

## 투수계수 산정을 위한 균질화 해석법의 적용

채병곤\*

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

### Application of the Homogenization Analysis to Calculation of a Permeability Coefficient

Byung-Gon Chae\*

Geological and Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

#### ABSTRACT

Hydraulic conductivity along rock fracture is mainly dependent on fracture geometries such as orientation, aperture, roughness and connectivity. Therefore, it needs to consider fracture geometries sufficiently on a fracture model for a numerical analysis to calculate permeability coefficient in a fracture. This study performed new type of numerical analysis using a homogenization analysis method to calculate permeability coefficient accurately along single fractures with several fracture models that were considered fracture geometries as much as possible. First of all, fracture roughness and aperture variation due to normal stress applied on a fracture were directly measured under a confocal laser scanning microscope (CLSM). The acquired geometric data were used as input data to construct fracture models for the homogenization analysis (HA). Using the constructed fracture models, the homogenization analysis method can compute permeability coefficient with consideration of material properties both in microscale and in macroscale. The HA is a new type of perturbation theory developed to characterize the behavior of a micro inhomogeneous material with a periodic microstructure. It calculates micro scale permeability coefficient at homogeneous microscale, and then, computes a homogenized permeability coefficient (C-permeability coefficient) at macro scale. Therefore, it is possible to analyze accurate characteristics of permeability reflected with local effect of fracture geometry. Several computations of the HA were conducted to prove validity of the HA results compared with the empirical equations of permeability in the previous studies using the constructed 2-D fracture models. The model can be classified into a parallel plate model that has fracture roughness and identical aperture along a fracture. According to the computation results, the conventional C-permeability coefficients have values in the range of the same order or difference of one order from the permeability coefficients calculated by an empirical equation. It means that the HA result is valid to calculate permeability coefficient along a fracture. However, it should be noted that C-permeability coefficient is more accurate result than the preexisting equations of permeability calculation, because the HA considers permeability characteristics of locally inhomogeneous fracture geometries and material properties both in microscale and macroscale.

**Key words :** homogenization analysis, roughness, aperture, confocal laser scanning microscope (CLSM), C-permeability coefficient

#### 요 약 문

암석 내 균열을 따른 수리전도도는 균열의 기하학적 요소, 즉 방향, 간극, 거칠기 그리고 상호 연결도에 주로 좌우된다. 따라서, 균열 내 투수계수를 정확하게 계산하기 위해서는 이와 같은 기하 요소들을 최대한 계산모델에 반영할 필요가 있다. 이 연구에서는 균열 기하양상을 최대한 정확히 반영한 균열모델에서 기존 수치해석과는 다른 새로운 방법인 균질화 해석법(homogenization analysis method)을 이용하여 균열을 따른 투수계수를 구하기 위해 수치해석을 수행

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

원고접수일 : 2004. 1. 16 게재승인일 : 2004. 3. 2

질의 및 토의 : 2004. 6. 30 까지

하였다. 먼저, 공초점 레이저 스캔 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope)을 이용하여 암석시료의 균열 조도와 균열에 가한 수직압축력의 변화에 따른 간극 변화량을 직접 측정하고, 이와 같이 획득한 자료는 균열모델 재현을 위한 입력자료로 사용되었다. 재현된 균열모델을 토대로 한 균질화 해석법은 미시규모(microscale) 매질특성과 거시규모(macro scale) 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 균열 기하양상의 국부적 영향을 고려한 투수특성을 정확히 해석할 수 있다. 균질화법을 이용한 투수계수 산정결과를 기존 연구에서 제안한 경험식과 비교하여 그 타당성을 검증하기 위해 전술한 2차원 균열모델을 이용한 투수계수 계산을 수행하였다. 균열모델은 거칠기(roughness)를 반영하고 동일한 간극을 할당한 평행판 모델을 가정하였다. 계산결과에 의하면, 균질화 해석법에 의해 계산한 C-투수계수는 실내투수시험에 의해 구한 투수계수와 같은 범위의 값을 가지거나  $10^{-1}$  정도의 차이를 보여, 그 계산결과는 타당하다고 볼 수 있다. 그러나, 균질화 해석법은 국부적으로 불균질한 균열 기하양상과 물질특성이 미시규모와 거시규모에서 모두 고려되므로, 이들 특성을 정확히 알고 있을 경우 기존에 제안된 경험식들에 의한 계산결과 보다 균질화 해석법의 결과가 훨씬 정확함을 주목하여야 한다.

