

JRC 등급에 따른 절리면 수리특성 연구

채병곤¹⁾ · 서용석^{*2)} · 김지수²⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

²⁾충북대학교 지구환경과학과 · 기초과학연구소

A Study on Hydraulic Characteristics of Rock Joints Dependant on JRC Ranges

Byung-Gon Chae¹⁾ · Yong-Seok Seo^{*2)} · Ji-Soo Kim²⁾

¹⁾Geological and Environmental Hazards Div., Koea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²⁾Dept. of Earth & Environmental Sci. & Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University

이 연구에서는 암반 내 절리면의 거칠기 정도에 따른 수리특성의 차이를 규명하고자 Barton(1976)이 제안한 절리면 거칠기 계수(Joint Roughness Coefficient; JRC) 등급별로 투수계수를 산정하였다. 이를 위하여 JRC 등급 형태별로 고속 푸리에 변환을 이용한 스펙트럼 분석을 실시하여 각 거칠기 등급별로 영향력이 큰 주파수 성분을 추출하였다. 스펙트럼 분석결과 낮은 JRC 등급을 갖는 절리들이 높은 등급의 절리들보다 저주파 성분이 더 강하게 구성되어 있으며, 높은 JRC 등급의 절리들은 상대적으로 고주파 성분이 더 크게 차지하는 것을 알 수 있었다. 스펙트럼 성분 중에서 영향력이 큰 주파수 성분만을 이용하여 푸리에 역변환을 실시해 JRC 등급별 절리 모델을 생성하였다. 생성된 절리 모델은 거칠기 성분을 포함한 모델로써, 균질화 해석기법을 이용하여 각 모델의 투수계수를 산정하였다. 균질화 해석법은 섭동이론을 적용한 것으로서, 미시규모(microscale) 매질특성과 거시규모(macro scale) 매질특성을 동시에 고려하여 투수계수를 계산할 수 있으므로 균열 기하양상의 국부적 영향을 고려한 투수특성을 정확히 해석할 수 있다. 균질화 해석법을 이용해 투수계수를 산정한 결과, 절리 간극이 동일한 평행판 모델을 가정한 JRC 등급별 투수계수는 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/sec의 범위에 분포한다. 반면, 전단변형이 발생한 것을 가정한 모델에서는 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ m/sec의 범위에 투수계수가 분포한다. 이 경우는 투수계수 분포가 일정한 변화양상을 보이지 않고 JRC 등급에 따라 불규칙적인 투수계수 분포를 보인다. 동일한 크기의 간극을 갖는 경우임에도 불구하고 JRC 등급별로 투수계수의 차이가 발생하거나 전단변위에 따라 투수계수가 불규칙적으로 분포하는 것은 거칠기 변화가 투수계수의 변화에 영향을 미침을 지시하는 것으로서, 이 연구를 통해 암반 내 절리 등 균열을 따른 수리특성 규명에 있어 절리면 거칠기의 영향은 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

주요어: 절리면 거칠기 계수, 스펙트럼분석, 균질화 해석법, 투수계수

In order to characterize hydraulic property dependant on joint roughness in rock mass, this study computed permeability coefficients on each range of joint roughness coefficient (JRC) suggested by Barton(1976). For a quantitative analysis of roughness components spectral analysis using the fast Fourier transform was performed to select effective frequencies on each JRC range. The results of spectral analyses show that low ranges of the JRC are mainly composed of low frequency domain, while high ranges of the JRC have dominant components at high frequency domain. The inverse Fourier transform made it possible to generate joint models of each JRC range using the effective frequencies of roughness spectrum. The homogenization analysis was applied to calculate permeability

* Corresponding author : ysseo@cbu.ac.kr

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. According to the calculation results, permeability coefficients were distributed between 10^{-3} m/sec and 10^{-4} m/sec. In cases of sheared joint models permeability coefficients were plotted between 10^{-4} m/sec and 10^{-5} m/sec, showing irregular distribution of permeability coefficients on each JRC range. The differences of permeability coefficients for the same aperture models or for the sheared joint models indicate that changes of roughness pattern influence on permeability coefficients. Therefore, the effect of joint roughness should be considered to characterize hydraulic properties in rock joints.

