

## 간극의 기하학적 특성이 절리의 수직변형 및 투수성에 미치는 영향에 관한 연구

이승도<sup>1)</sup>

### A Study of the Influence of Void Geometry on Fracture Closure and Permeability

Seung-Do Lee

**Abstract.** This study reports the influence of void geometry on fracture closure and permeability from numerical experiments. As the aperture distributions of rock fractures are characterized by statistical methods, synthetic fractures have successfully been simulated in this way. Based on the generated fracture models, models for fracture closure and flow calculation have been developed. A fracture closure model has been developed by considering the asperity compression and half-space deformation, and flow calculations have been performed using a finite difference method adopting a local cubic law. The results of numerical experiments have shown that the increase in the aperture spatial correlation leads the fracture closure and the decrease in fracture permeability to increase. Also, it has been indicated that there is an implicit relation between fracture normal stiffness and permeability. The importance of this study is to enhance the understanding the hydro-mechanical behavior of fractured rock mass due to engineering projects.

**KeyWords:** Fracture, Aperture Distribution, Spatial Correlation, Fracture Closure, Permeability

**초 록.** 절리의 기하학적 특성이 절리의 수직변형 및 투수성에 미치는 영향에 대해 수치해석적 방법을 통해 연구하였다. 실험적 계측 결과에 의하면, 절리의 간극은 통계적 방법에 의해 묘사되며 이에 근거하여 수치해석에 사용할 수 있는 절리를 모사할 수 있었다. 이를 위해, 자동 상관관계 함수를 이용하여 다양한 공간 상관길이의 인공 절리를 발생하였으며, 이를 토대로 수직변형 모델 및 수리해석 모델을 개발하였다. 수직변형 모델은 수직응력에 의한 절리면의 압축과 변형을 고려하여 절리의 변형거동을 해석하려 시도하였으며, cubic law에 근거한 유한차분법을 이용하여 수리해석을 수행하였다. 여러 가지 공간 상관길이의 인공 절리에 대한 수직변형 거동 및 이에 따른 수리해석의 결과, 간극의 공간 상관길이가 증가함에 따라 절리의 수직변형 및 투수성 감소가 분명하였다. 절리의 수직강성 역시 간극의 상관길이에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이로 인해 절리의 투수성이 수직강성과 내재적 관계가 있음을 유추할 수 있었다. 본 연구 결과는 공학적 프로젝트로 인한 절리 암반의 수리역학적 거동을 이해하는데 공헌할 것으로 사료된다.

**핵심어:** 절리, 간극 분포, 공간 상관길이, 수직변형, 투수성

#### 1. 서 론

암석은 다수의 절리를 내재하고 있으며, 단일 절리에 대한 수리-역학적 검토가 충분히 이루어질 때 절리 암반의 변형 거동을 제대로 예측할 수 있다. 단일 절리는 두 개의 절리면과 그 사이의 간극 분포로 이루어지기 때문에 절리의 변형거동이 암반의 변형거동을 지배한

다. 또한 절리의 투수성은 암석 매질에 비해 매우 크기 때문에 절리를 유체흐름의 경로로서 연구하는 것이 요구된다. 이러한 경우, 절리의 투수성은 절리 간극의 삼승에 비례하는 것으로 알려져 있다(Witherspoon et al., 1980). 특히, 수직응력 하의 절리의 간극은 비선형적인 특성을 보이며, 이는 절리의 투수성에 실질적인 영향을 미친다. 따라서, 개별 절리의 수직변형 거동과 이에 따른 투수성 변화를 검토하는 것은 암반공학 및 여러 공학분야에서 근본적인 과제가 될 것이다.

절리의 수직변형 거동은 초기 접촉 면적, 간극 분포,

<sup>1)</sup> 영국 Imperial College 지구과학공학과 연구원  
접수일: 2002년 12월 2일  
심사 완료일: 2002년 12월 20일

거칠기, 암반의 강도 및 변형도 등에 영향을 받으며 (Bandis et al., 1983), 여러 가지 경험적 비선형 관계식이 Goodman(1976)과 Bandis et al.(1983) 등에 의해 제시되었다. Raven and Gale(1985), 김태혁, 이정인 (2000) 역시 절리의 수직변형과 수직응력의 관계를 검토하여 수직변형이 비선형적이라는 것을 보였다. 이러한 연구 결과들에 따르면, 수직응력이 증가함에 따라 절리의 수직변형이 감소하며 최대 변형은 임계값(절리의 간극)보다 항상 작다. 또한, 절리의 수직변형이 증가함에 따라 절리의 공간은 간극의 감소에 직접적으로 영향을 받기 때문에 절리의 투수성은 감소하게 된다 (Gale, 1982, Durham and Bonner, 1994, 이희석 외, 2000).

