

3차원 레이저 측정기를 이용한 절리 간극의 측정

이희석* · 이연규** · 이희근***

Measurement of Joint Aperture Using 3-D Laser Profilometer

Hee-Suk Lee*, Youn-Kyou Lee** and Hi-Keun Lee***

ABSTRACT: Aperture is an important parameter for determining the hydraulic characteristics of fractured media. In this study the topography of artificial rock joint surface was measured using 3D laser profilometer to analyze the aperture distribution. The initial aperture distribution was determined when the contact area became one percent of total joint surface. The initial aperture distribution of granite joint, with the mean value of 0.78 mm and the standard deviation of 0.34 mm was much different from that of the marble joint, with the mean value of 0.57 mm and the standard deviation of 0.26 mm. Apertures of both granite and marble showed normal distributions. Aperture distribution with the contact area of 25% was also analyzed. Mean value was decreased to one third compared to the initial aperture, but the standard deviation was decreased slightly. To determine the spatial correlation of the aperture distribution variogram analysis was carried out on the initial aperture data. Most experimental variograms were fitted well with exponential model. It is expected that the measured aperture characteristics can be used for stochastic analysis of fluid flow through rock joints.

서 론

최근 폐기물처분, 지하수 개발, 지하구조물 건설과 같은 지하 관련 공사의 증가에 따라 지하 암반내 지하수 유동의 특성과 경로에 대해 많은 연구들이 진행되고 있다. 이때까지 국내의 지하수 관련 연구는 주로 다공질 매체로 고려되는 연속체 해석에 국한되어 왔다. 하지만, 방사성 폐기물 처분, 에너지 저장 지하공동과 같은 대규모 프로젝트에서는 국부적인 유동장의 변화가 매우 중요하며, 개별적인 절리를 통한 유체 유동과 오염물 이동에 대한 이해가 필요하다. 암반, 특히 결정질 암반층 내의 지하수 유동 특성은 주로 절리면을 따

라서 벌어진 간극 (aperture)의 특성에 의존한다. 과거에는 불연속면 내의 유체유동을 기술하기 위한 방법으로서 주로 삼승법칙 (cubic's law)이 적용되었다 (Snow, 1965, Witherspoon *et al*, 1980). 삼승법칙은 불연속면을 평평한 두 개의 판으로 가정하고 절리 간극 내 고유 투수계수가 간극 너비의 삼승에 비례한다는 것으로서, 간단한 수식과 높은 적용성 때문에 절리내 유동을 모사하는데 많이 사용되어왔다. 하지만 실제 암석 절리는 다양한 규모의 거칠기 (roughness)와 경사 (inclination)를 포함하고 있기 때문에 실제 유동과 삼승법칙 간에는 상당한 차이가 존재한다. 따라서 정확한 절리내 유동과 오염물 이동 거동의 해석이 필요한 경우에는 거칠기가 포함된 실제 절리에 대한 간극 분포에 대한 정보가 필요하다.

Gentier (1986)가 단면계로 측정된 두 절리면을 서로 맞추어서 절리 간극을 직접 측정하려는 시도를 한 이후 Gentier *et al*. (1989), Iwano and Einstein (1993), Hakami (1995), Hakami *et al*. (1996), Keller (1998)에 의해 절리 간극 특성과 채널링 유동 특성에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 하지만 실제 절리는 다

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 Post Doc. (School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University), E-mail: ichsuk@rockeng.snu.ac.kr

** 군산대학교 해양과학대학 해양시스템공학과 전임강사 (School of Ocean Applied Science and Technology, Kunsan National University)

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University)

양한 하중조건 하에 있으며, 하중 변화에 따른 간극의 변화를 정확히 측정하는 것은 실험상 거의 불가능하다. 따라서 절리의 수리적 특성을 파악하기 위해서는 기본 간극 구조를 파악하여 이를 토대로 다양한 조건에서의 간극 분포의 특성을 예측하는 기법이 필요하다.

본 연구에서는 암석 절리 간극의 기본구조에 대한 정보를 얻기위해 먼저 절리 간극의 기본 특성 및 측정 방법에 대해 고찰하였으며, 3차원 레이저 측정기를 이용하여 측정된 불규칙한 거친 인공절리 단면에 대한 절리 간극 분포를 결정하였다. 또한 측정된 간극 분포의 기본 특성을 조사하였으며, 베리오그램을 이용하여 간극 분포의 공간상관성을 해석하였다.

간극의 정의 및 측정법

간극의 정의

간극 (aperture)은 흔히 절리 간극 공간 (void space) 정도로 알려져 있지만 보다 정확한 측정 및 해석을 위해서는 뚜렷한 수학적 정의가 필요하다. Fig. 1은 본 논문에서 사용된 간극의 정의를 나타내고 있다. 전반적인 균열 표면들은 기준면에 평행하게 결정된다. 임의의 한 점에서의 간극 b 는 기준 평면에 수직한 방향으로의 양 표면 사이의 거리로 정의된다. 따라서 따라서 간극은 최소 0에서 최대 값까지의 점 분포로서 정의될 수 있다. 이때의 간극 분포의 평균 값은 흔히 역학 간극 (mechanical aperture)이라 한다 (Esaki *et al.*, 1998). 여기서 접촉면적은 이론상 간극이 0이 되는 점들의 영역이지만, Hakami *et al.* (1995)은 현실적인 측정방법의 오차를 고려하여 간극들이 임의의 임계값보다 작은 영역으로 정의했다.

이들 간극 분포 특성은 대부분 평균과 표준편차와

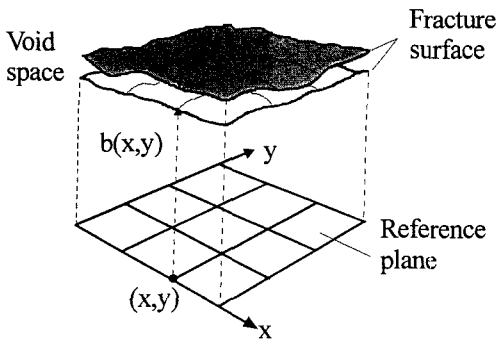


Fig. 1. Definition of aperture.

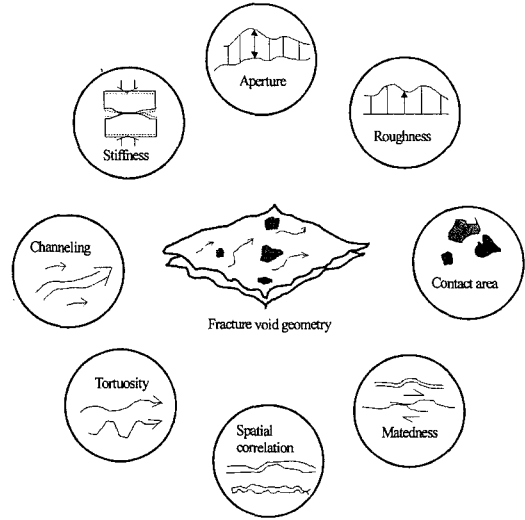


Fig. 2. Properties of discontinuity determined by fracture void geometry and its relation to hydro-mechanical behavior.

같은 일반 통계 변수들을 사용하여 정량화될 수 있다. 실제 절리 간극 분포를 완전히 동일하게 재현할 수 없으므로, 대부분의 절리내 유체 유동 해석에는 이들 간극 분포의 일반 통계 특성들이 입력자료로 사용된다.