Key words : Joint roughness coefficient, Spectral analysis, Homogenization analysis, Permeability coefficient

서 론

암반 절리면의 전단강도와 수리역학적 특성 및 투수 계수 등은 절리면의 거칠기에 영향을 받는다는 사실은 많은 학자들에 의하여 널리 알려져 있다. 따라서 절리면의 특성을 정량화하고자 하는 연구도 많이 시도되고 있다. 국제암반역학회(Brown, 1981)는 절리면의 거칠기를 작은 규모의 거칠기(unevenness)와 큰 규모의 거칠기(waviness)로 구분하여 표준단면 9개를 제시하면서 절리면 구분을 제안하였다. Barton(1976)에 의하여 제시된 절리면 거칠기 계수(Joint Roughness Coefficient; JRC)는 절리면 거칠기를 정량적으로 표현하는 대표적인 방법 중의 하나로 광범위하게 이용되고 있다. 절리면 거칠기는 낮은 수직 유효응력 하에서 암석 절리면의 전단강도에 미치는 영향이 대단히 큰 요소 중의 하나이므로 많은 연구자들에 의하여 연구가 진행되고 있다(Ladanyi & Archambault, 1970; Barton & Choubey, 1977; Kusumi et al., 1997; Grasselli & Egger, 2003). 이들 연구의 대부분은 절리면 거칠기 계수를 변수로 사용하여 절리면 전단강도 산정식을 제안하고 있다. 절리면 거칠기가 수리역학적 특성에 미치는 영향을 정확히 기술하기 위하여 Zhao(1997)는 JRC와 함께 Joint Matching Coefficient(JMC)를 고려할 것을 제안하고 있다. Lee et al.(1995)은 균열암반의 투수계수를 산정하면서 균열의 JRC, JCS 및 응력분포를 변수로 하는 균열간극 함수를 사용하고 있다. Chae et al.(2003)은 화강암 균열을 현미경 규모에서 정밀하게 측정하여 이를 정량화하고 수치모델에 적용하여 투수계수 산정을 시도하였다. 이와 같이 절리면 거칠기를 정량화하기 위한 노력은 오랫동안 계속해서 이어지고 있으며, 절리면 거칠기 요소를 변수로 하는 투수계수 산정 분야도 중요한 연구테마 중의 하나이다.

이 연구에서는 암반 내 유체유동에 있어 절리면 거칠기의 영향을 파악하기 위하여 Barton(1976)이 제안한 절리면 거칠기 계수의 10개 등급별 투수계수를 산정하였다. 이를 위해 먼저 거칠기 계수 등급 형태별로 스펙트럼 분석을 실시하여 각 거칠기 등급별로 영향력이 큰 주파수 성분을 추출한 후, 이를 토대로 절리 모델을 생성하였다. 생성된 절리 모델은 거칠기 성분을 포함한 모델로써, 균질화 해석기법을 이용하여 각 모델의 투수계수를 산정하였다.

스펙트럼 분석을 통한 JRC 단면의 정량적 거칠기 특성 해석

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.

JRC 등급별 형상(Fig. 1)을 토대로 이를 디지털화(digitizing)하여 각 형상별 절리면의 좌표를 획득한 후 이 자료를 이용하여 고속 푸리에 변환을 수행하였다. 그 결과 각 등급별로 다양한 스펙트럼 양상이 나타났으며(Fig. 2), 전반적으로 낮은 등급의 절리면 거칠기가 높은 등급의 것들보다 상대적으로 저주파 부분이 더 우세한 양상을 보인다. 반대로 높은 등급의 절리면 거칠기는 고주파 부분의 성분이 저주파 부분에 비해 더 높은 스펙트럼 값을 가진다.