본 연구에서는 여러 가지 인공 절리를 통계적 방법을 통해 발생시켰으며, 이를 토대로 암석의 탄성변형에 기초한 수직변형 모델과 cubic law를 가정한 수리해석 모델을 개발하였다. 수치해석을 통해 간극의 기하학적 특성이 절리의 수직변형 거동에 미치는 영향에 대해 검토

하였으며, 간극의 기하학적 특성과 수직변형이 절리의 투수성에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

## 2. 인공 절리의 발생

일반적으로 절리 간극의 구조는 통계적 또는 지구통계적 방법과 스펙트럼 또는 프랙탈 해석을 통해 묘사될 수 있다(Brown and Scholz, 1985, Gale, 1987, Iwano and Einstein, 1993, Lanaro, 2000). 실험적 계측에 의하면, 절리의 표면 거칠기는 정규분포를 보이며(Brown, 1987), 간극 분포는 정규 또는 로그정규 분포로 묘사된다(Moreno et al., 1988, Tsang and Tsang, 1989, 이희석 외, 2000). 이러한 계측 결과를 토대로 수치해석을 위한 인공 절리를 발생시키려는 시도가 있었으며(Brown, 1987, Hopkins, 1990), 본 연구에서는 자동 상관관계 함수(auto-correlation function, ACF)를 사용하여 공간 상에서 상관관계를 나타내는 로그정규 분포의 간극을 발생시켰다. 일반적으로 사용되는 ACF는 지수함수의

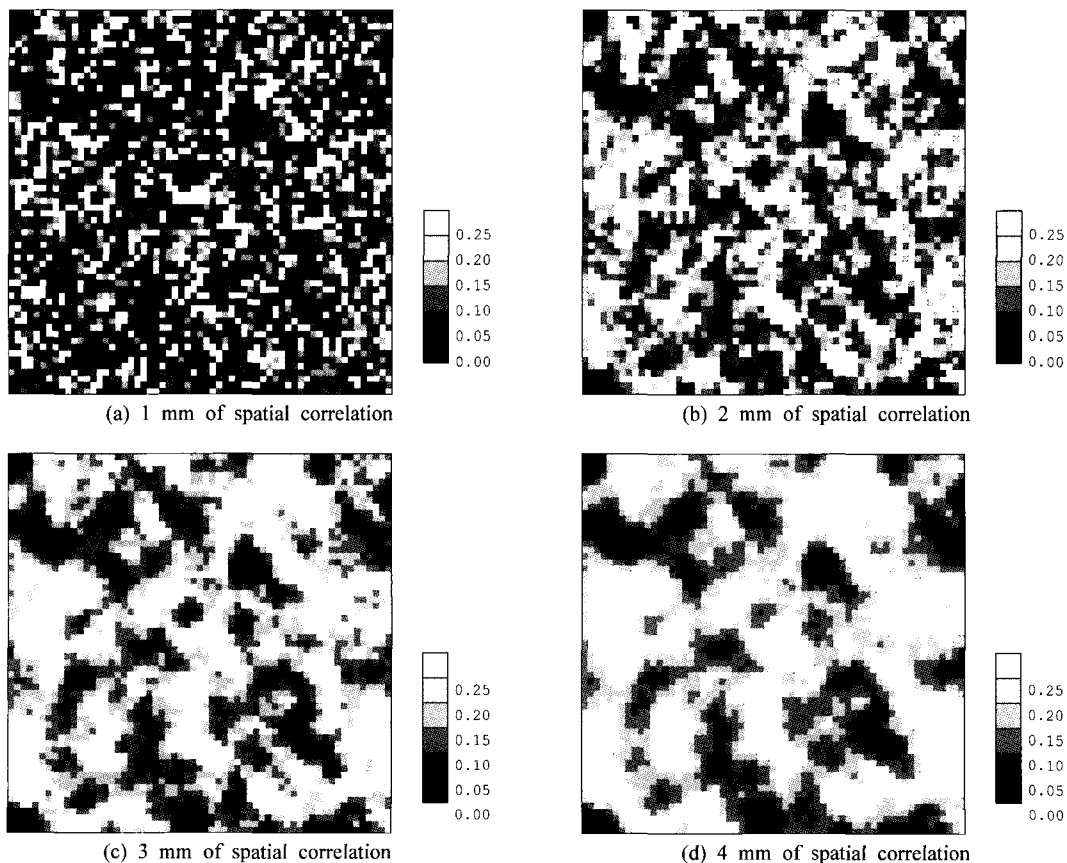


Fig. 1. Synthetic aperture distributions with a 60 mm by 60 mm domain at a grid step of 1 mm.

