

화강암 공시체의 응력레벨에 따른 투수특성에 대한 연구

김종태¹ · T. Seiki² · 강미아³ · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과

²Department of Civil Engineering, Utsunomiya University, Japan

³안동대학교 환경공학과

A Study on Permeability Characteristics of Damaged Granite

Jong-Tae Kim¹, T. Seiki², Meea Kang³, and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²Department of Civil Engineering, Utsunomiya University, Japan

³Department of Environmental Engineering, Andong National University

토목구조물의 기초가 되는 암반은 암석자체로서는 강도가 높고 투수성이 작지만 공학적 성질은 암반내의 존재하는 크랙, 절리 등 불연속면의 영향을 크게 받는다. 천부 암반내에 지배적으로 분포하는 것은 절리이지만 그 수가 적은 지하심부에 있어서 지하수 투수성의 가능성을 고려하면 암석자체의 미소크랙의 연결성이 투수성 크랙으로서 충분히 고려되어야 한다. 이 연구에서는 절리성 암반의 절리분포 및 투수성 해석 모델화 방법을 화강암 공시체의 미소크랙에 응용하여 손상진행에 따른 화강암의 투수 특성을 추정하는 것을 목적으로 하였다. 미소크랙 데이터로부터 투수모델을 작성하여 해석한 결과 평균투수계수에 있어서 실제의 투수시험 값과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 3차원 모델의 가시화를 가지고 모델표면에서의 미소크랙과의 비교로부터 손상발달에 의한 미소크랙 발생수와 유출면으로부터 계산한 평균투수계수는 비례관계로 실험결과와 잘 일치하는 것으로 해석되었다.

주요어 : 크랙, 투수성, 손상, 3차원 모델

Although rock itself has high strength or low permeability, engineering properties of rock masses are significantly influenced by discontinuities such as cracks and joints. Considered with possibility of groundwater flow in massive rock mass of deep subsurface, the connectivity of micro cracks should be analyzed as a conduit of groundwater flow. The objective of this study is to estimate permeability characteristics of granite dependent on damage process with application of joint distribution analysis and modeling of permeability analysis in rock masses. In case of average permeability coefficients, the modeling results based on micro cracks data are well matched with the results from permeability tests. Based on the visualization result of three dimensional model, the average permeability coefficients through the discharge plane have a positive relationship with the number of microcrack induced by rock damage.

Key words : crack, permeability, damage, three dimensional model

서 언

지하발전소, 지하석유비축탱크 및 방사성폐기물 지층 처분장 개발 등과 같은 대규모 지하구조물을 건설하기 위해서 필요로 하는 것은 암반의 투수성을 파악하는 것

이 무엇보다 중요시된다. 뿐만 아니라, 대부분의 암반은 균질하고 등방성을 띤 신선한 암반이 아니라 거의 모든 암반은 전체적으로 크랙(crack), 편리(schistosity), 층리(bedding), 절리(joint) 등을 포함하고 있는 미시적 내지 거시적인 역학적 불연속면(mechanical discontinuity)을

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

포함하고 있다.

암반을 대상으로 지하 굴착을 하였을 경우 원암(*in-situ rock*)은 주변으로부터 응력평형상태를 유지하고 있어 안정한 상태에 놓여 있으나 지하 굴착을 할 경우 응력평형상태가 파괴되어 장기적으로 지속적인 암반변형 및 암반 내에 포함된 크랙, 편리 및 불연속면 등에 의해 암반 손상이 발생됨에 따라 지하 구조물 자체에 손상을 가져오게 한다. 그리고 이미 암반변형이 발생하였을 경우 지하 심부에서 층류상태로 흐르고 있는 지하수는 암반변형으로 생성된 크랙을 따라 침투하여 지속적으로 지하 구조물에 대해 손상을 가할 것이다.

지금까지, 우리나라에서는 암석의 불연속면에 대한 역학적 거동과 강도 특성에 대해서는 많은 연구자들에 의해 연구 결과가 발표된 바 있으나, 암반손상과 투수성에 대한 연구는 아직 미진한 상태이다.