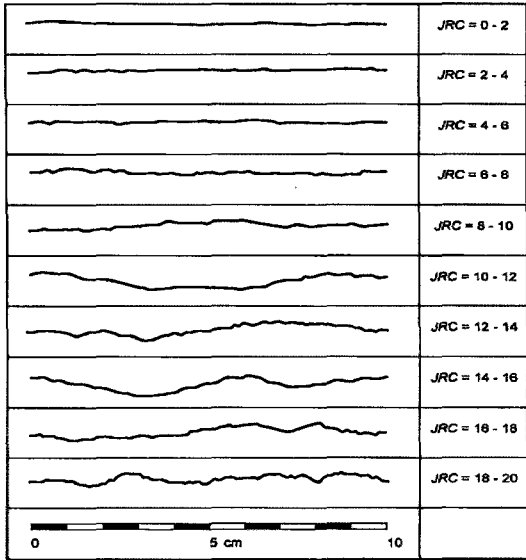


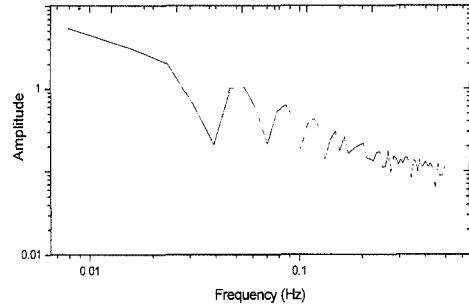
Fig. 1. Roughness profiles and corresponding JRC values (Barton & Choubey, 1977).

절리면 거칠기 계수의 전체 등급에 대해 이와 같이 스펙트럼 분석을 실시한 후, 영향력이 큰 주파수 성분만을 선택하고 푸리에 역변환을 수행하여 거칠기를 재현하였다. 거칠기 구성성분 중 영향력이 큰 주파수 성분은 거칠기 전체양상을 대부분 제어하는 것이므로, 이들 성분만을 이용하여 거칠기를 재현하더라도 전체 거칠기 양상은 큰 차이가 발생하지 않는다(채병곤, 2004). 이렇게 재현한 절리면 거칠기는 절리를 통한 유체 유동특성 해석의 절리모형 입력자료로 이용되었다.

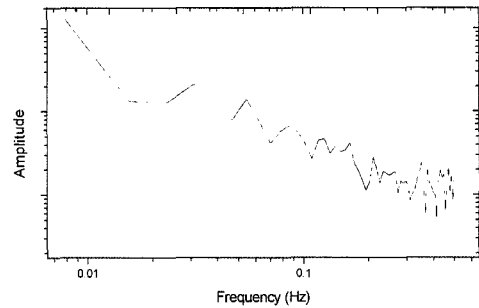
절리 투수계수 산정을 위한 균질화 해석법

전술한 바대로 JRC 등급별로 작성한 절리모형을 따른 유체유동 특성을 해석하기 위해 균질화 해석법을 이용하여 투수계수를 계산하였다. 균질화 해석법은 섭동이론을 적용한 것으로서, 주기적 미세구조를 가지는 불균질 물질의 거동을 연구하기 위해 개발되었다(Fig. 3, Sanchez-Palencia, 1980; Ichikawa et al., 1999).

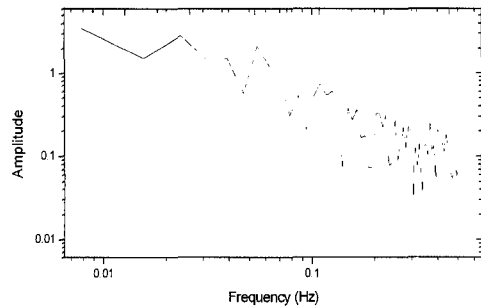
균질화 해석법은 미시규모와 거시규모에서의 특성을 동시에 계산하므로 두 종류의 좌표체계를 가진다. 그러므로 미시규모에서의 국부 좌표계를 y , 거시규모의 전체 좌표계는 x 로 정의하여, $y=x/\epsilon$ 의 관계를 가



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Spectra of joint roughness. (a) JRC range 0-2, (b) JRC range 8-10, (c) JRC range 18-20.

진다. 여기서 ϵ 은 미시 파라메터(micro parameter)이며, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 거시규모에서 셀(cell)의 크기가 $(\epsilon Y1, \epsilon Y2)$ 로 할당되면, 미시규모의 단위 셀의 크기는 $(Y1, Y2)$ 가 된다. 균질화법은 식(1)과 같은 비압축성 Navier-Stokes 방정식에서부터 시작한다.