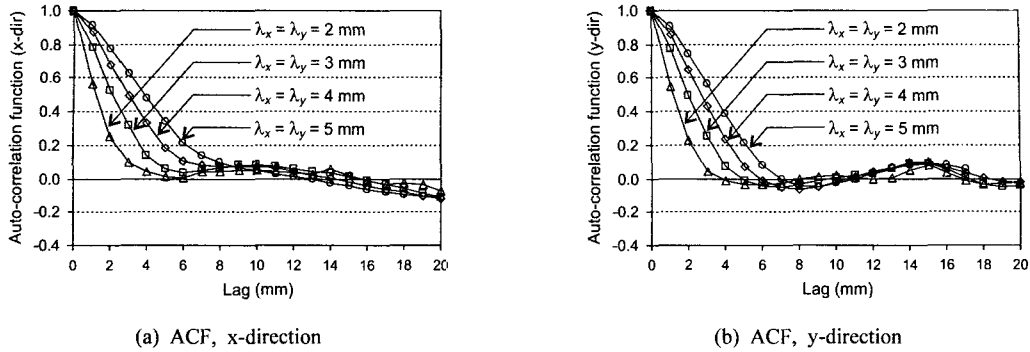


Fig. 2. Calculated ACFs in the x- and y-directions for synthetic aperture distributions.

형태이며(Patir, 1978) 본 연구에서 사용된 상관관계 함수  $R(\lambda_x, \lambda_y)$ 는 다음과 같다.

$$R(\lambda_x, \lambda_y) = \sigma^2 \exp \left[ -\sqrt{\left(\frac{l_x}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{\lambda_y}\right)^2} \right] \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_x$ 와  $\lambda_y$ 는 각각 x-방향과 y-방향의 공간 상관길이이고,  $\sigma$ 는 표준편차, 그리고  $l_x$ 와  $l_y$ 는 각각 원점으로부터 x-방향과 y-방향의 거리이다. 식 (1)의 함수를 사용하여 개발된 인공 절리 발생 절차는 다음과 같다.

- 1) 표준 균일 분포로부터 무작위 추출을 통해 등방 균질이며 공간상에서 독립적인 값의 집합을 발생시킨다.
- 2) 발생된 무작위 집합을 정규 분포로 치환한다.
- 3) 가중 평균 방법을 사용하여 치환된 정규 분포의 값들을 공간상에서 정량적으로 상관관계를 가지게 한다.
- 4) 정규 분포를 로그정규 분포로 변환시킨다.

Fig. 1은 공간 상관길이에 따라 발생된 여러 가지 간극 분포를 보여주며, 공간 상관길이가 증가할수록 간극의 연결도가 증가함을 볼 수 있다. 여기서, 정성적인 연결도의 증가는 우세한 유체 흐름 경로를 의미한다. Fig. 1의 간극 분포는 식 (1)에서 x-방향과 y-방향의 공간 상관길이가 동일한 경우로 등방성을 보여주며, x-방향과 y-방향의 공간 상관길이를 다르게 할 경우에는 이방성을 나타내는 간극 분포를 발생시킬 수 있다(Lee, 2002).

발생된 간극 분포로부터 ACF를 계산하여 공간 상관길이의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다(Fig. 2). Fig. 2에서 볼 수 있듯이 간극 발생을 위해 입력된 공간 상관길이가 증가할수록 발생된 간극의 ACF의 감소가 둔화되는 경향을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 개발된 통계적 방법으로, 단일 절리의 간극 분포를 정량적으로 제어하며 발생시킬 수 있음을 보여준다.

### 3. 절리의 수직변형 모델

수직응력이 작용하는 절리의 수직변형 거동을 모사하기 위하여 여러 가지 이론적 수치 해석적 모델이 개발되었다(Greenwood and Williamson, 1966, Hopkins, 1990). Greenwood and Williamson(1966)은 구형 모델을 사용하여 절리 표면의 압축을 계산하였다. 구체의 압축은 개별 접촉 면적이 구의 반경에 비해 작을 때 타당하지만 수직응력이 증가할 경우 소수의 거친 면들만이 접촉을 한다는 것은 실제 상황과 부합하지 않게 된다. 이에 반해, Hopkins(1990)는 절리 표면의 압축을 동일 반경의 원기둥의 압축과 반공간(half-space)의 탄성 변형으로 모사하였다.