또한 간극 공간은 절리면에 가해진 하중에 따라 가변적이므로 기준 응력 수준이 정의되어야 서로 자료를 비교할 수 있다.

암석 절리의 간극 분포 특성은 수리적 특성 뿐 아니라 다양한 역학적 변수들과 깊은 상호 관련이 있다. 거칠기, 접촉 면적, 비틀림 정도, 채널링, 강성 등은 간극과 직접적인 관련이 있는 주요 절리 변수들이다. Fig. 2는 이들 절리변수들 간의 관계를 도해적으로 보여주고 있다.

절리 거칠기 (roughness)는 개별 절리 표면의 형상과 관련된 변수인데 대개 간극과 유사한 표면 높이 분포로서 구해지며, 이를 표준 거칠기 단면에 비교하여 절리거칠계수 (JRC, Joint Roughness Coefficient) 등의 기준 척도를 구할 수 있다 (Barton, Choubey, 1977). 거칠기는 주로 절리의 역학적 특성과 관련된 변수이지만, 간극 특성을 파악하는데 거칠기 변수를 사용하고 거칠기와 간극을 관련시키려는 시도들이 있어 왔다 (Brown, Scholz, 1985, Gentier, 1986, Brown, 1987). 하지만 이들 관계는 단일한 것이 아니며, 다른 변수들의 영향과 결합되어 복잡하게 나타날 것으로 생각된다.

접촉 면적 (contact area)은 역학적, 수리적 특성을

규정하는 중요한 변수이다. 수직 응력의 함수로서 접촉면적을 측정하는 방법은 압력-감응 용지 (pressure-sensitive paper)를 이용한 방법 (Duncan and Hancock, 1966), 변형성 수지 필름을 이용한 방법 (Iwai, 1976, Bandis *et al.*, 1983), 액체 금속 주입법 (Pyral-Nolte *et al.*, 1987) 등이 실시되었지만 아직까지 임의 하중에서의 절리 접촉면적 특성에 대한 자세한 연구 결과는 거의 없다.

맞물림 정도 (matedness)는 두 표면들의 일반적인 맞물림 정도를 표현한다. 맞물림 정도는 전단력에 의해 한 균열 표면이 이동될 때 크게 달라지며 1 mm 미만의 약간의 차이라도 간극 분포와 역학적 특성에 큰 영향을 미친다.

공간 상관 (spatial correlation)은 절리 표면 내 각 점에서 간극 변화가 얼마나 급격하게 또는 천천히 일어나는가를 기술하는 변수이다. (반)베리오그램 (semi-variogram)이 공간 변수의 추계적 (stochastic)인 해석을 위한 주요 수단이 된다 (Isaacs and Srivastava, 1989). 베리오그램의 곡선은 간극 분포의 상관정도를 표현하며 이들 곡선의 특징은 영향범위 (range)와 평탄값 (sill)으로 나타낼 수 있다.

완곡도 (tortuosity)는 간극공간의 기하에 의해 유동 양상이 영향을 받게 되는 정도를 의미한다. 인공절리는 일반적으로 천연 절리에 비해 완곡도가 크므로 유동 양상이 더욱 복잡하게 나타날 것이다. 간극분포는 지하수압과 유동 속도의 변이에 큰 영향을 미친다.

채널링 (channelling)은 단일 및 다중 절리계에서 간극 공간 내의 유동속도의 차이를 말한다. 단일 절리 내의 채널링 효과의 이유는 간극이 서로 잘 상관되어 있기 때문이다. 현장에서의 추적자 시험은 이러한 채널링 현상을 잘 설명하고 있다 (Abelin *et al.*, 1991).

절리 강성 (stiffness)은 절리의 변형을 나타내는 기본 역학적 물성이며 간극 분포와 접촉면적에 의해 크게 영향을 받는다. Pyral Nolte (1995, 1997)는 절리를 통한 유체 유동과 비강성 (specific stiffness)과의 상호관계를 연구했으며 강성이 큰 절리에서 더 작은 유체 유동이 일어난다고 했다.

간극 측정법

절리 간극은 매우 미세한 공간이므로 정확한 측정이 매우 어렵다. 이때까지 간극 측정법은 크게 표면표고법, 주입법, 주조법 등이 시도되어 왔다.

표면 표고법 (surface topography approach)은 표면

을 이동하는 단면계로 표면을 측정하는 방법으로서 Gentier (1986)에 의해 처음 사용되었다. 균열 단면들을 따라서 위치와 표면 높이가 연속적으로 기록된 후 반대편 단면이 맞추어지고 두 단면을 수치적으로 겹쳐서 결과적인 간극을 계산한다. 이 방법의 문제점은 단면들을 정확한 상대위치를 측정하기가 힘들기 때문에 단면들을 맞추는데 있으며 또한 단면계 스타일러스 크기가 측정 정밀도를 결정한다. 레이저 측정장치의 개발은 이들 측정정밀도를 상당히 향상시켰다.

주입법 (injection approach)은 Gale *et al.* (1987)에 의해 사용되었으며 원주형 절리에 중심 공을 통해 수직응력을 가한 상태에서 수지를 주입한 후 경화시켜서 수직 단면으로 절단한다. 광학현미경으로 수지의 두께와 단면을 개별 간극 분포를 측정한다. Hakami (1993)는 현장에서 절리에 수지 또는 시멘트 그라우트를 주입하는 비슷한 방법을 사용했다. 이 방법의 치명적 단점은 시료가 손상되어 더 이상의 다른 용도로 사용할 수 없다는 것이다. 최근에는 형광 에폭시 수지와 자료획득과 측정을 쉽게 해주는 이미지 해석기법 (image analysis)을 사용하여 발전되었다 (Archambault *et al.*, 1997).

주조법 (casting approach)은 Gentier (1989)에 의해 사용되었으며 절리 간극 공간의 투명 염색 복제물 (transparent replicas)을 만들어서 이의 사진을 찍어 해석하는 방법이다. 이와 비슷한 방법은 균열 표면 자체의 복제물을 만들어서 이들을 물리적 절리 모델로부터 맞추는 것이다. 유동 시험에 적당한 모델을 만들기 위해 Hakami (1995)는 투명한 재료의 복제물을 만들어서 유동 시험 중의 색깔이 있는 물이 주입될 때 복잡한 유선 (streamline)이 관찰될 수 있도록 했다. 이외에 최근에는 X선 CT 촬영기를 통해 절리 단면 특성을 분석하는 새로운 방법이 도입되었다 (Keller, 1998).

이들 간극측정법들은 각각 장단점을 가지고 있으며 정밀도 및 측정 용도 등을 고려하여 신중하게 측정방법을 선택해야 한다. 본 연구에서는 간극측정을 한 시료를 이용하여 이후에 유체 유동 시험을 실시하기 위하여 주로 표면표고법을 이용하였다.