**주제어 :** 균질화 해석, 거칠기, 간극, 공초점 레이저 스캔 현미경, C-투수계수

## 1. 서 론

토양과 같은 미고결 물질 대상의 유체유동 모사기술을 바탕으로 개별 균열이나 균열암반에서의 유체유동 특성을 정확히 모사하기 위해 그동안 많은 연구가 시도되었다. 균열의 형태와 매질의 특성에 근거하여 기존연구를 구분하면 크게 5가지로 나타낼 수 있다. 먼저, 균열이 평행판 형태이며 균열주변의 매질은 불투성인 경우를 고려한 유체유동 모사개념이다<sup>1-6)</sup>. 이 모델에서 투수율은 균열 간극의 삼승에 비례한다는 삼승법칙을 도출하였다. 두번째는 평행판 형태의 균열을 배제하고 조도를 고려한 불평탄 균열 형태와 불투수성 매질을 모델로 한 개념이 제시되었다. 이 모델에서는 전체 균열면적에 대해 접촉부분의 비율을 고려하였으며, 조도를 설명하는 마찰력을 고려하였다<sup>1,7-15)</sup>. 세번째는 유체유동 모사시 불평탄한 균열의 기하양상을 정확히 반영할 수 없음을 기인하여 평행판 모델을 가미한 등다공성매질 개념이 도입되었다. 이는 균열부분을 평행한 다공성 매질로 가정하고 이를 통한 투수특성을 밝히려 한 모델이다<sup>16-18)</sup>. 이 모델을 토대로 주변 매질이 투수성인 경우를 모사하기 위한 이중다공성 매질 모델이 제안되기도 하였다<sup>19)</sup>. 그러나 최근에는 실제 암석균열의 기하양상을 최대한 반영하고 이를 정확하게 모사하기 위한 노력들이 주로 실험실 규모로 진행 중이며, 이를 바탕으로 현장규모에 적용하고 있다<sup>3,10,19-27)</sup>.

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<sup>12,20,24)</sup>. 그러므로, 암반 균열을 대상으로 불평탄한 균열 형태와 이에 기인한 간극변화를 정밀하게 측정하고 이를 이용하여 정확한 투수계수를 계산하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 균열 기하양상을 최대한 정확히 반영한 균열모델에서 기존 수치해석과는 다른 새로운 방법을 이용하여 균열을 따른 투수계수를 구하기 위해 수치해석을 수행하였다. 정확한 균열의 조도와 간극측정을 위하여 과거 실험실에서 사용했던 것보다 더 높은 해상도의 공초점 레이저 스캔 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope)을 이용하여 암석시료의 균열 조도를 측정하였다<sup>28)</sup>. 또한, 균열에 가한 일축압축력의 변화에 따른 간극 변화량을 공초점 레이저 스캔 현미경 하에서 직접 측정하였다<sup>29)</sup>. 이와 같이 획득한 균열기하자료를 이용하여 균열모델을 재현하였다. 균열모델을 이용한 수리전도도 계산을 위해서는 미시규모(microscale)의 매질특성과 거시규모(macro scale)의 특성을 동시에 고려하여 수리전도도를 계산할 수 있는 균질화 해석(homogenization analysis)을 이용하였다. 균질화 해석법은 섭동(perturbation) 이론을 적용해 불균질 이방성 매질 내에서도 균질 등방성을 보이는 레벨의 미세구조특성을 나타내는 국소방정식과 거시규모 레벨의 특성을 표시하는 대역방정식을 도입해 미시규모 및 거시규모의 상호 연계된 투수특성을 표현한다. 이를 통해 미시규모의

구조를 정확히 반영한 투수특성 해석이 가능하다.

### 2. 균질화 해석법

균질화 해석법은 섭동이론을 적용한 것으로서, 주기적 미세구조를 가지는 불균질 물질의 거동을 연구하기 위해 개발되었다(Fig. 1)<sup>30-31)</sup>. 이 연구에서는 기본적 이론을 바탕으로 균열 내에서의 유체유동 문제를 해석하기 위해 균질화법을 응용하였다.

균질화 해석법은 미시규모와 거시규모에서의 특성을 동시에 계산하므로 두 종류의 좌표체계를 가진다. 따라서, 미시규모에서의 국부 좌표계를  $y$ , 거시규모의 전체 좌표계는  $x$ 로 정의하여,  $y = x/\epsilon$ 의 관계를 가진다. 여기서  $\epsilon$ 은 미시 파라미터(micro parameter)이며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 거시규모에서 셀(cell)의 크기가 ( $\epsilon Y_1$ ,  $\epsilon Y_2$ )로 할당되면, 미시규모의 단위 셀의 크기는( $Y_1$ ,  $Y_2$ )가 된다. 균질화법은 먼저 다음과 같은 비압축성 Navier-Stokes 방정식에서부터 시작한다.

$$\frac{\partial P^\epsilon}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 V_i^\epsilon}{\partial x_k \partial x_k} + F_i = 0 \quad \text{in } \Omega_{\epsilon f} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_i^\epsilon}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega_{\epsilon f}, \quad V_i^\epsilon = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_{\epsilon f} \quad (2)$$

여기서  $V_i^\epsilon$  : 전단점성  $\eta$ 을 가지는 속도벡터,  $P^\epsilon$  : 압력  
 $F_i$  : 물체력(body force) vector  
 $\Omega_{\epsilon f}$  : 전체 좌표계에서의 유체유동 영역( $\delta\Omega_{\epsilon f}$ : 경계)