실험적 결과에 의하면(Pyrak-Nolte et al., 1987) 절리의 수직변형 거동은 탄성으로 가정할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 탄성변형의 이론적 해를 적용한 수직변형 모델을 개발하였다. 접촉지점들의 일축 압축에 있어서 절리 표면의 압축( $\Delta h$ )은 탄성재료에 대한 Hooke's law에 의해 다음과 같이 계산된다(Timoshenko and Goodier, 1982).

$$\Delta h = h \left( \frac{\sigma_n}{E} \right) \quad (2)$$

여기서,  $h$ 는 거친 절리 표면의 높이이고,  $E$ 는 재료의 탄성계수이다. 원형 하중이 반공간에 가해질 때의 탄성변형은 Boussinesq 해로 구해진다(Timoshenko and Goodier, 1982). 원형 하중의 반경이  $a$ 일 때 원의 중심에서 거리  $r$ 에 위치한 지점의 변형은 원형 하중 반경 내에서는

$$w_{ii} = \frac{4(1-\nu^2)q_i a}{\pi E} E \left( \frac{\pi}{2}, \frac{r}{a} \right) \quad (3)$$

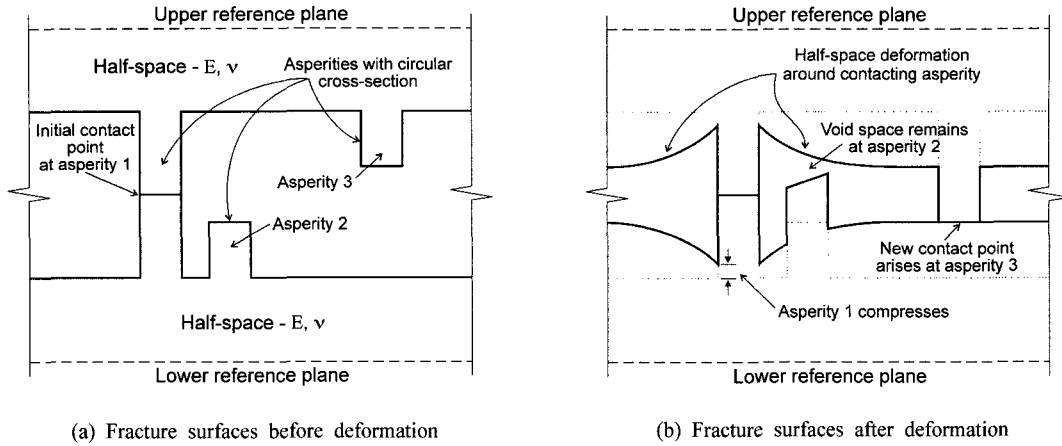


Fig. 3. Sketch of fracture closure model considering asperity compression and half-space deformation.

이며 하중 반경 외에서는

$$w_{ij} = \frac{4(1-\nu^2)q_j r}{\pi E} \left[ E\left(\frac{\pi}{2}, \frac{a}{r}\right) - \left(\frac{1-a^2}{r^2}\right) F\left(\frac{\pi}{2}, \frac{a}{r}\right) \right] \quad (4)$$

으로 결정된다. 식 (3), (4)에서  $w_{ii}$ 는  $i$  지점에 작용하는 균일 응력  $q_i$ 에 의한  $i$  지점에서의 변형이고  $w_{ij}$ 는  $j$  지점에 작용하는 균일 응력  $q_j$ 에 의한  $i$  지점에서의 변형이다. 또한,  $\nu$ 는 포아송 비이고  $E(a, b)$ 와  $F(a, b)$ 는 완전 타원 적분(complete elliptic integral)이다.

Fig. 3은 간단한 절리 표면에서의 접촉지점과 반공간의 변형을 도시화한 것으로서, 접촉지점의 위치에 따라서 변형 거동이 달라짐을 볼 수 있다. 즉, 접촉지점이 가까이에 위치한 열린 거친 면은 반공간의 변형 후에도 열려 있으나 접촉지점에서 상대적으로 멀리 위치한 거친 면은 반공간의 변형으로 인해 닫혀 또 다른 접촉지점이 되는 것을 보여준다.

Cook(1992)은 상부와 하부의 기준면으로부터 절리 면 높이의 합으로부터 복합 프로파일(composite profile)을 제시하였다. 본 연구에서는 통계적 방법에 의해 발생된 간극분포로부터 절리의 수직변형 거동을 모사하였는데 이는 복합 프로파일과 동일한 개념으로 볼 수 있다. 즉, 두 기준면에서 간극 분포를 뺀 것이 절리의 수직변형 거동을 결정하는 것으로 결과적으로 간극 분포가 수직변형 거동을 결정하는 중요한 요인이 되는 것이다.