투수성해석 방법에 관한 연구에 있어서는 암반 크랙 내의 지하수유동의 수치해석 방법을 이용하여 평가하려는 시도가 국외에서는 이전부터 수행되어 왔다. 크랙의 투수성 해석은 매우 어려워 복잡한 모델화 방법이 확립되어 있지 않았기 때문에 이러한 해석모델로써는 암반을 다공질 매체로 본 연속체로서 취급하여 해석하였다 (Neuman, 1973; 정교철, 1999). 그러나 암반은 크랙을 포함한 매체로서 크랙성 암반을 연속체로 취급하는 것에는 한계가 있다. 따라서 최근에는 크랙성 암반을 불연속체로서 취급한 모델화의 연구도 진행되고 있다(Wilson *et al.*, 1978; Long,1982; Long *et al.*, 1993; Chae *et al.*, 2005).

토목구조물의 기초가 되는 암반은 암석자체로서는 강도가 높고 투수성이 작지만 공학적 성질은 암반내의 존재하는 크랙, 절리 등 불연속면의 영향을 크게 받는다. 천부 암반내에 지배적으로 분포하는 것은 절리이지만 그 수가 적은 지하심부에 있어서 지하수 투수성의 가능성을 고려하면 암석자체의 미소크랙의 연결성이 투수성 크랙으로서 충분히 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 절리성 암반의 절리분포 및 투수성 해석 모델화 방법을 화강암 공시체의 미소크랙에 응용하여 손상진행에 따른 화강암의 투수 특성을 추정하는 것을 목적으로 하였다.

응력레벨에 따른 투수특성 실험

단계별 손상을 위해 암석공시체에 일축압축시험을 실시하여 복수의 미소크랙들을 발생시켰다. 이와 같이 암

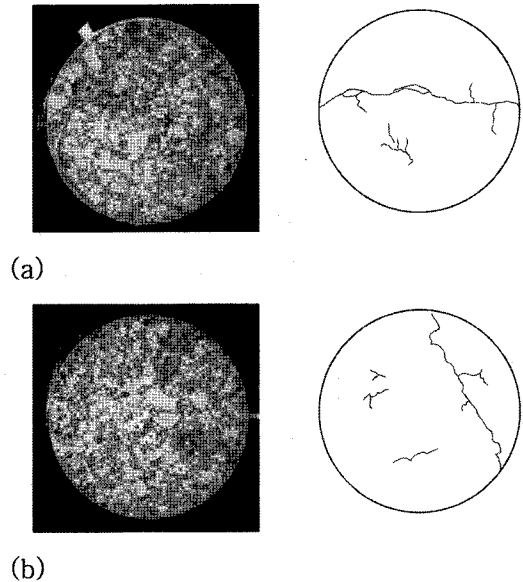


Fig. 1. Microcrack diagram of rock specimen No. 2: (a) Upper part and (b) lower part of rock specimen.

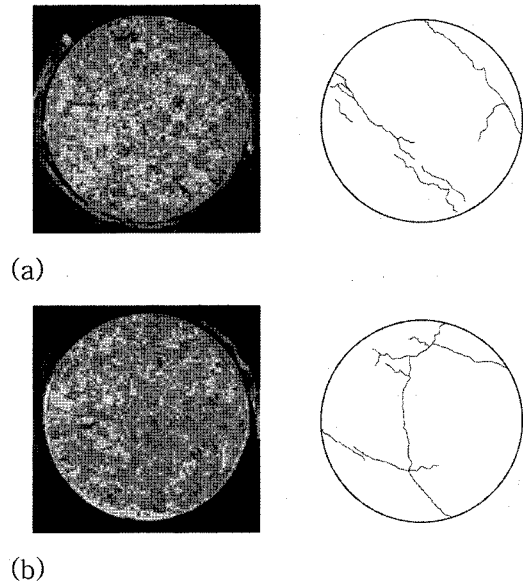
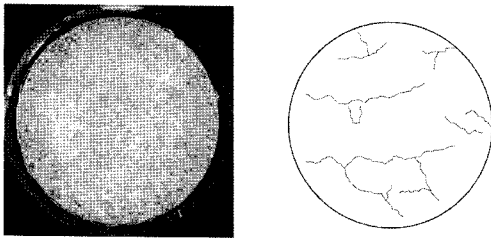
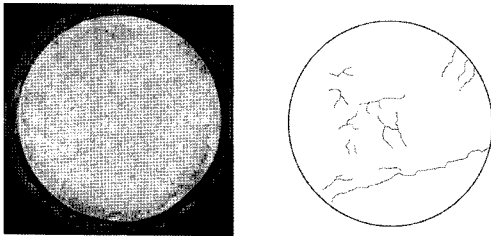