이제 다음과 같은 점근전개식을 도입할 수 있는데,

$$\begin{aligned} V_i^\epsilon(x) &= \epsilon^2 V_i^0(x, y) + \epsilon^3 V_i^1(x, y) + K, \\ P^\epsilon(x) &= P^0(x, y) + \epsilon P^1(x, y) + K \end{aligned} \quad (3)$$

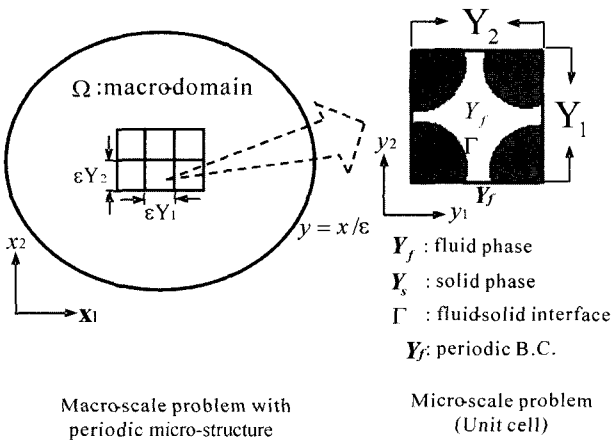


Fig. 1. Schematic concept of the homogenization analysis.

여기서  $V_i^\alpha(x, y)$ 와  $P^\alpha(x, y)$ ( $\alpha = 0, 1, \dots$ )는 단위 셀  $Y$ 의 크기를 갖는  $Y$ 주기함수로서  $V_i^\alpha(x) = V_i^\alpha(x, y + Y)$ ,  $P^\alpha(x, y) = P^\alpha(x, y + Y)$ 와 같다. 전술한 대로  $y = x/\epsilon$ 의 관계를 가지므로 다음과 같이 미분식을 바꿀 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial y_i} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 식(1)에 대입하고  $\epsilon \rightarrow 0$ 으로 하면 다음과 같은 관계식이 도출된다.

$$\epsilon^{-1}\text{-term: } \frac{\partial P_0}{\partial y_i} = 0 \Rightarrow P^0(x, y) = P^0(x, y) \quad \text{in } Y_f \quad (5)$$

$$\epsilon^0\text{-term: } -\frac{\partial P_1}{\partial y_i} + \eta \frac{\partial^2 V_i^0}{\partial y_k \partial y_k} = \frac{\partial P^0}{\partial x_i} - F_i \quad \text{in } Y_f \quad (6)$$

이와 유사하게 식 (3)은 아래와 같이 유도된다.

$$\epsilon^1\text{-term: } \frac{\partial V_i^0}{\partial y_i} = 0 \quad \text{in } Y_f \quad (7)$$

$$\epsilon^2\text{-term: } \frac{\partial V_i^0}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i^1}{\partial y_j} = 0 \quad \text{in } Y_f \quad (8)$$

유체와 고체의 경계면 조건은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$V_i^0 = 0, \quad V_i^1 = 0, K \quad \text{on } \Gamma \quad (9)$$

한편, 식 (6)에 변수분리법을 적용하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_i^0 &= \left( F_k(x) - \frac{\partial P^0(x)}{\partial x_k} \right) v_i^k(y) \\ P^1 &= \left( F_k(x) - \frac{\partial P^0(x)}{\partial x_k} \right) p^k(y) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $v_i^k$  ( $k = 1, 2, 3$ ): 특성속도,  
 $p^k$  ( $k = 1, 2, 3$ ): 특성압력

그러면, 식 (6)은  $y$ 에 대한 편미분방정식으로 변환된다.

$$-\frac{\partial p}{\partial y_i} + \eta \frac{\partial^2 v_i^k}{\partial y_j \partial y_j} + \delta_{ik} = 0 \quad \text{in } Y_f \quad (11)$$

이와 유사한 방법으로 질량보존법칙 (식 (7)), 유체-고체 경계부 조건(식 (9)), 그리고 주기적 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v_i^k}{\partial y_i} = 0 \quad \text{in } Y_f, \quad v_i^k = 0 \quad \text{on } \Gamma \quad (12)$$

$$v_i^k(y) = v_i^k(y + Y), \quad p^k(y) = p^k(y + Y) \quad \text{on } \partial Y_f \quad (13)$$

여기서, 식 (11)-(13)은 미시방정식(micro scale equations;

MiSE)이라고 한다.