#### 4. 절리의 수리해석 모델

단일 절리에서의 유체의 흐름에 관한 가장 간단한 모델은 평판 모델이며, 두 개의 평판이 일정한 거리(간극)로 떨어져 있는 것이다. 이러한 경우, 유량  $Q$ 와 간극  $e$ 와의 관계는 Navier-Stokes 식으로부터 유도된 cubic law에 의해 다음과 같이 표현된다(Zimmerman and Bodvarsson, 1996).

$$Q = \frac{e^3}{12\mu} W \nabla P \quad (5)$$

여기서,  $\mu$ 는 유체의 점성도,  $W$ 는 유체가 흐르는 간극의 폭, 그리고  $\nabla P$ 는 압력구배이다.

본 연구에서는 압력구배로 인한 간극 내 유체의 흐름 및 압력분포를 계산하기 위해 유한차분법을 사용하였다. cubic law가 국부적으로 타당하다고 가정하면 각각의 유한차분 요소에서의 유체 흐름에 대한 저항을 결정하여 반복법을 통해 압력을 계산할 수 있다. 본 연구에

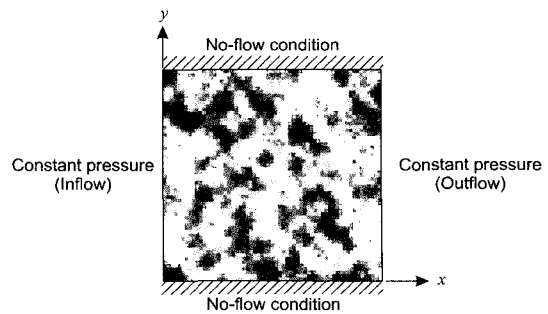


Fig. 4. Boundary conditions for the finite difference model.

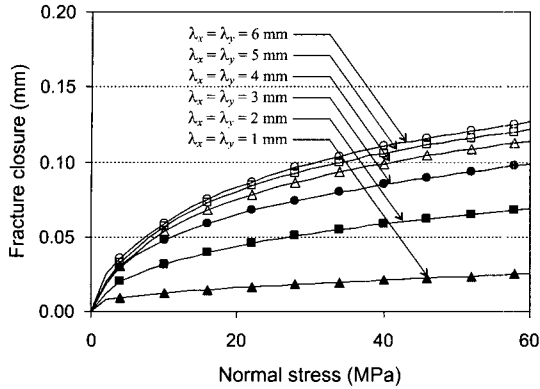


Fig. 5. Fracture closure as a function of normal stress for different spatial correlations.

사용된 경계조건은 Fig. 4와 같이 좌측과 우측 경계에는 압력 조건을 부과하였고 상부와 하부 경계에는 no-flow 조건을 부과하였다.

## 5. 수치해석

본 연구에서는 1 mm 정규 격자 간격으로 60 mm × 60 mm의 인공절리를 발생시켜 절리의 수직변형 거동 및 수치해석을 실시하였다. 초기 평균 간극과 접촉 면적은 각각 200 μm와 1%이며, 암석의 물성은 화강암을 가정하여 탄성계수 60 GPa와 포아송 비 0.25를 사용하였다. 인공절리의 공간 상관길이는 1 mm에서 6 mm까지 1 mm 간격으로 증가시키며 발생하였다.

### 5.1 절리의 수직변형 거동

Fig. 5는 수치해석을 통한 절리의 수직변형을 수직응력에 대해 그래프로 나타낸 것으로서 사용된 모델이 탄성에 기초한 것임에도 불구하고 전형적인 비선형 거동을 보여주고 있으며, 수직변형이 증가할수록 그 기울기가 감소함을 알 수 있다. 수직변형 곡선에서 볼 수 있듯이 간극분포의 공간 상관길이가 증가할수록 절리의 수직변형이 증가하는 경향을 보이고 있으며, Lee and Harrison(2001)은 비선형 회귀분석을 통해 절리의 수직변형에 관한 경험식의 변수들을 공간 상관길이에 따라 결정한 바 있다.