시료, 실험장치 및 실험방법

시료

인공 절리 생성을 위한 암석 시료는 황동화강암, 여

산대리석의 두 가지를 사용하였다. 황동화강암은 전라북도 황동 지방에서 산출되는 중생대 유라기의 화강암으로서, 대부분 중·조립질로 나타나는 석영, 미사장석, 알칼리장석, 사장석, 흑운모 등이 주구성 광물을 이루고 있다. 현미경 관찰 결과 사장석과 알칼리장석의 경우 전운모 혹은 백운모로 일부 변질되었으나 흑운모는 전혀 변질이 일어나지 않았고 미세절리도 거의 관찰되지 않는 등 매우 신선한 암석이다. 여산대리석은 전라북도 여산에서 산출되는 유백색의 조립질 암석이다. 현미경 관찰 결과 부분적으로 녹니석을 포함하지만, 전반적으로 방해석 결정으로만 구성되어 있는 전형적인 대리석으로서 결정의 크기는 대부분 0.3~2 mm 정도로 아주 큰 편이다. 방해석 결정은 부분적으로 변성 작용을 받은 흔적이 보이며 풍화는 전혀 진행되지 않은 매우 신선한 시료이다. 이들 암석에 대한 자세한 역학적 물성은 이희석 등 (1999)에 나와 있다.

인공 절리 시료는 실험실에서 제작하였다. 우선 결합이 없는 2가지 암종의 암석 덩어리를 다이아몬드 톱을 사용하여 가로×세로×높이가 120×120×110 mm 가 되도록 직육면체로 절단하였다. 블록 형태로 성형한 시료는 양쪽 끝면을 표면연삭기로 연삭하였다. 이렇게 준비된 시료는 Fig. 3에 나타낸 것과 같은 인장균열 발생장치의 양쪽 가압판 사이에 놓고 중심선을 따라서 급격한 하중을 가하여 인위적인 거친 절리면을 생성하였다. 이러한 절리면은 현장의 천연절리보다는

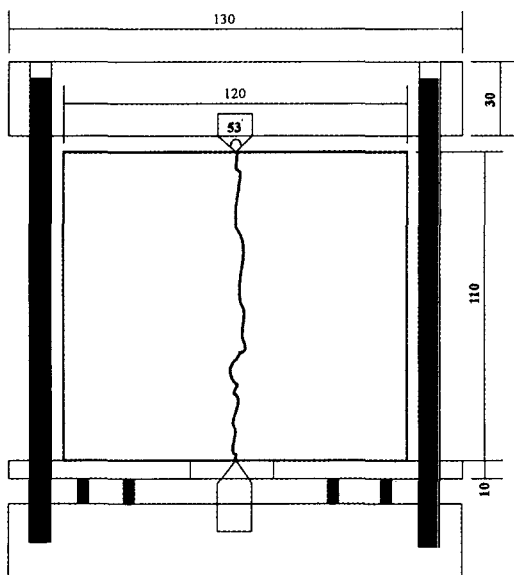


Fig. 3. Splitting rock sample to create artificially fractured joint.

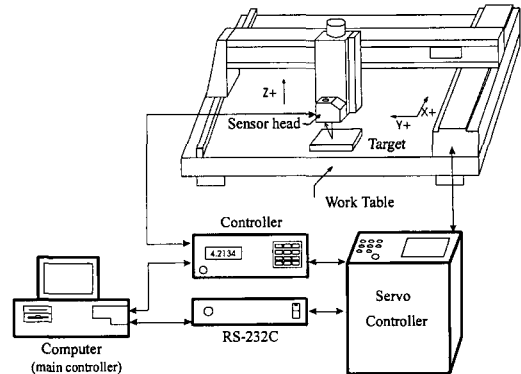


Fig. 4. Schematic diagram of the coordinated measuring machine.

더 거칠지만, 절리 거칠기 분포가 완전히 무작위적인 전형적인 암석 절리로 간주할 수 있다. 또한 완전히 평평한 절리의 간극 특성을 고찰을 위해 암석 시료를 표면 연삭기로 연삭한 평면절리 시료를 제작하였다.

실험장치

본 연구에서는 절리 단면 표고 측정을 위해 이정인과 배기운 (1999)이 제작한 비접촉식 3차원 레이저 측정기를 사용하였으며, 전체적인 모습을 도해적으로 Fig. 4에 나타내었다. 이 3차원 측정기는 레이저 변위계 (laser profilometer), 위치 지정 시스템 (positioning system), 자료 출력과 전체 시스템을 제어할 수 있는 컴퓨터 이렇게 세 부분으로 되어 있다. 위치 지정 시스템은 다시 위치 지정 제어부와 작업 테이블로 나뉜다. 레이저 변위계는 일본 Keyence 사에서 만든 LC-2450이고 위치지정 제어기는 일본 OHM 사에서 만든 PS-20T, PS-101C인데, X축, Y축 방향의 제어는 PS-20T에 의해, Z축 방향의 제어는 PS-101C에 의해 이루어진다. 작업테이블은 실제 측정 작업을 수행하는 부분이다. X축은 좌우로 움직이고 Y축은 테이블 앞뒤로 이동하며 Z축은 상하 운동을 한다. 각 축은 각기 독립적으로 구동할 수 있으며 Z축의 끝에는 레이저 변위계가 연결되어 있다. 레이저 변위계는 3차원 측정기의 가장 핵심적인 부분으로서 변위계가 레이저를 측정 지점에 쏠 때 그 측정 지점에서 반사된 빛의 각도에 의해 변위를 측정한다. 레이저 빔은 파장은 670 nm, 최대 출력은 1.9 mW이며 초당 20,000 번 데이터를 측정한다. 최소 측정한도는 0.5 μm이고 센서헤드로부터 5 cm 떨어진 지점을 중심으로 ±8 mm의 측정범위를 갖는다. 전체 시스템을 제어하는 컴퓨터 프로그램은 배기운 (1999)에 의해 제작되었다. 이 프로그램은 특정

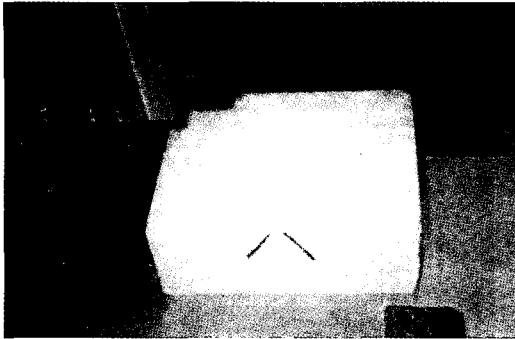


Fig. 5. A view of measuring joint profile using laser profilometer.

위치에 레이저 변위계를 위치시키고 레이저 변위계에서 읽어들이 측정 값을 ASCII 파일로 저장시키는 기능을 가지며 초기에 측정 범위와 측정 간격만 입력시키면 모든 과정이 자동으로 이루어진다.

실험방법

절리 단면의 측정 방법은 다음과 같다. 먼저 레이저 변위계의 산란에 따른 측정오차를 막기 위해 절리면들을 흰색 아크릴 물감으로 고르게 칠한다. 측정시 절리면 상하 위치가 정확히 동일해야 하므로 X-Y 테이블 상에 정확히 절리 위치를 표시하고 사각형 4면의 위치를 먼저 검사해서 절리면 상 하면이 일치하는지를 확인한 후 각각 상 하면에 대해서 측정한다. Fig. 5에 시료 절리 면의 표면 형상을 측정하는 모습을 보여준다.