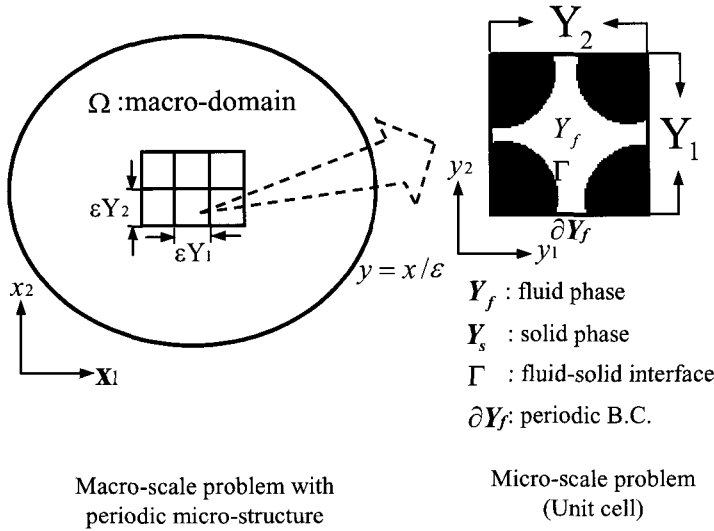


Fig. 3. Schematic concept of the homogenization analysis.

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

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

V_i^ε : 전단점성 η 을 가지는 속도벡터

P^ε : 압력

F_i : 물체력(body force) 벡터

Ω_{ef} : 전체 좌표계에서의 유체유동 영역

($\partial\Omega_{ef}$: 경계).

이를 기본으로 식(3)과 같은 점근전개식을 도입할 수 있는데,

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

여기서 $V_i^\alpha(x, y)$ 와 $P^\alpha(x, y)$ ($=0, 1, \dots$)는 단위 셀 Y 의 크기를 갖는 Y -주기함수이다. 전술한 대로 $y=x/\varepsilon$ 의 관계를 가지므로 다음과 같이 미분할 수 있다.

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

식 (3)과 (4)를 식(1)에 대입하고 $\varepsilon \rightarrow 0$ 으로 하면,

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

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

이다.

또한, 식 (3)은 아래와 같이 유도된다.

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

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

식 (9)는 유체와 고체의 경계면 조건이다.

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

한편, 식 (6)에 변수 분리법을 적용하고 y 에 대한 편미분방정식으로 변환하면 식 (10)과 같다

$$-\frac{\partial p^k}{\partial y_i} + \eta \frac{\partial^2 v_i^k}{\partial y_j \partial y_j} + \delta_{ik} = 0 \quad \text{in } Y_f \quad (10)$$

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

$$\frac{\partial v_i^k}{\partial y_i} = 0 \quad \text{in } Y_f, \quad v_i^k = 0 \quad \text{on } \Gamma, \quad (11)$$

$$v_i^k(y) = v_i^k(y+Y), \quad p^k(y) = p^k(y+Y) \quad \text{on } \partial Y_f \quad (12)$$

이때, 식 (10)-(12)는 미시방정식(micro scale equations; MiSE)이라고 한다.

이를 바탕으로 식 (10)에 대해 평균화를 실시한다.

$$\tilde{V}_i^0 = K_{ji} \left(F_j - \frac{\partial P^0}{\partial x_j} \right),$$

$$K_{ji} = \tilde{v}_i^j = \frac{1}{|Y|} \int_{Y_f} v_i^j dy, \quad (13)$$

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

K_{ij} : 균질화 투수계수(HA-Permeability)

동일한 평균화를 식 (8)에 적용하면, V_i^1 이 주기조 건인 관계로 두 번째 항이 소거된다. 따라서, 식 (14)와 같은 거시방정식(macro scale equation; MaSE)이 도출

되고, 이를 균질화 흐름 방정식(HA-flow equation) 이라 한다.

$$\frac{\partial \tilde{V}_i^0}{\partial x_i} = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ji} \left(F_j - \frac{\partial P^0}{\partial x_j} \right) \right] = 0 \quad \text{in } \Omega. \quad (14)$$