이를 바탕으로 식 (11)에 대해 평균화를 실시한다.

$$\bar{V}_i^0 = K_{ji} \left( F_j - \frac{\partial P}{\partial x_j} \right), \quad K_{ji} = V_i' = \frac{1}{|Y|_{Y_f}} \int V_i' dy \quad (14)$$

여기서,  $\bar{V}_i^0$ : 단위셀 ( $|Y|$ ) 내에서 평균물체속도

$K_{ij}$ : 균질화 투수계수(HA-Permeability)

동일한 평균화를 식 (8)에 적용하면,  $V_i'$ 이 주기조건인 관계로 두 번째 항이 소거된다. 따라서, 식 (15)와 같은 거시방정식(macro scale equation; MaSE)이 도출되고, 이를 균질화 흐름 방정식(HA-flow equation)이라 한다.

$$\frac{\partial V_i^0}{\partial x_i} = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{ji} \left( F_j - \frac{\partial P^0}{\partial x_j} \right) \right] = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (15)$$

압력  $P$ 와 속도  $V_i$  식 (3)에 의해 근사적으로 다음과 같이 계산된다.

$$V_i^e(x) \equiv \varepsilon^2 V_i^0(x, y), \quad P^e(x) \equiv P^0(x) \quad (16)$$

위에서 설명한 과정을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 식 (11)-(13)에 해당하는 미시방정식을 풀고,  $v_i^e$ 와  $p^e$ 를 구한 다음, 식 (14)에서  $K_{ij}$ 에 의해 Darcy 계수를 결정한다. 그리고, 식 (15)의 거시방정식을 풀어서 거시 압력(macro pressure)를 구한다. 이를 식 (16)에 대입하여 최종적으로 실제 압력장(pressure field)과 속도장(velocity field)을 구해낸다.

일반적으로는 Darcy 법칙을 아래와 같이 표현하여 왔다.

$$\bar{V}_i' = -K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j}, \quad H = \frac{P}{\rho g} + \zeta \quad (17)$$

여기서,  $\bar{V}_i'$ : 평균 속도,  $H$ : 전 수두,  $P$ : 압력수두  
 $\zeta$ : 위치수두,  $g$ : 중력가속도  
 $\rho$ : 물의 질량(비압축성이므로 일정)

식 (15)-(17)을 비교하면 다음과 같은 대응관계가 있으므로,

$$\bar{V}_i' = \bar{V}_i^e \equiv \varepsilon^2 \bar{V}_i^0 \quad (18)$$

HA-투수계수  $K_{ij}$ 와 통상적으로 사용해 온 C-permeability  $K_{ij}'$  사이에는 아래와 같은 관계를 가짐을 알 수 있다.

$$K_{ij}' = \varepsilon^2 \rho g K_{ij} \quad (19)$$

### 3. 평행판 모델을 이용한 균질화 해석법 검증

균질화법을 이용한 투수계수 산정의 타당성을 검증하기 위해 2차원 균열모델을 이용하여 계산하였다. 균열모델은

거칠기(roughness)는 반영하였으나 균열면 양쪽이 서로 평행한 평행판 모델을 가정하였다. 평행판 모델로 가정한 이유는 균질화법의 계산결과와 삼승법칙(cubic law)에 바탕을 둔 기존의 경험식과 비교하기 위한 것이다.

2차원 균열모델은 공초점 레이저 스캔 현미경(confocal laser scanning microscope; CLSM)을 이용하여 균열의 거칠기(roughness)와 간극(aperture)를 정밀 측정된 결과를 토대로 구현하였다. 먼저, CLSM 관찰을 통해 균열면 양쪽의 거칠기 자료를 정량적으로 직접 측정하였다. 획득한 자료는 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform)을 이용한 스펙트럼 분석을 실시한 후, low pass filter를 이용하여 잡음을 제거하였다. 이를 역 푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 통해 잡음이 제거된 거칠기 자료로 재현하였다<sup>28)</sup>. 재현된 자료는 1 mm 간격으로 다시 샘플링한 후 2차원 균열모델의 거칠기 입력자료로 사용하였다.

평행판 모델의 입력자료로 활용한 또 하나의 자료는 균열 평균 간극(mean aperture)이다. CLSM에 장착된 특수 제작된 압축장치를 이용하여 균열면에 5단계의 수직응력을 가하고, 동시에 CLSM으로 동일 시료에 대한 간극의 변화양상을 연속적으로 측정하였다<sup>29)</sup>. 압력단계별 각 측정지점에서의 간극 값을 토대로 시료별 평균 간극을 구하였고, 특히 Zimmerman과 Bodvarsson(1996)<sup>20)</sup>이 제안한 식 (20)에 의해 수리 간극(hydraulic aperture)를 구한 후, 이를 평균하였다(Table 3 in Chae *et al.*, 2003)<sup>29)</sup>. 이렇게 획득한 두 종류의 평균 간극을 이용하여 거칠기를 고려한 균열모델을 구현하였다(Fig. 2).

$$b_h^3 = \langle b \rangle \left[ 1 - 1.5 \left( \frac{s}{\langle b \rangle} \right)^2 \right] \quad (20)$$

여기서,  $b$ : 물리적 간극  
 $b_h$ : 수리적 간극  
 $s$ : 표준편차

한편, CLSM에서 가한 수직응력과 동일한 크기의 봉압(confining pressure)을 시료에 가하면서 균열을 따른 투수성을 파악하고자 실내투수시험을 실시하였다<sup>29)</sup>. 즉, 균열에 가한 수직응력과 동일한 크기의 봉압이 가해지므로 간극의 크기변화도 CLSM에서 측정한 값과 동일하게 변화

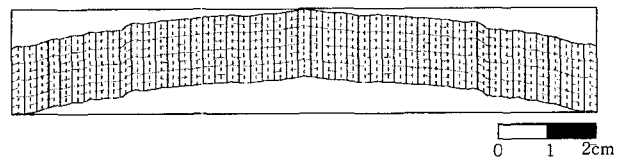


Fig. 2. A parallel plate fracture model used for the HA simulations (10 MPa of GRA). Exaggerated 100 times in vertical direction.