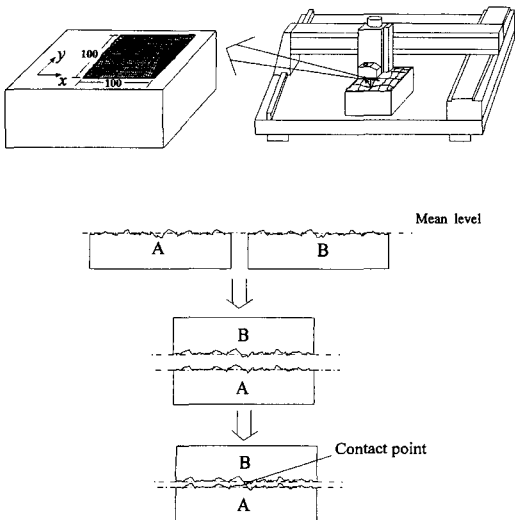


Fig. 6. The diagram showing procedure for aperture determination.

본 연구에서는 기본적으로 Iwano와 Einstein (1983)에 의해 사용된 것과 유사한 표면표고법을 이용하여 절리 간극을 측정하였다. 이 연구에 사용된 간극 측정법의 기본원리를 Fig. 6에 도해적으로 나타내었다. 레이저 변위계에 정확한 X, Y 좌표에 정밀하게 상 하부 시료를 놓은 후에 X, Y 방향으로 1 mm의 측정간격으로 10 cm×10 cm의 범위의 표고를 측정한다. 센서헤드에서 붉은 색의 레이저 빔이 X, Y 테이블의 이동을 따라서 시료 면에 반사되어 상대 높이가 측정된다. 총 측정 점의 숫자는 10201점이며 한 단면당 측정 시간은 약 2시간 정도가 소요되었다. 화강암 인공절리 15개 시료, 대리석 인공절리 11개 시료 그리고 대리석 평면절리 1개 시료에 대해 측정 결과를 얻었다.

측정된 결과를 ASCII 파일로 저장하여 FORTRAN 프로그램으로 작성된 간극 계산용 프로그램을 통해 두 표면 높이를 수치적으로 중첩시켰다. 디지털 이미지의 관점으로부터 두 맞닿은 표면들에 의해 형성되는 절리 간극은 두 표면들 사이의 단순한 산술차이지만, 여기에는 추세 값 (trend)이 포함되어 있다. 이는 시료 세팅시의 관련된 회전 및 이동과 관련 특정 경향 값이다. 이 추세 값을 다중회귀 분석 (multiple linear regression)에 의해 제거한 후 나머지 잔차 값들을 사용하여 간극을 계산하였다.

다중 회귀 분석의 방법은 다음과 같다 (Davis, 1986). 추세의 가능성을 미소 회전과 이동에 의해서만 가정한다면 2차원 평면 추세면은 최소제곱법을 통해 구할 수 있다.

$$Z = b_0 + b_1 X + b_2 Y \tag{1}$$

여기서 표고 Z는 관측의 평균과 관련되는 일련의 상수 값 (b₀)과 남서부 좌표 성분 (b₁)과 북-동부 (b₂) 성분의 선형 함수로서 간주된다. 이 식은 3개의 변수를 포함하므로 이 해법을 찾기 위해서는 세 개의 정규방정식이 필요하다.

$$\begin{aligned} \Sigma Z &= b_0 n + b_1 \Sigma X + b_2 \Sigma Y \\ \Sigma XZ &= b_0 \Sigma X + b_1 \Sigma X^2 + b_2 \Sigma XY \\ \Sigma YZ &= b_0 \Sigma Y + b_1 \Sigma XY + b_2 \Sigma Y^2 \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)에 의거하여 최적 회귀 선형 추세면 (trend surface)을 얻을 수 있다. 이 식으로부터 추세 면을 구해서 그 좌표에서의 추세 값을 원래 측정값에서 빼주면 잔차 값이 구해진다. 다른 오차를 제거한 이 잔차 값을 이용하여 두 절리면을 수치적으로 중첩시켰다.

간극 분포를 계산하기 위해서는 먼저 기준 응력 수

준이 전제되어야 한다. 본 연구에서는 반대편 표면들 사이의 접촉 접촉점이 총 측정 접의 1%가 될 때를 초기 간극분포로 가정하였다 (Esaki *et al.* 1998). 응력이 가해진 상태에서의 간극분포는 다양한 절리 면에 대한 수직 응력과 접촉면적과의 정확한 함수 관계가 밝혀지지 않은 상태에서 직관적인 형태로 구할 수밖에 없다. Iwai (1976)에 의하면, 실리콘 수지를 이용한 화강암, 대리석 인공 절리에 대한 접촉면적 변화 측정 실험에서 20MPa의 수직응력에서 화강암은 15~20%, 대리석은 25-30%의 접촉면적 비를 가지는 것으로 알려졌다.

본 연구에서는 이러한 사실에 근거하여 25%의 접촉면적 비를 가질 때의 간극분포를 수치적으로 구하여 이를 초기 간극 분포와 비교하였다. 비록 이 값은 정확한 응력 수준을 예상할 수 없지만 대략 10~30 MPa 정도의 높은 수직응력이 작용할 때의 간극분포의 예상치로 가정될 수 있을 것이다.

결과 및 토의

초기 간극분포

레이저 변위계로 표면 표고를 측정된 결과를 수치적으로 중첩시켜 1%의 접촉점을 가졌을 때를 초기 간극 분포로 정의하고, 그 때의 간극 분포를 해석하였다.

Table 1은 구한 간극 분포 측정 결과의 통계치들을 보여준다. 화강암 인공 절리 전체 시료의 평균과 표준편차는 각각 0.78 mm, 0.34 mm이고, 대리석 인공 절리 전체 시료의 경우 0.57 mm, 0.26 mm로서 대리석의 간극이 더 작고 균질하게 나타났다. 이러한 이유는 화강암의 거칠기가 더 크므로 상하면의 접촉점이 닿을 확률이 대리석 보다 더 크기 때문이라 생각된다 (이희석 등, 1999).

Esaki *et al.* (1998)은 화강암과 사암 인공절리 시료에 대하여 비슷한 측정을 실시하여 각각 0.615 mm, 0.416 mm 라는 결과를 얻었으며, Yeo *et al.* (1998)은 아크릴 몰딩 자연절리 시료에 대하여 간극 측정을 실시한 바가 있다. 이들 결과들은 대부분 이 연구의 실험결과와 비슷한 범위를 보였다. Hakami, Larsson (1996)에 의한 천연 절리에 대한 측정 결과는 평균 0.36 mm로서 이 연구에서의 측정 결과보다 작게 나타났는데 이는 자연 절리에 대한 것이므로 직접적으로 비교될 수 없다. 또한 Iwano와 Einstein (1993)은 인공절리 시료에 대한 측정에서 이보다 훨씬 작은

Table 1. Statistics of initial apertures of artificial tensile and saw-cut samples.