Fig. 6은 수직변형 곡선(Fig. 5)으로부터 절리의 수직강성을 수직변형에 대해 계산한 것으로 절리의 수직강성이 절리의 수직변형이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 간극분포의 공간 상관길이가 증가할수록 수직강성이 감소함을 보이고 있다. 특히, Pyrak-Nolte and Morris(2000)는 절리의 수직강성은

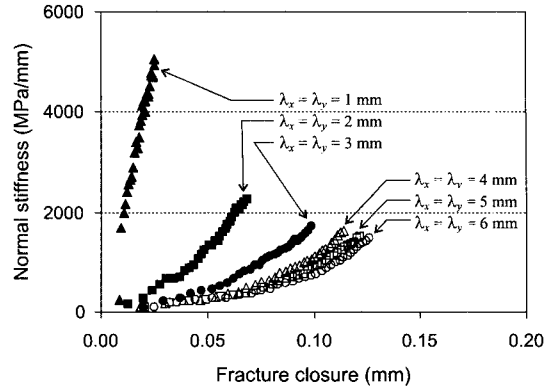


Fig. 6. Fracture normal stiffness as a function of fracture closure for different spatial correlation.

절리의 수리학적 거동과 관계가 있음을 보여주었다.

절리의 수직변형 거동이 간극분포의 공간 상관길이에 영향을 받기 때문에 간극분포의 변화를 정량적으로 고찰하는 것이 필요하다. Fig. 7은 간극분포의 변화를 수직응력(좌측에서 우측)과 공간 상관길이(상부에서 하부)에 대해 도시화한 것으로 수직응력이 증가함에 따라 미소 간극(검은색)이 증가함을 볼 수 있다. 이러한 현상은 공간 상관길이가 증가함에 따라 더욱 분명하며, 높은 수직응력하에서도 공간 상관길이가 큰 경우에는 열린 간극(흰색)의 연결도가 증가함을 정량적으로 파악할 수 있다. 이는, 매우 높은 수직응력하에서도 간극의 연결성이 존재한다는 실험결과(Durham and Bonner, 1994)와 부합한다.

### 5.2 절리의 수치해석

Fig. 8은 절리의 수리간극과 수직응력의 관계를 보여주는 그래프로써 초기 수직응력 부과시에 수리간극의 빠른 감소를 보여주고 있으며, 이러한 현상은 실험결과에서도 나타난다(Pyarak-Nolte et al., 1987). 절리의 수직변형 거동에서 예상할 수 있는 바와 같이, 간극분포의 공간 상관길이가 증가함에 따라 수리간극(간극 분포와 등가의 평판 모델의 간극)의 변화가 더욱 커짐을 알 수 있다. 따라서 높은 수직응력의 조건에서는 간극 분포의 공간 상관길이가 작은 경우가 절리의 공간 상관길이가 큰 경우보다 오히려 수리간극이 커질 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 절리의 수리간극과 수직강성의 관계를 보여준다. 절리의 수직강성이 수직변형 거동에 의존하기 때문에 수리간극과 수직강성의 관계로부터 절리의 수리학적 용량을 수직변형 이력에 대해 예측할 수 있을 것이다.