Fig. 2. Microcrack diagram of rock specimen No. 5: (a) Upper part and (b) lower part of rock specimen.

석공시체에 대해 인위적인 손상하중(일축압축강도의 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%)을 가하여 암석공시체 내부에 변위발생을 만든 것은 지하굴착 등으로 인해 자연응력평형상태의 파괴로 인해 주변암석에 발생하는 불연속면을 암석공시체 내 미소크랙을 발생시

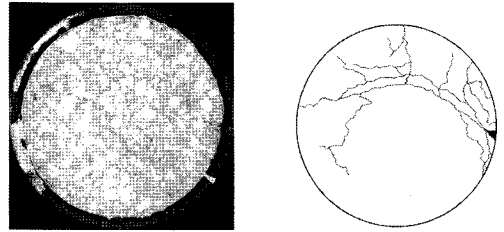


(a)

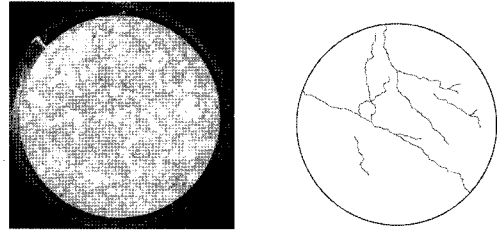


(b)

Fig. 3. Microcrack diagram of rock specimen No. 7: (a) Upper part and (b) lower part of rock specimen.

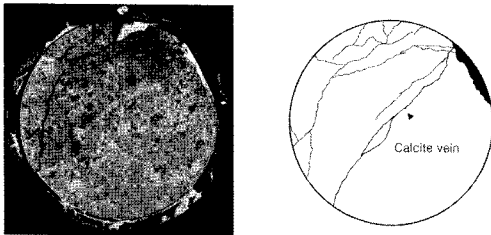


(a)

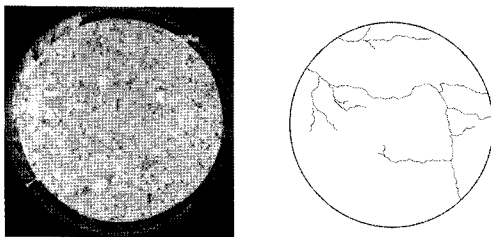


(b)

Fig. 5. Microcrack diagram of rock specimen No. 12: (a) Upper part and (b) lower part of rock specimen.

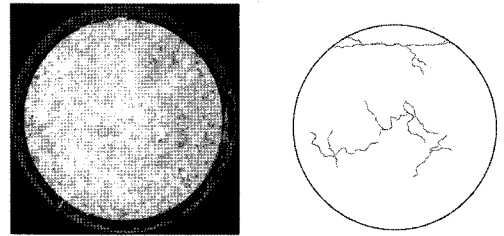


(a)

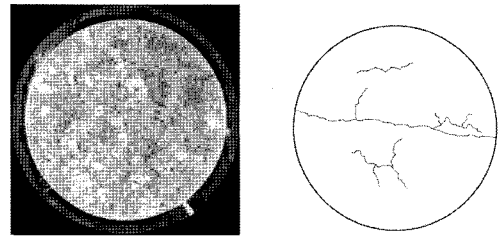


(b)

Fig. 4. Microcrack diagram of rock specimen No. 10: (a) Upper part and (b) lower part of rock specimen.