Sample no.	E_{mean} (mm)	σ , Standard deviation (mm)	E_{max} (mm)	Coefficient of variation
GH2	0.7208	0.3332	2.1402	0.4622
GH3	1.2874	0.5015	3.0176	0.3895
GH4	0.7733	0.3444	2.1136	0.4454
GH13	0.6952	0.2927	2.6245	0.4210
GH19	1.0245	0.3964	2.96	0.3869
GH20	0.6831	0.3129	2.8585	0.4580
GH21	0.5213	0.2096	1.7280	0.4021
GH22	0.6691	0.3236	2.2722	0.4836
GH23	0.7231	0.3506	2.5137	0.4849
GH28	0.9419	0.4552	3.7508	0.4833
GH30	0.7533	0.3629	2.3936	0.4817
GH36	0.8710	0.3851	2.508	0.4421
GH37	0.6692	0.2942	2.0025	0.4396
GH38	0.8970	0.3767	3.8472	0.4199
GH41	0.5363	0.2373	2.6061	0.4425
Granite total	0.78	0.34	2.62	0.4359
MH2	0.5997	0.2929	2.0205	0.4884
MH7	0.5815	0.2528	3.5737	0.4347
MH11	0.543	0.2460	1.5369	0.4530
MH17	0.5725	0.256	1.7229	0.4471
MH21	0.4941	0.2251	2.3454	0.4556
MH23	0.6465	0.2971	2.9163	0.4596
MH27	0.5834	0.2669	1.625	0.4575
MH28	0.5711	0.2731	1.8468	0.4782
MH32	0.6708	0.3122	1.8801	0.4654
MH33	0.5025	0.2505	1.7867	0.4985
MH40	0.5360	0.2619	1.8544	0.4886
Marble total	0.57	0.26	2.10	0.4561
MH saw-cut	0.1173	0.0488	0.3523	0.4160

0.12~0.15 mm의 값을 얻었다. 측정된 간극 값의 범위가 매우 작기 때문에 약간의 실험상의 조건 차이도 값의 편차를 심하게 할 수 있다. 본 연구에서 구한 평균 간극의 크기는 외국에서의 측정결과와 비슷하거나 약간 큰 값을 보였다. 평면 절리 시료의 경우 거칠기 높이 변이가 일정하므로 측정된 간극 분포의 평균과 표준편차도 인공절리 시료에 비해 훨씬 작게 나타났다. 또한 변이 계수 (Coefficient of variation, σ/E_{mean})의 값은 0.41~0.43 mm로서, 이를 통해 간극 값의 분포가 전체면에 고루 이루어져 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9에는 화강암 및 대리석 절리와 대리석 평면절리의 초기 간극 분포 표면의 3차원 형상 분포와 히스토그램을 각각 도시하였다. 모든 절

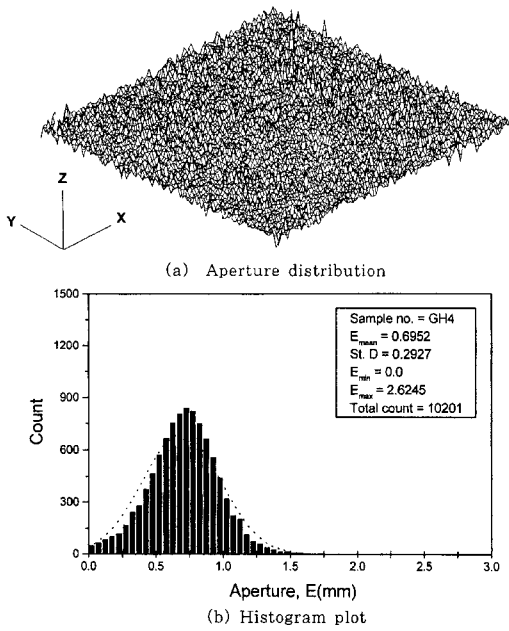


Fig. 7. A typical initial aperture distribution and histogram plot for artificial tensile joint surfaces of granite.

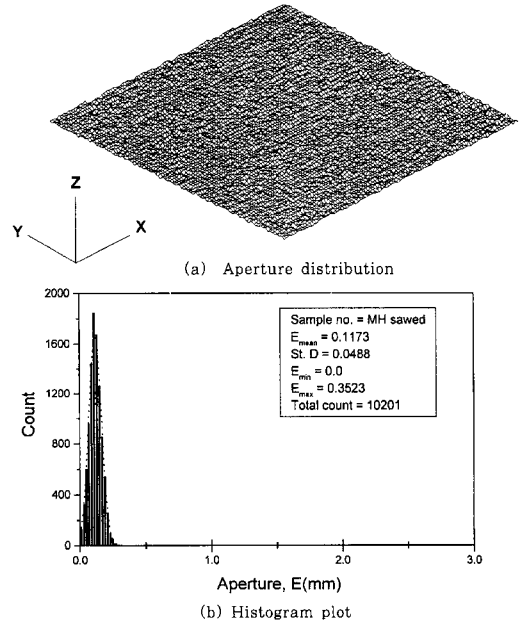


Fig. 9. A typical initial aperture distribution and histogram plot for saw-cut surfaces of marble.

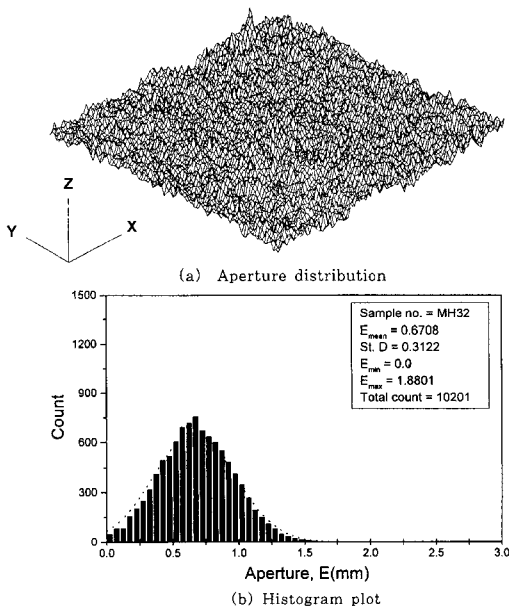


Fig. 8. A typical initial aperture distribution and histogram plot for artificial tensile joint surfaces of marble.

리 표면의 히스토그램은 점선으로 나타낸 정규 분포에 의해 잘 근사되었다. 화강암 인공절리 시료의 경우 약간 오른쪽으로 편향되는 경향을 보여주지만 대리석 인

공절리 시료는 정규 분포에 잘 근사하였다. 또한 Fig. 9에서 평면 절리 시료에 대한 간극 분포의 3차원 표현에서 보듯이 간극 분포는 일정하고 전단면에 걸쳐 골고루 분포하고 있음을 알 수 있다. 히스토그램 역시 최대 간극 값이 3.5 mm를 넘지 않고 대부분 0.05~0.2 mm 내에 분포하는 매우 밀집된 정규 분포의 형태를 보였다.

화강암과 대리석 인공 절리 시료의 간극분포에 대한 3차원 형상들을 통해 다양한 크기의 미세한 간극들이 고르게 분포함을 확인할 수 있으며, 각 암석 절리에 대한 간극 분포의 특성 차이는 육안으로는 구별하기 힘들다. 이는 그래프들에 나타낸 시료들에 대한 간극 분포의 표준편차 및 평균이 비슷하기 때문이며, 보다 정확한 분포 특성을 알기 위해서는 공간 상관성에 대한 지구통계적인 접근법이 필요하다.

재하상태에서의 간극분포

레이저 변위계로 측정된 표면 표고에 자료들을 수치적으로 중첩시켜 25%의 접촉면적 비를 가질 때의 간극 분포를 해석한 결과가 높은 수직응력 상태에서의 간극분포로 가정하였다. 화강암 인공 절리 4개 시료, 대리석 인공절리 2개 시료 그리고 대리석 평면 절리 1개 시료에 대해 자료를 얻었으며 이들을 Table 2에 나

Table 2. Statistics of inferred apertures under hypothetically high normal stress.