**Table 1.** Results of the laboratory permeability test and hydraulic conductivity

Specimen	Pconf. (MPa)	Time (sec)	Flow rate (cm <sup>3</sup> /sec)	Aperture (cm)	Hydraulic conduct (cm/sec)
GRA	10	48.88	1.023	0.010	2.780E-04
	15	71.50	0.699	0.009	1.367E-04
	20	104.15	0.480	0.009	6.687E-05
GRB	10	19.47	2.568	0.018	9.430E-04
	15	22.45	2.227	0.017	7.616E-04
	20	24.25	2.062	0.016	6.821E-04
GRC	10	4.00	12.500	0.031	1.311E-02
	15	4.84	10.331	0.031	9.066E-03
	20	5.81	8.606	0.030	6.358E-03
GRD	10	2.00	25.000	0.043	3.845E-02
	15	2.14	23.364	0.042	3.424E-02
	20	2.21	22.624	0.038	3.480E-02
GRE	10	4.22	11.848	0.026	1.382E-02
	15	10.94	4.570	0.026	2.122E-03
	20	79.75	0.627	0.025	4.109E-05
GRF	10	165.66	0.121	0.011	8.464E-06
	15	1,182.68	0.017	0.011	1.699E-07
	20	4,032.00	0.005	0.011	1.494E-08

함을 감안하여, 간극 크기와 투수율(flow rate)과의 관계를 파악하고자 하였다. Table 1은 간극 측정결과와 실내투수 시험에서 측정된 투수율과 이를 토대로 Darcy 법칙을 이용한 투수계수 계산 결과를 나타낸 것이다.

이 모델에서 미시규모 경계조건은  $V_x^*$ 와  $P_x$ 의 주기성을 만족해야 하며, 균열면 상에서는 속도가 0이어야 한다.

물의 흐름은 균열 내부에서 발생하므로 암석의 매질은 불투수성이라고 가정한다.

수치해석은 온도조건 300 K일때를 가정하여 수행하였다. 이때 물의 점성  $\eta$ 는  $0.8 \times 10^{-3}$  Pa·sec, 밀도  $\rho$ 는  $0.99651$ g cm<sup>-3</sup>이다. Table 2와 Fig 3은 전술한 균열기하 측정자료를 이용해 균열모델을 구성하고 이를 토대로 균질화 해석

**Table 2.** Permeability values calculated by Darcy's empirical equations ( $K_m^*$ ,  $K_h^*$ ) and the conventional C-permeability ( $K_m'$ ,  $K_h'$ )

Specimen	Pconf. (MPa)	$K_m^*$ (cm/sec)	$K_h^*$ (cm/sec)	$K_m'$ (cm/sec)	$K_h'$ (cm/sec)
GRA	10	2.780E-04	2.845E-04	9.192E-04	9.232E-04
	15	1.367E-04	1.404E-04	8.722E-04	8.271E-04
	20	6.687E-05	6.884E-05	8.105E-04	7.644E-04
GRB	10	9.430E-04	9.630E-04	3.332E-03	3.195E-03
	15	7.616E-04	7.794E-04	2.891E-03	2.754E-03
	20	6.821E-04	6.970E-04	2.646E-03	2.538E-03
GRC	10	1.311E-02	1.401E-02	7.409E-03	6.478E-03
	15	9.066E-03	9.718E-03	7.223E-03	6.292E-03
	20	6.358E-03	6.830E-03	7.076E-03	6.125E-03
GRD	10	3.845E-02	3.872E-02	1.803E-02	1.784E-02
	15	3.424E-02	3.446E-02	1.735E-02	1.715E-02
	20	3.480E-02	3.533E-02	1.480E-02	1.431E-02
GRE	10	1.382E-02	1.390E-02	6.909E-03	6.831E-03
	15	2.122E-03	2.134E-03	6.497E-03	6.419E-03
	20	4.109E-05	4.132E-05	6.203E-03	6.066E-03
GRF	10	8.464E-06	8.541E-06	1.137E-03	1.245E-03
	15	1.699E-07	1.715E-07	1.205E-03	1.186E-03
	20	1.494E-08	1.508E-08	1.156E-03	1.137E-03