(a)



(b)

Fig. 6. Microcrack diagram of rock specimen No. 13: (a) Upper part and (b) lower part of rock specimen.

김으로서 제한한 것이다(Fig. 1~Fig. 6). 이는 지하굴착으로 발생하는 주변 암석의 미소크랙 등을 따라 지하수 투수 가능성이 존재할 것이라는 판단 하에 암석공시체에 인위적으로 일정한 투수압을 가하여 투수계수를 산정하기 위함이다.

투수시험에 의해 계산된 투수계수의 측정값의 범위는 $10^{-6} \sim 10^{-11}$ cm/sec까지 넓게 분포하고 있다(Table 1). 각각의 암석공시체에 대한 투수계수를 살펴보면 단계별 손상을 위한 일축압축시험에서 65%, 70%, 75%, 80%를 가한 암석공시체에 대한 투수계수는 극히 작다. 손상하

Table 1. Permeability of damaged rock specimen.

Stress-levels (%)	Rock specimen No.	Permeabl e pressure (kPa)	Confining pressure (MPa)	Permeability (cm/sec)
65	1	1000	5	5.60×10^{-10}
	2	1000	5	1.58×10^{-9}
70	3	1000	5	1.68×10^{-9}
	4	1000	5	2.48×10^{-9}
75	5	1000	5	1.25×10^{-6}
	6	1000	5	2.66×10^{-9}
80	7	1000	5	1.52×10^{-10}
	8	2000	5	9.85×10^{-11}
85	9	1000	5	1.11×10^{-7}
	10	1000	5	4.08×10^{-7}
90	11	1000	5	1.67×10^{-10}
	12	1500	5	1.22×10^{-8}
95	13	1000	5	3.64×10^{-10}
	14	1000	5	1.34×10^{-8}

중 75%에 해당하는 암석공시체 No.5는 상대적으로 투수성이 높다. 이는 암석공시체 내 발생된 미소크랙이 상부단면에서 하부단면까지 연결되어있으며 이러한 요인들이 투수와 관련된 통로의 역할을 한 것으로 판단된다.

투수계수와 이에 대한 양쪽 단면에 형성된 미소크랙들의 길이(Fig. 1~Fig. 6)를 이용한 밀도와의 관계에서 투수계수 측정값이 높게 측정되어진 암석공시체는 양쪽 단면에 크랙길이가 길게 발달되어 밀도도 함께 높게 측정되는 것을 알 수 있다. 이와는 상대적으로 투수계수 측정값이 낮고 밀도 또한 낮게 측정되었다면 이는 암석공시체 양쪽 단면에 크랙 등이 미미하게 형성되어져 있다는 것을 의미하거나 상부와 하부의 단면에 크랙 및 미소크랙이 다수 존재해 있지만 이들이 암석공시체 내부를 통해 연결되어져 있지 않고 개별적으로 존재하고 있어 투수를 원활히 할 수 없다는 것으로 생각된다.

3차원 공간의 모델화

모델링해석을 위해서는 크랙계에 있어서 각 크랙 특성 요소 통계량을 가지고 최종적인 해석의 대상이 되는 모델을 구축하게 된다. 해석시스템에서는 크랙군의 통계량을 기본으로 하여 3차원 공간내의 크랙을 발생시키는 것으로서 크랙형의 성질을 충분히 반영한 기하학적 모델을 구축한다.

크랙 발생영역과 크랙 발생 수의 계산

유한 공간영역에서 크랙원반을 발생시키는 것으로 크랙계 모델을 작성한다. 그러나 크랙원반을 영역 내에 발생시키면 크랙원반의 중점이 표시 영역 내에 존재하는 크랙만 생성되기 때문에 표시영역의 주위에 있어서 3차원 밀도가 낮게 평가된다. 따라서 발생영역 내 표시영역의 각 방향으로 확장하고 크랙원반의 중점을 발생시키는 방법으로 한다. 이 경우 표시영역내의 크랙원반이 존재하지 않는 것이 발생될 수도 있지만 이런 경우에는 그것을 제거한다. 발생 크랙수의 계산에 있어서는 크랙 수는 다음과 같이 된다.