Sample no.	E_{mean} (mm)	Standard deviation (mm)	E_{max} (mm)	Coefficient of variation
GH4	0.2313	0.2279	1.5236	0.9853
GH13	0.1781	0.1817	2.2490	1.0202
GH22	0.2456	0.2435	1.8042	0.9915
GH38	0.2563	0.2527	1.5710	0.9859
MH23	0.2089	0.2068	2.4353	0.9899
MH32	0.2349	0.2271	1.3991	0.9668
MS*	0.0379	0.0376	0.1567	0.9926

*MS: Saw-cut marble joint

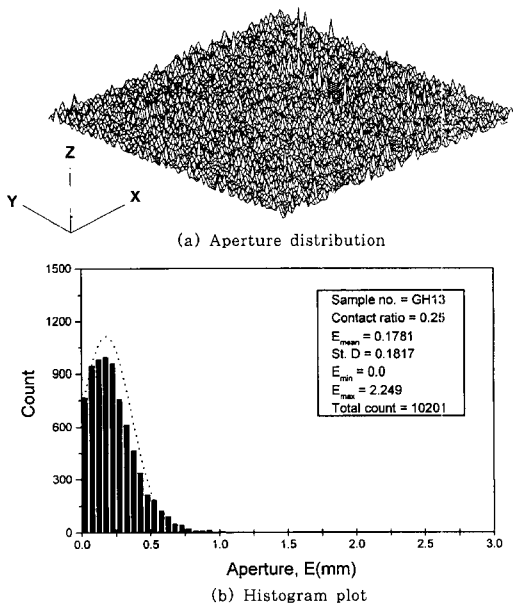


Fig. 10. A typical aperture distribution and histogram plot for artificial tensile joint surfaces of granite under high normal stress.

타내었다. 평균 간극 값은 초기 간극 값에 비해 3배 가량 줄어든 반면 표준 편차는 약간 감소하는 경향을 보였다. 최대 간극 크기 역시 선형적으로 감소하였다.

Fig. 10은 대표적인 화강암 인공 절리 시료에 대하여 높은 수직 응력하의 간극 분포에 대한 3차원 형상과 히스토그램을 보여준다. 3차원 형상에서 볼 수 있듯이 전체적으로 초기 간극 분포에 대해서 간극들의 크기가 작아졌으며 접촉 영역이 비교적 고르게 분포하는 것을 볼 수 있다. 히스토그램은 초기 간극 분포에 비해 좌측으로 편향되게 나타났다.

초기 간극분포와 접촉 면적 25%시의 간극 분포의

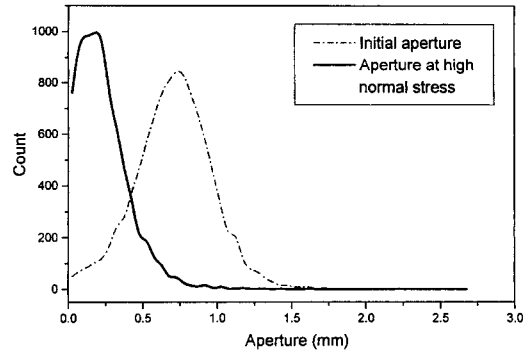


Fig. 11. Comparison of aperture distribution in high normal stress with initial aperture distribution.

히스토그램을 비교하기 위해 Fig. 11에 두 히스토그램을 함께 도시하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 수직응력이 증가함에 따라 간극 분포의 히스토그램은 왼쪽으로 편향되며 그 빈도 수도 중앙값 부근이 더욱 커졌다. 결과적으로 정규분포의 대칭 경향이 크게 깨지게 되며 간극 정규 분포가 왼쪽으로 평행 이동하는 형태를 띤다. 이러한 간극 분포 변화는 수직응력 증가에 따라 큰 간극들이 모두 닫히고 상당히 작은 크기의 간극들이 밀집되는 특성들을 잘 보여주고 있다.

절리 간극의 공간상관성

본 연구에서는 간극 분포의 형상과 공간 상관을 조사하기 위해 구해진 모든 초기 간극 분포에 대해 베리오그램을 이용한 지구통계 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 Variowin (Pannatier, 1996)이다. Variowin 프로그램의 해석 용량의 한계로 인해 개별 시료 100×100 mm 범위의 간극 측정 결과를 50 × 50 mm의 4개 부분으로 나누어서 총 단면의 간극 분포를 해석하였다.

각 단면들의 간극 분포에 대해 분리거리 증분 h를 최소 1 mm부터 1 mm 간격으로 30 mm까지 두 공간 쌍의 전방향 (omni-directional) 실험 베리오그램을 작성하였다. 영향 범위 (range)와 평탄값 (sill)을 구하기 위해 몇 가지 모델로 실험 베리오그램을 근사시켰다. 여러 가지 모델 중 지수 함수 모델이 가장 간극 분포를 잘 근사하였는데, 이는 Hakami and Larsson (1996)의 결과와 일치한다.

Table 3에 대표적인 7개 시료에 대해서 모델 베리오그램 변수들을 나타내었다. Table 3에서 시료명 뒤에 1, 2, 3, 4의 숫자는 각각 한 시료 내의 분할 범위를

Table 3. Representative variogram parameters for several initial aperture distributions.

Sample no.	Covariance	Nugget (mm ²)	Range (rm)	Sill (mm ²)	I.G.F.*
GH13-1	5.1131E-2	0.012	2.17	0.0378	1.217E-3
GH13-2	5.4578E-2	0.012	2.25	0.0432	3.311E-4
GH13-3	6.6751E-2	0.0	2.17	0.0658	2.8599E-3
GH13-4	7.3427E-2	0.0	2.17	0.0728	1.0953E-3
GH22-1	8.9574E-2	0.0297	8.37	0.0558	3.6119E-3
GH22-2	9.5185E-2	0.0199	2.79	0.0689	1.5238E-3
GH22-3	9.3515E-2	0.02	4.72	0.07	1.6330E-3
GH22-4	8.5184E-2	0.0	5.77	0.0792	8.1186E-3
GH38-1	1.0555E-1	0.02	4.65	0.0879	2.1902E-3
GH38-2	1.3485E-1	0.02	4.03	0.1149	2.0214E-3
GH38-3	7.8475E-2	0.0248	3.41	0.0536	7.4523E-3
GH38-4	1.3098E-1	0.028	5.27	0.108	2.2452E-3
GH4-1	9.7361E-2	0.03	9.61	0.06346	4.3556E-3
GH4-2	8.7657E-2	0.036	6.82	0.054	3.9351E-3
GH4-3	8.359E-2	0.027	9.92	0.0531	4.4918E-3
GH4-4	7.3354E-2	0.0288	6.51	0.0338	7.7263E-3
MH23-1	1.0077E-1	0.038	21.08	0.072	5.9027E-3
MH23-2	5.3940E-2	0.0204	3.1	0.0306	3.2029E-3
MH23-3	8.6762E-2	0.018	8.37	0.06659	2.9E-3
MH23-4	5.8211E-2	0.0204	2.79	0.0384	4.4805E-3
MH32-1	6.6462E-2	0.021	7.44	0.0469	1.1851E-3
MH32-2	5.9828E-2	0.0228	9.61	0.0336	3.4383E-3
MH32-3	9.2967E-2	0.012	7.75	0.076	1.3429E-3
MH32-4	8.1547E-2	0.018	6.51	0.0504	6.6928E-4
MS1-1**	2.1147E-3	0.0	1.24	0.0021	2.7145E-3
MS1-2	2.2505E-3	0.0	1.55	0.00228	1.2855E-3
MS1-3	2.5152E-3	0.0	1.55	0.00252	7.8088E-4
MS1-4	2.0236E-3	0.0	1.55	0.00204	3.4612E-3

