영한 수치해석 이론들을 활용할 필요가 있다.

### 참고문헌

- 김성호, 2003, 단일균열의 간극변화에 따른 투수특성 연구, 석사학위 논문, 안동대학교, 70p.
- Berkowitz, B. and Braester, C., 1991, Solute transport in fracture channel and parallel plate models, *Geophy. Res. Lett.*, v. 18, 227-230.
- Brown, S. B., 1987, Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness, *J. Geophys. Res.*, v. 92, n. B2, 1337-1347.
- Chae, B. G., 2003, Characterization of hydraulic conductivity in rock fracture, Ph.D. Thesis, Nagoya Univ., Japan, 193.
- Chae, B. G., Ichikawa, Y., Jeong, G. C. and Seo, Y. S., 2003, Aperture of Granite Fracture and Effects for Fluid Flow, *Materials Sci. Res. Int.*, v. 9, n. 4, 270-277.
- Durham, W. B. and Bonner, B. P., 1994, Self-propping and fluid flow in slightly offset joints at high effective pressures, *J. Geophys. Res.*, v. 99, n. B5, 9391-9399.
- Gale, J. E., 1987, Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties, *Proc. 28th U.S. Rock Mech. Symp.*, 1213-1222.
- Gale, J. E., 1982a, Assessing the permeability characteristics of fractured rock, *GSA Special Paper* 189, 163-181.
- Gale, J. E., 1982b, The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships, *Proc. 23rd U.S. Rock Mech. Symp.*, 290-298.
- Gale, J. E., 1990, Hydraulic behavior of rock joints, *Proceedings of the Int'l Symp. on Rock Joints, Norway*, 351-362.
- Gentier, S., Billiaux, D. and Vliet, L., 1989, Laboratory testing of the voids of a fracture, *Rock Mech. Rock Eng.*, v. 22, 149-157.
- Hakami, E., 1992, Joint aperture measurements; An experimental technique, *Proc. Int. Symp. Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, California, U.S.A.*
- Hakami, E. and Barton, N., 1990, Aperture measurements and flow experiments using transparent replicas of rock joints, *Proceedings of the Int'l Symp. on Rock Joints, Norway*, 383-390.
- Hakami, E. and Larsson, E., 1996, Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, v. 33, n. 4, 395-404.
- Hakami, E. and Stephansson, O., 1993, Experimental technique for aperture studies of intersecting joints, *Proc. ISRM Int. Symp. Eurock '93*, 301-308.
- Ichikawa, Y., Kawamura, K., Nakano, M., Kitayama, K. and Kawamura, H., 1999, Unified molecular dynamics and homogenization analysis for bentonite behavior: current results and future possibilities, *Engineering Geol.*, v. 54, n. 1, 21-31.
- Kranz, R. L., Frankel, A. and Engelder, T., 1979, The permeability of whole and jointed Barre Granite, *Eos Trans. AGU*, v. 58, n. 12, 1229.
- Long, R. R., 1961, *Mechanics of solids and fluids*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Neretnieks, I., 1983, A note on fracture flow dispersion mechanisms in the ground, *Water Resources Res.*, v. 19, n. 2, 364-370.
- Olsson, W. A. and Brown, S. R., 1993, Hydromechanical response of a fracture undergoing compression and shear, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, v. 30, n. 7, 845-881.
- Persoff, P. and Pruess, K., 1995, Two-phase flow visualization and relative permeability measurement in natural rough-walled rock fractures, *Water Resources Res.*, v. 31, n. 5, 1175-1186.

- Pyrak-Nolte, L. J., Myer, L. R., Cook, N. G. W. and Witherspoon, P. A., 1987, Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, Proc. 6th Int. Rock Mech. Symp., 225-231.
- Rasmuson, A. and Neretnieks, I., 1986, Radionuclide transport in fast channels in crystalline rock, Water Resources Research, v. 22, 1247-1256.
- Sanchez-Palencia, E., 1980, Non-homogeneous media and vibration theory, Springer-Verlag, 398.
- Snow, D. T., 1965, A parallel plate model of fractured permeable media", Ph.D. Thesis, Univ. of Calif., Berkeley, U.S.A., 331.
- Tsang, Y. W., Tsang, C. F., Neretnieks, I. and Moreno, L., 1988, Flow and tracer transport in fractured media: A variable aperture channel model and its properties, Water Resources Research, v. 24, 2049-2060.
- Tsang, Y. W. and Tsang, C. F., 1987, Channel model of flow through fractured media, Water Resources Research, v. 23, 467-479.
- Tsang, Y. W. and Witherspoon, P. A., 1981, Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress, Jour. Geophys. Res., v. 86, n. B10, 9287-9298.
- Zimmerman, R. W. and Bodvarsson, G. S., 1996, Hydraulic conductivity of rock fractures, Transport in Porous Media, v. 23, 1-30.

투 고 일 2004년 1월 9일

심 사 일 2004년 1월 10일

심사완료일 2004년 2월 26일

---

채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3052

Fax: 042-861-9723

E-mail: bgchae@kigam.re.kr