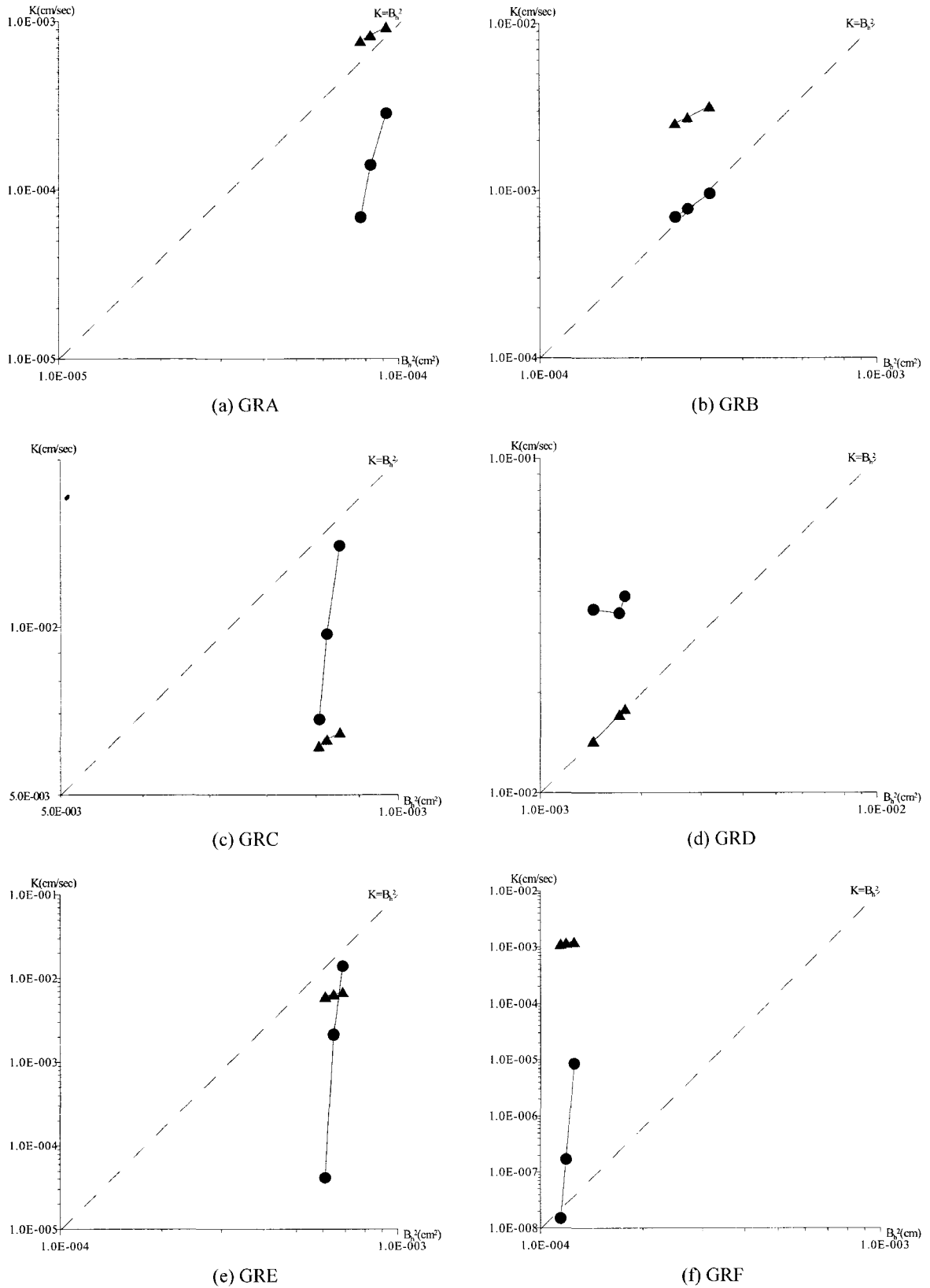


Fig. 3. Comparison of the permeability coefficients acquired by the laboratory water injection test (circle) with the C-permeability coefficients (triangle) calculated by the HA.

법에 의해 계산한 투수계수이다. 여기서  $K_m'$ 과  $K_h'$ 는 CLSM으로 측정된 물리적 간극(mechanical aperture)  $b_m$ 과 식 (20)에 의해 계산한 수리적 간극  $b_h$ 를 이용하여 균질화법으로 계산한 투수계수이고,  $K_m^*$ 과  $K_h^*$ 는 실내투수 시험에서 측정된 투수율과  $b_m$ 과  $b_h$ 를 Darcy 경험식에 대입하여 구한 투수계수이다.