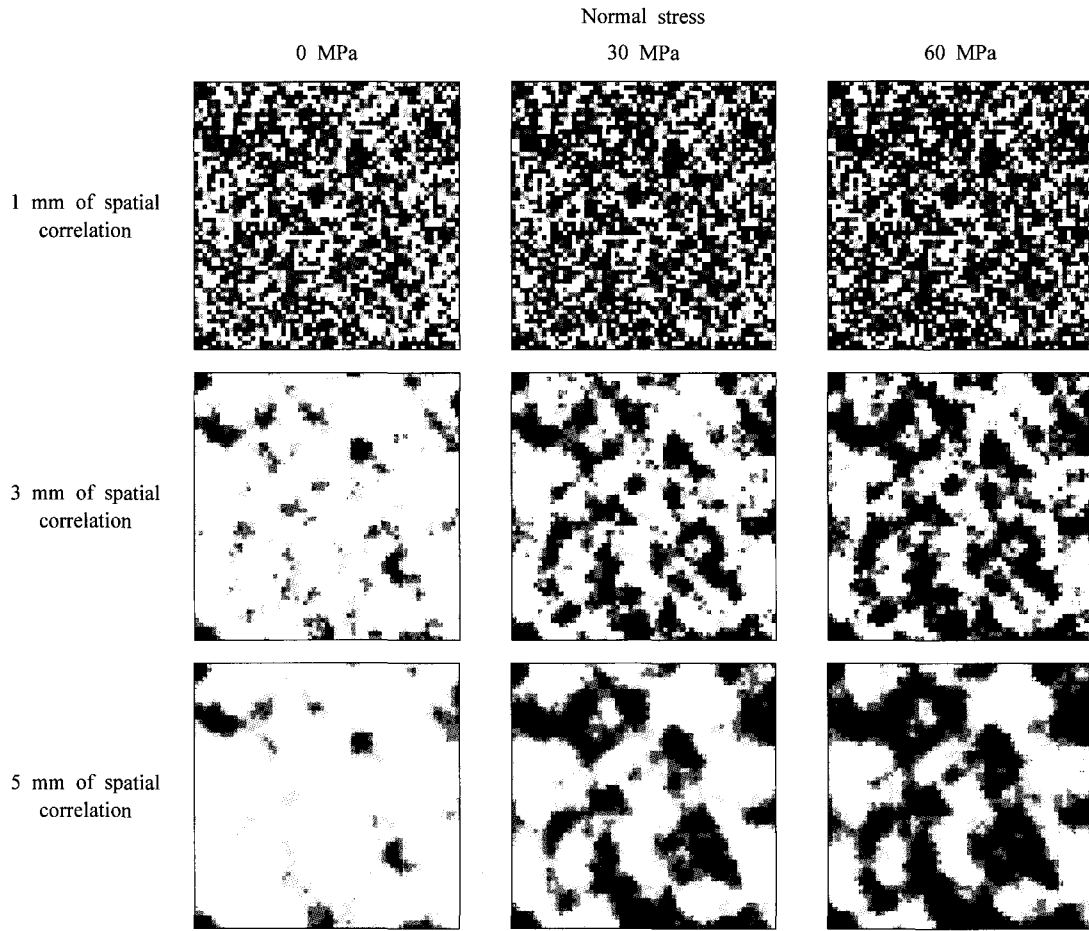


Fig. 7. Aperture distributions with different spatial correlations subjected to normal stress.

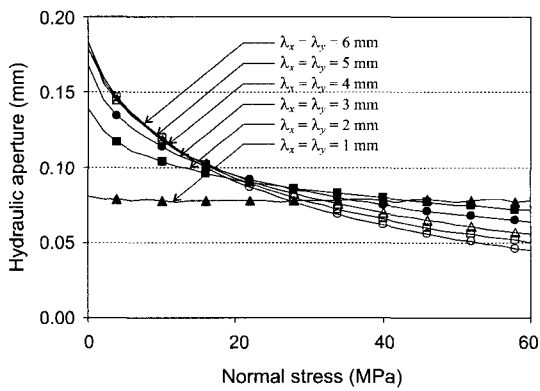


Fig. 8. Hydraulic aperture as a function of normal stress for different spatial correlations.

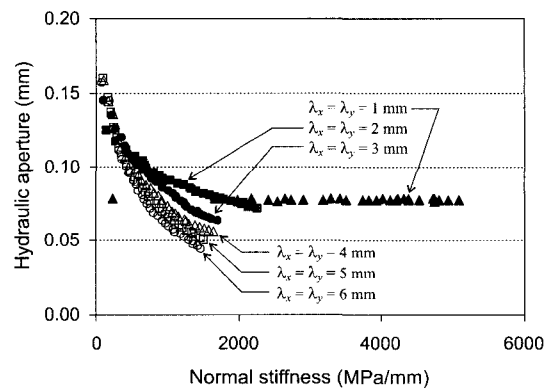


Fig. 9. Hydraulic aperture as a function of fracture normal stiffness for different spatial correlations.