균질화 해석에 의한 절리면 투수계수 산정

평행판 모델

전술한 균질화 해석법을 이용하여 JRC 등급별 투수 계수를 계산하였다(Fig. 4). 계산시 적용된 조건은 절리면 양쪽이 동일한 유형의 거칠기를 가지며, 0.1mm 의 간극을 갖는 것으로 설정하였다. 즉, 절리모델은 평행판 모델에 해당하지만 절리면에 평탄한 양상이 아닌 거칠기를 갖는 형태이다. 이는 비교적 신선한 암반의 절리면에 충전물이 없는 경우를 가정한 것으로서, 간극이 넓은 경우나 절리면에 충전물이 채워져 있을 경우는 이 연구에서 계산한 투수계수와 다른 값이 도출 될 것이다.

계산결과에 의하면 평행판 모델에서의 전체 JRC 등급에 따른 투수계수는 $10^3 \sim 10^4 \text{m}^2/\text{sec}$ 의 범위에 분포한다. JRC 0-2등급부터 4-6등급은 투수계수가 거의 비슷한 것으로 나타났으며, 이후 JRC 등급이 증가함에 따라서 투수계수 감소율은 상대적으로 불규칙하게 진행된다. 즉 비교적 평탄한 거칠기 양상을 보이는 낮은 JRC 등급에서 보다 거칠기가 심한 높은 JRC 등급에서 투수계수 변화가 더 크게 나타났다. 그리고, 8-10등급과 10-12등급 사이의 투수계수 격차와 12-14등급과 14-16등급의 투수계수 격차가 다른 등급 간의 격차보다 상대적으로 크다.

이러한 양상은 거칠기 양상이 위의 등급을 기준으로 거시규모 파동(waviness) 양상이나 미소규모의 표면 거칠기(toughness)가 많은 차이를 보이는데 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 이를 통해 절리면 거칠기의 변화가 투수계수에 영향을 미치고, 거칠기 양상에 따라 투수계수 변화정도도 차이가 있음을 알 수 있다.

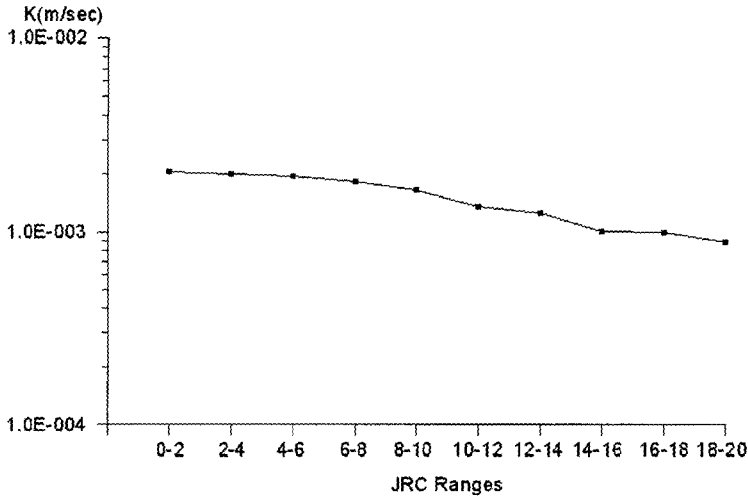


Fig. 4. Permeability coefficients of parallel plate models calculated by the homogenization analysis on each JRC range.

미세 전단변형을 수반한 모델

지질학적으로 절리는 전단변형을 수반하지 않는 것으로 알려져 있다. 하지만 현장에서 관찰되는 절리 중 전단절리의 경우는 미세한 전단변형을 포함하고 있으며, 절리생성 후 풍화작용이나 인위적 환경변화(사면 절취 및 터널굴착 등)에 의해서도 전단변위를 일으킬 수 있다. 따라서, 전술한 평행판 모델에서 절리 한쪽 면에 각각 1mm와 3mm의 전단변형을 가하여 투수계수를 계산해 보았다. 그 결과를 나타내면 Fig. 5와 같다.