균질화 해석법에 의해 계산한 C-투수계수는 실내투수 시험에 의해 구한 투수계수와 같은 범위의 값을 가지거나  $10^{-1}$  정도의 차이를 보여, 그 계산결과는 타당하다고 볼 수 있다. C-투수계수는 평행판을 통한 물의 흐름이므로, 삼승법칙에서 주장하는 이론적인 투수계수와 간극과의 관계를 대체로 따르는 것을 알 수 있다. 즉, 대부분의 시료들은 압력에 따른 간극 값과 투수계수 값 사이에  $K \propto b_2$ 의 관계를 유지하면서 비례적으로 변화한다. 이를 통해 이 연구에서 사용한 균질화 해석법은 암석 균열을 따른 투수성 산정에 효과적으로 활용할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 토 의

Fig. 3에서 보듯이 실내투수시험에서 구한 투수계수는 삼승법칙의 이론적 관계를 따르지 않는다. 이는 그동안 여러 연구자들이 주장하고 Chae *et al.*(2003)<sup>29</sup>의 결과에서 나타난 대로, 균열면 자체는 평행하지 않고 불평탄한 형태를 가지고 있으므로 평행판을 가정한 삼승법칙의 이론적 관계와 차이가 있기 때문이다. 즉, 이 연구에서 사용한 균열은 불평탄한 균열이므로 실내투수시험을 통해 구한 투수계수는 균열의 거칠기와 국부적으로 다른 간극의 영향을 포함한 결과이다.

또한, Fig. 3의 C-투수계수는 엄격히 말해 삼승법칙의 이론적 관계를 완벽하게 따르지는 않는다. Fig. 2의 균열 모델은 동일한 간극을 가지고 있어 평행판 모델로 간주할 수는 있지만, 균열면이 굴곡을 가진 거칠기를 포함하고 있다. 전통적으로 평행판 모델에서는 균열면에 거칠기가 없는 평평한 면의 상태를 가정하였다. 그러나, 이 연구에서는 균열이 거칠기를 가진 평행판 모델을 가정하였으므로, 유체 유동시 균열면 인근의 경계부에서는 난류(turbulent flow)의 영향을 받을 수 있다. 이러한 이유 때문에 균질화 해석법에 의해 구한 C-투수계수는 삼승법칙의 이론적 관계를 철저히 따르지 않고 약간의 차이가 발생한 것으로 생각된다. 이와 같은 점을 감안하면 삼승법칙은 실제 자연계에 존재하는 균열을 따른 투수특성을 정확히 반영하기 어려움을 알 수 있다.

이 연구에서 제안한 균질화 해석법은 균열의 기하양상

을 정확하게 반영할 수 있음을 주목할 필요가 있다. 국부적으로 불균질한 균열 기하양상과 물질특성이 미시규모와 거시규모에서 모두 고려되므로, 균열의 국부적 기하양상과 물질특성을 정확히 알고 있을 경우, 균질화 해석법은 기존에 제안된 경험식들에 의한 계산결과 보다 훨씬 정확한 결과를 도출해 낼 수 있다. 따라서, 실제 자연계에서 수집한 복합적인 균열을 따른 투수특성 평가에 균질화 해석법은 효과적이며 정확한 결과를 가져올 수 있을 것이다.

#### 5. 결 론

균열의 기하양상을 정확히 반영하여 균열을 따른 투수 특성을 파악하고자 균질화 해석법을 도입하여 투수계수를 산정하였다. 균질화 해석법은 섭동이론을 적용한 것으로서, 주기적 미세구조를 가지는 불균질 물질의 거동을 연구하기 위해 개발되었다. 균질화법은 미시규모와 거시규모에서의 특성을 동시에 계산하므로, 불균질한 기하양상과 물질 특성을 갖는 조건에서 정확한 해석결과를 도출할 수 있다. 균질화법을 이용한 투수계수 산정의 타당성을 검증하기 위해 2차원 균열모델을 이용한 투수계수 계산을 수행하였다. 균열모델은 거칠기(roughness)는 반영하였으나 균열면 양쪽이 서로 평행한 평행판 모델을 가정하였으며, 그 이유는 균질화법의 계산결과와 삼승법칙(cubic law)에 바탕을 둔 기존의 경험식과 비교하기 위한 것이다. 균질화 해석법에 의해 계산한 C-투수계수는 실내투수시험에 의해 구한 투수계수와 같은 범위의 값을 가지거나  $10^{-1}$  정도의 차이를 보여, 그 계산결과는 타당하다고 볼 수 있다. 또한, C-투수계수는 삼승법칙에서 주장하는 이론적인 투수계수와 간극과의 관계를 대체로 따르는 것을 알 수 있어, 암석 균열을 따른 투수성 산정에 균질화 해석법을 효과적으로 활용할 수 있는 것으로 생각된다. 단, 균질화 해석법은 국부적으로 불균질한 균열 기하양상과 물질특성이 미시규모와 거시규모에서 모두 고려되므로, Chae *et al.*(2004)<sup>28</sup>와 Chae *et al.*(2003)<sup>29</sup>에서 사용한 방법 등을 통해 이들 특성을 정확히 알고 있을 경우 기존에 제안된 경험식들에 의한 계산결과 보다 균질화 해석법의 결과가 훨씬 정확함을 주목하여야 한다.