$$N_{Vm} = n \int \rho_v V \quad (1)$$

V : 체적
 ρ_v : 3차원 밀도

각 모델평면에서 발생하는 크랙 수는 식(2)와 같이 계산된다.

$$N_{Am} = n \int \rho_v A \quad (2)$$

크랙 발생 방법

3차원 모델에서 크랙의 발생위치를 결정할 때에는 원반의 중심점을 그 대표점으로 한다. 모델 공간에 직교 3차원 공간을 설정하고 대표점의 위치를 결정한다. 크랙의 방향성 결정은 각 크랙군에 있어서 크랙 방향을 결정한다. 크랙군의 범위를 벗어난 방향성을 갖는 크랙이 생성될 경우 이러한 것들은 제거한다. 3차원 모델에 있어서 크랙의 연속성에 관한 변수(parameter)는 원반 반경 r 이다. 반경 r 이 결정된 후 식(3)과 같이 반경 r 로 규정한 트레이스길이(trace length) l 의 분포 함수로부터 트레이스 길이를 결정한다.

$$F_l(l | r) = \int_0^l \frac{4}{\pi^2} \sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (3)$$

크랙의 협재성 결정은 확률 분포의 난수로부터 협재물의 유무 및 종류에 대하여 결정한다. 크랙의 조면성은 JRC 값에 관한 정규 분포를 가정하고 정규 난수의 발생으로 결정한다.

미소크랙의 3차원 분포

해석 모델의 기본이 되는 3차원 미소크랙 분포를

고려하여 크랙의 방향성, 반경, 3차원 밀도, 협재물의 측정값을 가지고 3차원 미소크랙 분포 모델을 작성하였다.

미소크랙의 공간적 연결성

암석에 있어서 투수의 주된 경로는 광물주변의 미소크랙(광물 경계크랙) 등이며, 이들의 연결부를 통하는 흐름이 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 흐름을 3차원적으로 해석하기 위해서는 3차원적 연결을 파악할 필요가 있다. 이때 미소크랙을 유한평면(원반)의 집합체로서 표현한다. 광물과 관련된 미소크랙을 모델화한 원반의 연결부(교선)은 기하학적으로 구해지는 선분이다. 해석 모델 영역 내에 존재하는 모든 미소크랙에 대하여는 서로의 연결성을 조사하고, 교선의 수, 위치(교선 양 단점의 좌표) 및 미소크랙의 번호를 자동 기록한다.

유효간극 면적률

투수성 해석을 목적으로 한 경우 투수특성에 직접 영향을 주는 유로의 특성 변수로서 유효간극 면적률 S_R 은 식(4)와 같다. 여기에서 유효간극 면적률은 각각의 단일 미소크랙 내에 있어서 유로의 면적부분이고 특히 미소크랙 모델과 같은 개개의 유로를 결정적으로 평가한 해석에 있어서는 중요한 변수가 된다. 유효간극 면적률에 관해서는 유로조사를 목적으로 한 투수성 시험 데이터를 가지고 있어야만 한다. 해석모델 중의 유로를 인식하기 위해서는 각 유로에 있어서는 유효간극 면적률을 결정할 필요가 있다. 이를 위해서는 유효간극 면적률의 확률 구조를 정의 할 필요가 있다. 미소크랙내의 유로면적은 각각의 조건에 따르지만 미소크랙 그 자체의 특성요소와 관계가 있다고 판단된다. 여기에서 유효간극 면적률 S_R 의 확률 구조는 식(4)와 같다.

$$fr(S_R) = \int_T f(t) \int_R f(r) \int_0^{r^2} \int_0^{2\pi} f(\omega, \epsilon) \cdot f(S_R(\omega, \epsilon, r, t)) d\omega d\epsilon dr dt \quad (4)$$

- $f(\omega, \epsilon)$: 미소크랙 방향의 확률함수
- $f(r)$: 미소크랙 반경의 확률함수
- $f(t)$: 간극폭의 확률함수

미소크랙에 있어서 유한원반

광물 경계에 미소크랙이 발생하는 것으로 하여 투수 모델의 유한원반을 Fig. 7과 같이 설정하였다.