1mm의 전단변형을 가한 경우 투수계수는 대부분 10^{-4} m/sec의 범위에 분포하며, JRC 18-20등급의 경우만 10^{-5} m/sec의 범위에 분포한다. JRC 등급에 따른 투수계수의 변화양상이 평행판 모델에서 나타난 것과는 달리 JRC 등급이 증가하면서 일률적으로 투수계수가 감소하지 않으며, 10-12등급, 12-14등급 그리고 16-18등급의 경우는 오히려 투수계수가 증가하는 양상을 나타낸다. 이는 전술한 3개 등급에서는 다소 불규칙한 거칠기 양상에 의해 전단변위가 발생하면서 절리면 간극이 다른 등급보다 증가한 부분이 있기 때문이다. 그러나, 14-16등급과 18-20등급은 절리면 중간부분에서 거칠기 형태가 큰 변화를 보이고 있는데(Fig. 1), 이들 부분에서는 전단변위로 인해 양쪽 절리면이 거의 접촉할 정도의 매우 좁은 간극을 가지게 되어 절리면 전체를 통한 투수성이 감소하게 되었다. 따라서, 이들 2개 등급의 투수계수는 상대적으로 감소하게 된 것으로 생각할 수 있다.

한편, 전단변위가 증가한 3mm의 경우 JRC 등급에 따른 전체적인 투수계수 변화양상은 1mm 변위의 경우와 유사하지만, 투수계수 값은 1mm에 비해 더 작아 10^{-4} ~ 10^{-5} m/sec의 범위에 분포한다. JRC 0-2등급의 경우는 1mm 변위를 갖는 경우의 투수계수와 거의 비슷한 투수계수를 보이나, 그 이후부터는 전단변위 양에 따라 투수계수 차가 발생하였다(Fig. 5). 12-14등급까지는 1mm와 3mm 사이의 투수계수 변화양상과 비슷한 경향성을 띄고 있는데, 이러한 양상은 거칠기의 형태가 비교적 완만하여 어느 정도의 전단변형이 일어나더라도 절리 내에서 거칠기에 의한 국부적인 불규칙적 간극변화가 크지 않기 때문으로 해석된다. 그러나 절리면의 거칠기 양상이 크게 바뀌는 14-16등급 이후는 1mm 변위의 투수계수와 3mm 변위의 투수계수 값의 차이가 이전 JRC 등급에서의 투수계수 차이보다 현저히 작다. 이와 같은 양상은 전술한 바와 같이 절리면 중간부분에서 거칠기 형태의 큰 변화에 의해 국부적으로 간극이 매우 좁은 곳이 존재함에 기인하며, 이러한 부분에서는 유체의 흐름이 원활하지 못하게 된다. 즉, 전단변형이 발생할 경우 절리면 거칠기는 절리를 따른 불규칙적 간극분포를 유발시킴으로서 일정한 경향성의 투수계수 분포를 보이지 않는다. 그러므로 절리의 투수특성을 이해하기 위해서는 절리면 거칠기 형태를 정밀하게 파악하고 이를 토대로 한 정확한 투수계수 산정이 필요하다.

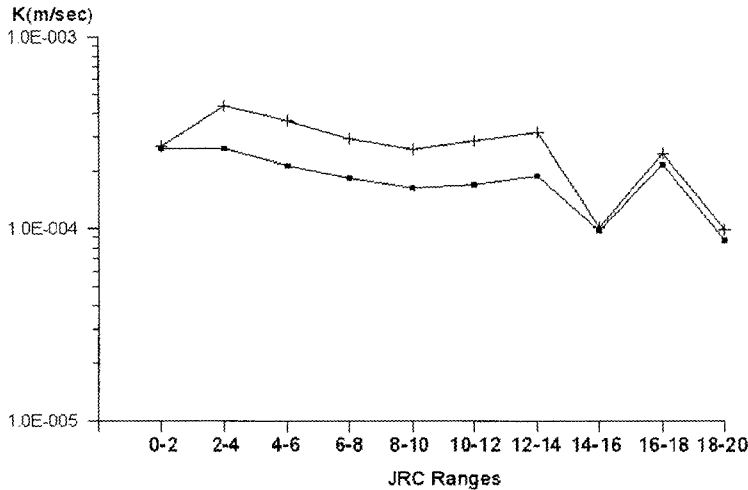


Fig. 5. Permeability coefficients of sheared joint models calculated by the homogenization analysis on each JRC range. The cross and the box are 1mm and 3mm of shear displacements, respectively.