#### 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-2-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Rehshaw, C.E., "On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures", *Jour. Geophys. Res.*, 100(B12), pp. 24629-24636 (1995).
2. Tsang, Y.W., and Witherspoon, P.A., "Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress", *Jour. Geophys. Res.*, **86**(B10), pp. 9287-9298 (1981).
3. Kranz, R.L., Frankel, A., and Engelder, T., "The permeability of whole and jointed Barre Granite", *Eos Trans. AGU*, **58**(12), pp. 1229 (1979).
4. Louis, C.A., "A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses", *Rock Mech. Res. Report*, **10** (1969).
5. Snow, D.T., "A parallel plate model of fractured permeable media", Ph.D. Thesis, Univ. of Calif., Berkeley, U.S.A., p. 331 (1965).
6. Long, R.R., "Mechanics of solids and fluids", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. (1961).
7. Piggott, A.R., and Elsworth, D., "Analytical models for flow through obstructed domains", *Jour. Geophys. Res.*, **97**(B2), pp. 2085-2093 (1992).
8. Zimmerman, R.W., Chen, D., and Cook, N.G.W., "The effect of contact area on the permeability of fractures", *Jour. Hydrology*, **139**(1-4), pp. 79-96 (1992).
9. Thompson, M.E., and Brown, S.R., "The effect of anisotropic surface roughness on flow and transport in fractures", *Jour. Geophys. Res.*, **96**(B13), pp. 21, 923-21, 932 (1991).
10. Cook, A.M., Myer, L.R., Cook, N.G.W., and Doyle, F.M. "The effects of tortuosity on flow through a natural fracture", *Proc. 31st U.S. Symp. Rock Mech.*, pp. 371-378 (1990).
11. Pyrak-Nolte, L.J., Cook, N.G.W., and Nolte, D.D., "Fluid percolation through single fractures", *Geophys. Res. Lett.*, **15**(11), pp. 1247-1250 (1988).
12. Brown, S.R., "Fluid flow through rock joints; The effect of surface roughness", *Jour. Geophys. Res.*, **92**(B2), pp. 1337-1347 (1987).
13. Tsang, Y.W., and Witherspoon, P.A., "The dependence of fracture mechanical and fluid flow properties on fracture roughness and sample size", *Jour. Geophys. Res.*, **88**(B3), pp. 2359-2366 (1983).
14. Neuzil, C.E., and Tracy, J.V., "Flow through fractures", *Water Resour. Res.*, **17**(1), pp. 191-199 (1981).
15. Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K., and Gale, J.E., "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture", *Water Resour. Res.*, **16**(6), pp. 1016-1024 (1980).
16. Brown, S.R., "Transport of fluid and electric current through a single fracture", *Jour. Geophys. Res.*, **94**(B7), pp. 9429-9438 (1989).
17. Paillet, F.L., Hess, A.E., Cheng, C.H., and Hardin, E., "Characterization of fracture permeability with high resolution vertical flow measurements during borehole pumping", *Ground Water*, **25**(1), pp. 28-40 (1987).
18. Walsh, J.B., and Brace, W.F., "The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock", *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **18**, pp. 429-435 (1984).
19. Taylor, W.L., Pollard, D.D., and Aydin, A., "Fluid flow in discrete joint sets: Field observations and numerical simulations", *Jour. Geophys. Res.*, 104(B12), pp. 28,983-29,006 (1999).
20. Zimmerman, R.W., and Bodvarsson, G.S., "Hydraulic conductivity of rock fractures", *Transp. Porous Media*, **23**, pp. 1-30 (1996).
21. Olsson, W.A., "The effect of slip on the flow of fluid through a fracture", *Geophys. Res. Lett.*, **19**(6), pp. 541-543 (1992).
22. Gale, J.E. "Hydraulic behavior of rock joints", *Proc. Int. Symp. Rock Joints*, pp. 351-362 (1990).
23. Pyrak-Nolte, L.J., Myer, L.R., Cook, N.G.W., and Witherspoon, P.A. "Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock", *Proc. Int. Congr. Rock Mech.*, **6**(1), pp. 225-231 (1987).
24. 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).
25. Gale, J.E. "The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships", *Proc. 23rd U. S. Symp. Rock Mech.*, pp. 290-298 (1982).
26. Trimmer, D., Bönner, B., Heard, H.C., and Duba, A., "Effect of pressure and stress on water transport in intact and fractured gabbro and granite", *Jour. Geophys. Res.*, **85**(B12), pp. 7059-7071 (1980).
27. Iwai, K., "Fundamental studies of fluid flow through a single fracture", Ph.D. Thesis, Univ. of Calif., Berkeley, U.S.A., (1976).
28. Chae, B.G., Ichikawa, Y., Jeong, G.C., Seo, Y.S., and Kim, B.C., "Roughness measurement of rock discontinuities using a confocal laser scanning microscope and the Fourier spectral analysis", *Engineering Geol.* **72**, pp. 181-199 (2004).
29. 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).
30. Sanchez-Palencia, E., "Non-homogeneous media and vibration theory", Springer-Verlag, p. 398 (1980).
31. 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).