*I.G.F. : Indicative of Goodness of Fit **MS : Saw-cut marble joint

나타낸다. 이 범위 중 실제 해석이 된 범위는 35 mm × 35 mm 범위였다. I.G.F.는 지수 모델로 근사시켰을 때 근사의 적합성 정도를 나타내는 척도로서 0에 가까울수록 근사가 더 정확함을 의미한다. 전 시료에 걸쳐 영향 범위는 1.55 mm~21 mm 정도로 가변성을 보였지만 해석 결과 대부분의 시료는 4~6 mm 크기의 영향 범위를 보였다. Iwano와 Einstein (1985)의 역시 인공 절리에 대한 영향 범위 측정 결과를 보고하였는데, 본 측정 결과와 비슷한 범위를 보였으며, 또한 대부분 지수 모델로 잘 근사되었다. 원점 부근에서의 공간 상관성은 측정 간격이 무한대로 작아질 수 없으므로 여러 가지 크기의 너겟 값으로 근사될 수 있는데 분석 결과들은 Table 3에서 보는 바와 같이 일정 크기의 너겟 값을 포함한 불연속 지수모델이 원점을 통과하는 지수 모델보다 더 실험 베리오그램을 잘 근사하였다. 한 시료 내의 4개 측정 값이 서로 균질하게 나

타나는 경우 (GH13, MS)도 있었지만, 대부분 시료는 같은 단면에서라도 측정 위치에 따라서 간극 분포의 상관성이 매우 다르게 나타났다. 가장 극단적인 경우가 MH23 시료의 경우이며 영향 범위의 폭의 차이가 위치에 따라 거의 20 mm 가량 나왔다. 공분산 값 역시 단면에 따라 상당한 크기 차이를 보였다. 따라서 간극 분포를 추정하는 경우 한 단면에서의 값을 전체 지역의 간극 분포로 일반화하는 것은 문제가 있다고 생각된다. 일반적으로 공분산이 큰 단면일수록 영향 범위의 크기도 크게 나타났으며 평탄값 (너겟 효과가 있는 경우에는 평탄값에 너겟 값을 더해 주어야 함)은 전체적으로 공분산 값에 수렴하는 경향을 보였다.

평면 절리의 경우 모든 시료에서 비슷한 경향이 나타났으며 상관 영향 범위는 2 mm 미만으로서 매우 짧게 나타났다. 이는 평면 절리의 경우 간극 분포 값이 다른 절리들에 비해 균등하고 독립적으로 분포함을

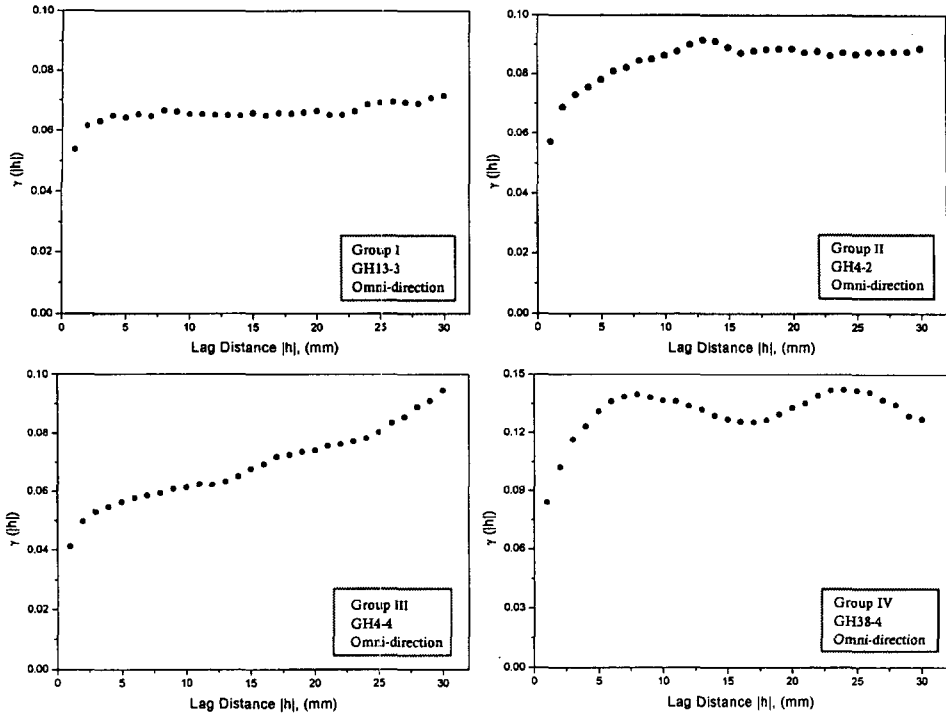


Fig. 12. Representative experimental variogram trends of 4 groups for rock joint surfaces.

의미한다.

대부분의 거친 절리 간극의 경우 실험 베리오그램이 지수모델로 잘 근사되었지만 몇 가지 다른 형태의 베리오그램을 보이는 경향도 뚜렷이 나타났다. 따라서 도시된 실험 베리오그램을 해석하여 크게 4가지 형태의 군으로 나누어서 이들 4가지 형태에 대한 간극 분포와 공간 상관 사이의 관계를 조사하였다. 4가지 군은 다음과 같으며, Fig. 12는 각 군의 대표적인 실험 베리오그램들을 나타내고 있다.

I군 : 공간 상관성이 독립적이고 영향 범위가 매우 작은 지수모델 (exponential model) 그룹

II군 : 공간 상관성이 꽤 크고 영향 범위가 비교적 큰 지수 모델 그룹

III군 : 공간 상관성이 분리거리에 따라 계속 증가하고 영향 범위를 정하기 어려운 Gaussian 모델에 가까운 그룹

IV군 : 공간 상관성이 증가했다가 감소하는 등의 구멍 효과 모델 (hole effect model) 그룹

I그룹은 거의 영향 범위가 2~4 mm 정도로 짧고 이내 공분산 값과 일치하여 평탄값에 도달하는 경향을

보였으며 대부분의 측정된 단면들이 이러한 I 그룹의 특징을 보였다. II 그룹은 영향 범위가 8~15 mm 정도로 길고 공간 상에서 그 의존성이 꽤 넓은 범위에서 나타난다. 하지만 영향 범위를 벗어나면서부터 공분산 값에 접근하여 수렴하게 된다. I 그룹과 같이 영향범위가 짧을수록 거친면의 무작위성은 더욱 증가하며, II 그룹과 같이 영향 범위가 길어질수록 비슷한 크기의 간극 분포가 서로 한 쪽 부분에 몰려 있음을 의미한다.