토의 및 결론

이 연구는 암반 내 유체유동에 있어 절리면 거칠기의 영향을 파악하기 위하여 Barton(1976)이 제안한 절리면 거칠기 계수(JRC)의 10개 등급별 투수계수를 산정하였다. 등급별 절리면 거칠기 양상을 정량적으로 해석하기 위하여 고속 푸리에 변환을 이용한 스펙트럼 분석을 실시하고 각 JRC 등급별로 영향력이 큰 주파수를 선택한 후, 이를 역변환 하여 절리모델을 생성하였다. 절리 모델에서의 투수계수 산정은 불규칙적인 절리의 형태를 잘 반영해 투수계수를 계산할 수 있는 균질화 해석법을 이용하여 수행하였다.

절리 간극이 동일한 평행판 모델을 가정한 JRC 등급별 투수계수는 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/sec의 범위에 분포하는데, 거칠기 양상이 달라짐에 따라 투수계수의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 동일한 크기의 간극을 갖는 경우임에도 불구하고 JRC 등급별로 투수계수의 차이가 발생하는 것은 거칠기 변화가 투수계수의 변화에 영향을 미친다는 것을 입증하는 것이며, 특히 절리면 가장자리(joint wall)에서 거칠기의 영향으로 인해 일종의 난류(turbulent flow)가 발생하는 것으로 생각된다. 또한, 전단변위를 발생시킨 경우는 절리를 따른 투수계수가 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ m/sec의 범위에 분포하며, 절리면 거칠기 변화로 인해 극부적으로 불규칙적인 간극변화가 나타나므로 투수계수가 일정한 양상을 갖지 않고 불규칙적으로 분포한다. 따라서 이 연구를 통

해 암반 내 절리 등 균열을 따른 수리특성 규명에 있어 절리면 거칠기의 영향은 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

사 사

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

참고문헌

채병곤, 2004, 스펙트럼 분석을 응용한 단일 균열 규모 확장과 투수계수 산정, 지질공학, 14, 29-46.
 Barton, N, 1976, The Shear Strength of Rock and Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 13, 255-279.
 Barton & Choubey, 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, 10, 1-54.
 Brown, E. T. (ed), 1981, Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM suggested methods, Pergamon Press, Oxford.
 Chae, B. G., Y. Ichikawa, G.C. Jeong & Y. S. Seo, 2003, Aperture of granite fracture and effects for fluid flow, Materials Sci. Res. Int., 9, 4, 270-277.

- Grasselli & Egger, 2003, Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 25-40.
- 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.*, 54, 21-31.
- Kusumi, H., K. Teraoka & K. Nishida, 1997, Study on new formulation of shear strength for irregular rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34, 523-524.
- Ladanyi, B. & G. Archambault, 1970, Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass, *Proc. 11th US Symp. Rock Mech.*, Berkeley, 105-125.
- Lee, C. H., B. W. Deng & J. L. Chang, 1995, A continuum approach for estimating permeability in naturally fractured rocks, *Engineering Geology*, 39, 71-85.
- Sanchez-Palencia, E., 1980, *Non-homogeneous media and vibration theory*, Springer-Verlag, 398p.
- Zhao, J., 1997, Joint surface matching and shear strength Part A: Joint matching coefficient (JMC), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34, 2, 173-178.

채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350, 대전시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3052

Fax: 042-861-9723

E-mail: bgchae@kigam.re.kr

서용석

충북대학교 지구환경과학과

361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-276-9645

E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

김지수

충북대학교 지구환경과학과

361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48

Tel: 043-261-3201

Fax: 043-276-9645

E-mail: geop22@cbu.ac.kr

투 고 일 2004년 10월 29일

심 사 일 2004년 11월 15일

심사완료일 2004년 12월 2일