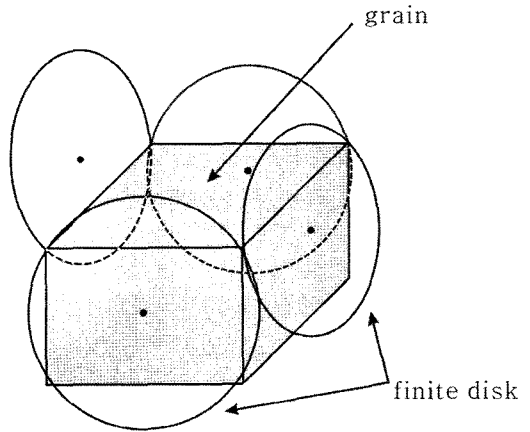
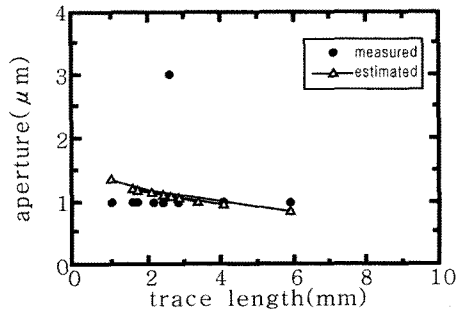


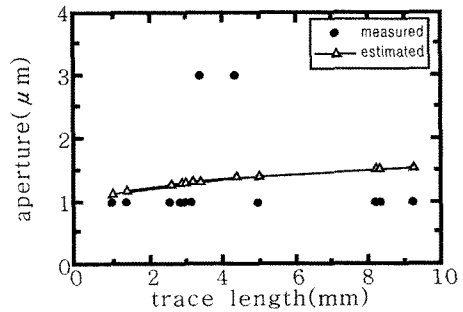
Fig. 7. Determination of finite disk.

Darcy 법칙의 적용

미소크랙과 같은 간극폭은 매우 좁아 이것을 통하는 투수는 매우 작기 때문에 물의 점성에 영향을 받는다. 그러나 Ichikawa et al.(1999)의 연구로부터 점토광물을 흐르는 물에 대해서도 Darcy 법칙이 성립한다는 것을 분자동역학법칙과 균질화법의 수학적 해석을 응용한 시



(a) Crack group 3



(b) Crack group 6

Fig. 8. Relationship between trace length and aperture.

물레이션에 의해 명확하게 하였다. 이 때문에 본 연구에서도 미소크랙내의 흐르는 물에 대하여 Darcy 법칙이 충분히 성립하는 것으로 하였다.

개구성 분포

개구성 분포 특성의 해석 결과로서 추정치가 증가하는 영역과 감소하는 영역이 나타난다. 트레이스 길이가 길면 간극폭이 커진다고 생각된다. 그러나 현미경하에서 운모주변에 있어서 미소크랙의 간극폭은 다른 광물주변에 있어서 미소크랙의 간극폭과 비교하여 크다. 운모주변의 미소크랙 간극폭을 3 μm로 하고 기타 광물주변에 있어서 미소크랙 간극폭을 1 μm로 설정하였다. 다른 광물과 비교하여 운모주위 길이는 짧고 미소크랙의 트레이스 길이도 비교적 짧다. 따라서 개구성 분포 특성에 있어서 트레이스 길이가 짧은 때에는 간극폭이 큰 운모의 미소크랙이 발생하고 트레이스 길이가 길 때에는 운모의 미소크랙이 발생하지 않기 때문에 작은 간극폭만 발생한다. 따라서 간극폭의 분포 특성에 있어서 추정치가 감소하는 영역을 갖기도 한다(Fig. 8).