## 6. 결 론

통계적 방법에 의해 발생된 인공 절리를 바탕으로 본 연구에서는 수직 변형거동 모델과 수리해석 모델을 개발하였다. 여러 가지 간극 분포에 대한 절리의 수직 변형거동과 투수성에 대한 수치해석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 통계적 방법으로 발생된 인공 절리에 대한 ACF 곡선에 의하면 입력된 공간 상관길이가 증가할수록 계산된 ACF가 느린 감소를 보여 정량적으로 제어 가능한 인공 절리를 발생시킬 수 있음을 보였다. 또한, 공간 상관길이가 증가할수록 간극의 연결도가 증가함을 보여 정성적으로 투수성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 절리의 공간 기하구조에 따른 수직변형을 고려한 수직변형 모델을 개발하였고, 이를 이용한 전산해석 결과 간극의 공간 상관길이가 증가할수록 수직변형이 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 그리고 이에 따른 절리의 수직 강성도가 수직변형의 증가에 따라 증가하는 것을 볼 수 있었다. 특히, 공간 상관길이가 클 경우에는 높은 수직응력하에서도 간극의 연결도가 존재하는 것으로 나타나 간극의 기하구조가 중요함이 확인되었다.
- 3) 수직변형에 따른 절리의 투수성 해석에 의하면, 공간 상관길이가 증가할수록 수리간극의 감소 구배가 증가하는 것으로 나타나 절리의 투수성이 수직변형과 직접적인 관계가 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과에 의해 단일 절리의 수직변형 거동 및 투수성이 간극의 공간 상관길이에 직접적인 영향을 받을 수 있었으며, 이는 절리의 전단 변형거동과 수리해석을 통해 절리 암반의 수리-역학적 거동을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김태혁, 이정인, 2000, 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 암석절리의 역학적 특성 변화, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 10.2, 180-195.
2. 이희석, 박연준, 유광호, 이희근, 2000, 압축과 전단 하중을 받는 인공 암석 절리의 수리적 거동에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 10.1, 45-58.
3. Bandis, S.C., A.C. Lumsden and N.R. Barton, 1983, Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 20, 249-268.
4. Brown, S.R. and C.H. Scholz, 1985, Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, J. Geophys. Res. 90, 12575-12582.
5. Brown, S.R., 1987, Fluid flow through rock joints: The effect of surface roughness, J. Geophys. Res. 92, 1337-1347.
6. Cook, N.G.W., 1992, Natural joints in rock: Mechanical, hydraulic and seismic behavior and properties under normal stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 29, 198-223.
7. Durham, W.B. and B.P. Bonner, 1994, Self-propping and fluid flow in slightly offset joints at high effective pressure, J. Geophys. Res. 99, 9391-9399.
8. Gale, J.E., 1982, The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships, Proc. 23rd Rock Mech. Symp., New York, 290-298.
9. Gale, J.E., 1987, Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture and stress-flow properties, Proc. 28th U.S. Symp. Rock Mech., Tucson, 1213-1222.
10. Goodman, R.E., 1976, Method of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing, New York.
11. Greenwood, J.A. and I.W. Williamson, 1966, Contact of nominally flat surface, Proc. R. Soc. London, A295, 300-319.
12. Hopkins, D.L., 1990, The effect of surface roughness on joint stiffness, aperture, and acoustic wave propagation, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
13. Iwano, M. and H.H. Einstein, 1993, Stochastic analysis of surface roughness, aperture and flow in a single fracture, Proc. Eurock 1993 Symp., Lisbon, 135-141.
14. Lanaro, F., 2000, A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 37, 1195-1210.
15. Lee, S.D. and J.P. Harrison, 2001, Empirical parameters for non-linear fracture stiffness from numerical experiments of fracture closure, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 38, 721-727.
16. Lee, S.D., 2002, A study of the influence of surface and void geometry on the hydro-mechanical behaviour of rock fractures, Ph.D. thesis, Imperial College, London.
17. Moreno, L., Y.W. Tsang, C.F. Tsang, F.V. Hale and I. Neretnieks, 1988, Flow and tracer transport in a single fracture: A stochastic model and its relation to some field observations, Water Resour. Res., 24, 2033-2048.
18. Patir, N., 1978, A numerical procedure for random generation of rough surfaces, Wear, 47, 263-277.
19. Pyrak-Nolte, L.J., L.R. Myer, N.G.W. Cook and P.A. Witherspoon, 1987, Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, Proc. 6th Congr. Rock Mech., Montreal, 225-231.
20. Pyrak-Nolte, L.J. and J.P. Morris, 2000, Single fractures

- under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, 245-262.
21. Raven, K.G. and J.E. Gale, 1985, Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 22, 251-261.
22. Timoshenko, S.P. and J.N. Goodier, 1982, *Theory of elasticity (3rd)*, McGraw-Hill, London.
23. Tsang, Y.W. and C.F. Tsang, 1989, Flow channeling in a single fracture as a two-dimensional strongly heterogeneous permeable medium, *Water Resour. Res.*, 25, 2076-2080.
24. Witherspoon, P.A., J.S.Y. Wang, K. Iwai and J.E. Gale, 1980, Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resour. Res.*, 16, 1016-1024.
25. Zimmerman, R.W. and G.S. Bodvarsson, 1996, Hydraulic conductivity of rock fractures, *Transport in Porous Media*, 23, 1-30.



### 이 승 도

1993년 한양대학교 자원공학과 공학사  
 1995년 한양대학교 암반공학 공학석사  
 2002년 영국 Imperial College 지구과학  
 공학과 공학박사

Tel:

E-mail: seung-do.lee@ic.ac.uk

현재 영국 Imperial College 지구과학공  
 학과 연구원

---