III 그룹의 경우에는 분리 거리가 증가함에 따라 실험 베리오그램 값 역시 증가하여 현 측정 범위로서는 영향 범위와 평탄값으로서 정의하기 힘든 양상이다. 좀더 측정 간격을 넓힘에 따라 이 그룹이 일정한 평탄값으로 안정화 될 것인지 계속해서 증가할 지 여부를 확정할 수 없다. IV 그룹은 구멍효과 모델과 비슷하며, 일정한 진폭으로 평탄값이 변하는 경향을 보였다. 이 경향은 주로 전 방향보다는 특정 방향에서 비슷한 형태가 많이 발생하였으며 따라서 간극 분포의 이방성을 기술할 수 있는 중요한 형태이다. 전 측정 시료에 대해서 대부분의 거동은 I, II 그룹의 형태를 보였으며 특히 이 연구에 사용된 시료가 인공 절리이므로 간극 분포가 전 단면에 걸쳐 무작위적으로 골고루 분포하여비교적 자연 절리에 비해 공간 상관성이 작고 독립적임을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 매우 정밀한 비접촉식 3차원 레이저 측정기를 이용하여 암석 절리 단면의 표고를 측정하였으며, 이 자료를 수치적으로 중첩시켜서 초기 간극과 25% 접촉면적에 대한 간극 분포를 해석하였다. 화강암 인공 절리 전체 시료의 초기 간극 평균과 표준편차는 각각 0.78 mm, 0.34 mm였으며 대리석 인공 절리 전체 시료의 경우 각각 0.57 mm, 0.26 mm로서 기존에 보고된 거친 절리에 대한 간극 분포의 범위 내에 있었다. 기존 측정 결과와의 비교를 통해 본 방법을 통한 간극 측정의 타당성을 검증하였다.

다양한 크기의 간극 분포는 대부분 정규분포로 잘 근사되었으며, 여러 구간에 무작위적으로 분포하는 전형적인 거친 절리의 간극분포를 보였다. 25% 접촉면적시의 간극 분포 해석을 통해 접촉면적이 증가할수록 평균 간극은 작아지고 표준편차는 커지며 초기 정규분포를 띤 간극분포는 점점 왼쪽으로 편향 이동하였다. 베리오그램을 이용하여 해석된 절리 간극분포는 총 4가지 유형의 공간 상관 특성을 보였지만 측정결과와의 대부분은 영향 범위가 매우 짧은 지수모델로 잘 근사되었다. 이는 거친 절리의 무작위적 간극 분포 특성을 잘 반영함을 의미한다. 이러한 간극분포를 가진 거친 절리는 간극 분포의 가변성으로 인해 실제 지하수 유동시에 이론적인 삼승법칙과 상당히 차이를 보일 것으로 예상된다.

베리오그램 해석으로 구한 모델 변수들은 실제 절리 네트워크를 통계적으로 재현할 수 있는 중요한 자료로서, 절리내 유체 유동 및 오염물 이동 분석을 위한 체계적 (stochastic) 해석에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 배기운 (1999) 레이저 변위계를 이용한 암석절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 99p.
- 이희석, 박연준, 유광호, 이희근 (1999) 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 거동에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지) v. 9, p. 350-363.
- Abelin, H., Birgersson, L., Moreno, L., Widén, H., Ågren, T. & Neretnieks, I. (1991) A large scale flow and tracer experiment in granite 2. Results and interpretation, *Water Resour. Res.*, v. 27, p. 3119-3135.
- Archambault, G., Gentier, S., Riss, J. and Flamand, R. (1997) The evolution of void spaces (permeability) in relation with rock joint shear behavior, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, v. 34, p. 525.
- Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.R. (1983) Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, v. 20, p. 249-268.
- Barton, N. and Choubey, V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.* v. 10, p. 1-54.
- Brown, S.R. (1987) Fluid flow through rock joints : The effect of surface roughness, *J. Geophys. Res.*, v. 92, (B2), p. 1337-1347.
- Brown, S.R. and Scholz, C.H. (1985) Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, *J. Geophys. Res.*, v. 90 (B14), p. 12575-12582.
- Davis, J.C. (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 645p.
- Duncan, N. and Hancock, K.E. (1966) The concept of contact stress in the assessment of the behavior of rock masses as structural foundations, *Proc. 1st Cong. ISRM, Lisbon*, v. 2, p. 487-492.
- Esaki, T., Du, S., Jiang, Y., Wada, Y. and Mitani, Y. (1998) Relation between mechanical and hydraulic apertures during shear-flow coupling test, *Proc. of 10th Japan Symp. on Rock Mech.*, p. 91-96.
- 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. Symp. Rock Mech. Tucson, Ariz.* p. 1213-1222.
- Gentier, S. (1986) *Morphologie et comportement hydro-mechanique d'une fracture naturelle dans une granite sous contrainte normale*, Ph. D. thesis, l'universite d'Oreleans.
- Gentier, S., Billaux, D. and van Vliet, L. (1989) Laboratory testing of the voids of a fracture, *Rock Mech. Rock Eng.*, v. 22, p. 149-157.
- Hakami, E. (1995) Aperture distribution of rock fractures, Doctorial thesis, Division of Eng. Geol., Royal Inst. of Technology, Stockholm.
- Hakami, E. (1995) Joint aperture measurements-an experimental technique, *Proc. of ISRM Int. Symp. on Fractured and Jointed Rock Masses*, p. 453-456.
- Hakami, E. and Stephansson, O. (1993) Experimental technique for aperture studies of intersecting joints, *Eurock '93, Proc. ISRM Int. Symp. on Safety and Environmental Issues in Rock Eng.*, Lisbon, p. 301-308.
- Hakami, E., Einstein, H.H., Iwano, M. and Gentier, S. (1995) Characterisation of fracture apertures-Methods and parameters, *Proc. 8th ISRM Congr., Tokyo*, p. 751-754.
- Hakami, E. and Larsson, E. (1996) Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, v. 33, p. 395-404.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M. (1989) *Applied Geostatistics*, Oxford Univ. Press, 561p.
- Iwai, K., (1976) Fundamental studies of fluid flow through a single fracture, Doctorial thesis, Univ. Calif. Berkeley, 208p.
- Iwano, M. and Einstein, H.H. (1993) Stochastic analysis of surface roughness, aperture and flow in a single fracture, *Eurock '93, Proc. ISRM Int. Symp. on Safety and Environmental Issues in Rock Eng.*, Lisbon, p. 135-141.

- Iwano, M. and Einstein, H.H. (1995) Laboratory experiments on geometric and hydromechanical characteristics of three different fractures in granodiorite, Proc. Congr. 8th ISRM, Tokyo, p. 743-750.
- Keller, A. (1998) High resolution, non-destructive measurement and characterization of fracture apertures, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 35, p. 1037-1050.
- Pannatier, Y. (1996) Variowin-Software for Spatial Data Analysis in 2D, Springer, 121p.
- Pyrak-Nolte, L.J. (1995) Interrelationship between the hydraulic and seismic properties of fractures, Fractured and Jointed Rock Masses, A. A. Balkema, p. 111-117.
- Pyrak-Nolte, L.J. (1997) The seismic response of fractures and the interrelations among fracture properties, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 34, p. 787-802.
- Pyrak-Nolte, L.J. (1998) Fractures : Flow and geometry, Mech. Jointed and Faulted Rock II, Rossmannith (ed.), A.A. Balkema, p. 11-19.
- Pyrak-Nolte, L.T., Myer, L., Cook, N.G.W. and Witherspoon, P.A. (1987) Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, Proc. 6th ISRM Congress, Montreal, v. 1, p. 225-231.
- Snow, D.T. (1965) A parallel plate model of fractured permeable media, Ph. D. thesis, Univ. of Calif., Berkeley, 331p.
- Yeo, I.W., Freitas, M.H. and Zimmerman, R.W. (1998) Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. v. 35, p. 1051-1070.

2000년 5월 29일 원고접수, 2000년 8월 3일 게재승인.