투수성 해석 결과

미소크랙의 분포 통계의 해석 결과로부터 3차원 모델에 있어서 투수성 해석을 실시하였다. 해석한 결과와 투수시험 결과와의 비교 변수로서 평균투수계수를 이용하였다. 평균투수계수는 투수의 유출면에 있어서 전체 유량을 유출 면적으로 나눈 평균유속을 계산하여 동수경사로 나눈 값을 의미한다. 3차원 모델은 미소크랙을 확률적으로 발생시켰기 때문에 결과가 통계적으로 분산되어 나타난다. 따라서 각각의 해석 조건에 있어서 20케이스를 해석하였다.

해석 결과와 비교할 Zhang *et al.*(1995, 1996)의 투수시험 결과의 투수계수는 8.00×10^{-9} cm/s을 이용하였다. 이것은 이 연구에 사용한 화강암의 해석 결과로부터 평균투수계수는 $1.00 \times 10^{-7} \sim 1.00 \times 10^{-9}$ cm/s로서 실제의 투수시험 결과와 비교하면 잘 일치한다. 이 연구의 해석에서는 운모주변 미소크랙의 간극폭을 3 μm, 기타 광물주변의 미소크랙 간극폭을 1 μm로 설정하였기 때문에 실제 시험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타난다.

3차원 모델의 가시화

미소크랙 모델에 있어서 3차원 모델의 표면에 대하여 가시화 되었다(Fig. 9). 해석에서는 3차원 모델에서 유입

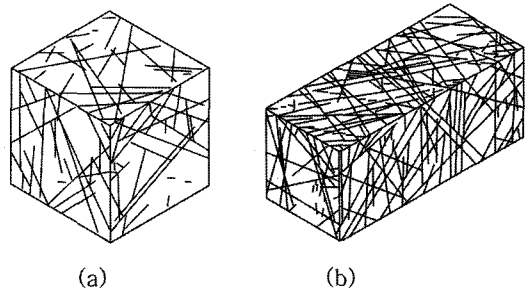


Fig. 9. Three dimensional model with (a) regular hexahedron and (b) hexahedron considered size.

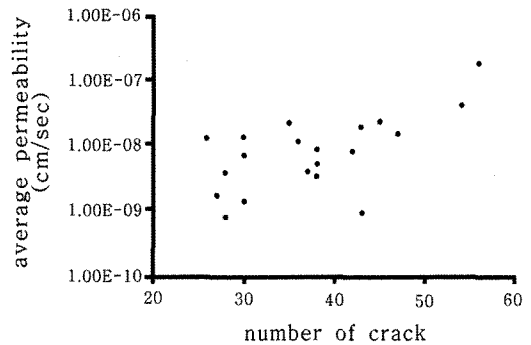


Fig. 10. Relationship between average permeability and number of crack in three dimensional model with regular hexahedron.

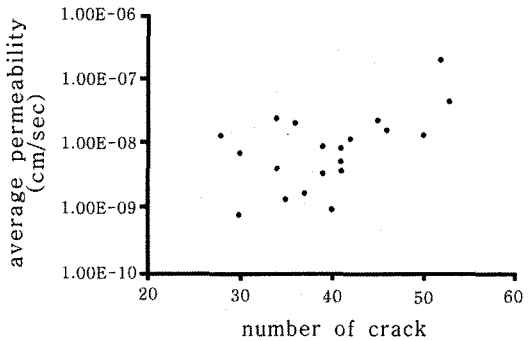


Fig. 11. Relationship between average permeability and number of crack in three dimensional model with hexahedron considered size.

량을 면적으로 나누어 유속을 구하였다. 동수경사로 나눈 것을 평균투수계수로 하였다. 따라서 모델 표면의 가시화는 케이스별로 투수계수를 비교할 때에 중요하다. 미소크랙수와 평균투수계수의 관계를 표시하였다(Fig. 10). 이것으로부터 미소크랙수가 많으면 평균투수계수가 증가하는 경향을 보여준다.

모델크기를 고려한 투수성 해석

유입면으로부터 유출면까지의 모델 길이를 25 mm로 한 3차원 모델에 대한 투수성 해석을 실시하였다(Fig. 9(b)). 모델크기를 고려한 투수성 계수는 10×10×10 mm의 3차원 모델(Fig. 9(a))에서의 평균투수계수보다 투수시험 결과와 근사한 값을 나타내고 있다(Fig. 11). 이것은 3차원 모델의 크기를 공시체의 크기와 유사한 것으로 실제 유로구조와 가까운 것으로 생각된다.

결 언

화강암공시체(NX)에 일축압축을 가하여 공시체 내 손상 미소크랙을 발생시킨 후 각각의 공시체에 대하여 투수시험을 실시하였다. 투수계수 측정값이 높게 측정되었던 암석공시체는 양쪽 단면에 크랙 등의 길이가 길게 형성되어 밀도도 함께 높게 측정되는 것을 알 수 있다. 이와는 상대적으로 투수계수 측정값이 낮고 밀도 또한 낮게 측정되었다면 이는 암석공시체 양쪽 단면에 크랙 등이 미미하게 형성되어져 있다는 것을 의미하거나 상부와 하부의 단면에 크랙 및 미소크랙이 다수 존재해 있지만 이들이 암석공시체 내부를 통해 연결되어져 있지 않고 개별적으로 존재하고 있어 투수를 원활히 할 수 없다는 것으로 생각된다.

미소크랙 데이터로부터 투수모델을 작성하여 해석한 결과 평균투수계수에 있어서 실제의 투수시험 값과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 3차원 모델의 가시화를 가지고 유출면으로부터 계산한 평균투수계수와 모델표면에서의 미소크랙과의 비교로부터 손상발달에 의한 미소크랙 발생수와 비례관계로 잘 일치하는 것으로 해석되었다.

사 사

이 연구는 2004년 안동대학교 특별학술연구지원사업에 의해 수행되었다. 이에 감사한다.

참 고 문 헌

정교철, 1999, 일축압축하 결정질암석 공시체에서의 응력분포 및 파괴에 관한 연구, *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 32, No. 1, p.9 3-100.

Chae Byung-Gon, Jeong Gyo-Cheol, Kim Hak-Joon, Park Jae-Hyeon, Takafumi Seiki, 2005, Changes of permeability characteristics dependent on damage process in granites, *Geosciences Journal*, Vol. 9, No. 4, p.339-346.

Ichikawa, Y., Kawamura, K., Nakano, M., Kitayama, K., Kawamura, H., 1999. Unified molecular dynamics and homogenization analysis for bentonite behavior: current results and the future possibility. *Engng. Geol.* Vol.54, p.21-31.

Long, J.C.S., 1993, Construction of equivalent discontinuum models for fracture hydrology. In: Hudson, J.A.(ed.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects*, Vol. 3, Rock Testing and site, Characterization. Peramon Press, Oxford, p.241-295.

Long, J., Remer, J., Wilson, C. and Witherspoon, P., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*, Vol.18, p.645-658.

Neuman, S. P., 1973, Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty, *Water Resour. Res.*, Vol.9, No.4, p.1006-1021.

Wilson, R. K. and Ainfantis, E. C., 1978, On the theory of consolidation with double porosity, *Int. J. Engng. Sci.*, Vol.20, No.9, p.1009-1035.

Zhang, X. and Sanderson, D. J., 1995, Anisotropic features of geometry and permeability in fractured rock masses. *Engineering Geology*, p.40-75.

Zhang, X., Sanderson, D.J., Harkness, R.M. and Last, N.C., 1996, Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.33, p.17-37.

2007년 2월 2일 원고접수, 2007년 3월 13일 게재승인

김종태

안동대학교 지구환경과학과
경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jongtae98@empal.com

T. Seiki

Department of Civil Engineering
Utsunomiya University, Japan
Tel/Fax: +82-28-689-6216
E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

강미아

안동대학교 환경공학과
경북 안동시 송천동 388
Tel/Fax: 054-820-6267
E-mail: wdream@andong.ac.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@andong.ac.kr