

## 암석절리와 균열망내에서의 채널흐름에 관한 이론적 수치해석적 연구\*

송명규<sup>1)</sup> · 주광수<sup>1)</sup> · 문현구<sup>2)</sup>

### A Theoretical and Numerical Study on Channel Flow in Rock Joints and Fracture Networks

Myung Kyu Song, Kwang Sue Jue and Hyun Koo Moon

#### ABSTRACT

The study on the flow characteristics and analysis of groundwater in discontinuous rock mass is very important, since the water inflow into the underground opening during excavation induces serious stability and environmental problems. To investigate the flow through single rock joint, the effect of various aperture distribution on the groundwater flow has been analyzed. Observed through the analysis is the "channel flow", the phenomenon that the flow is dominant along the path of large aperture for given joint. The equivalent hydraulic conductivity is estimated and verified through the application of the joint network analysis for 100 joint maps generated statistically. Both the analytic approach based on isotropic continuum premise and the joint network analysis are tested and compared analyzing the groundwater inflow for underground openings of different sizes and varying joint density. The joint network analysis is considered better to reflect the geometric properties of joint distribution in analyzing the groundwater flow.

#### 1. 서 론

암반내 지하수의 흐름은 공학적인 측면에서 중요한 역할을 한다. 지하공간 개발 및 터널건설에 있어서 지하수의 유출은 굴착과 보강공사의 진행을 대단히 어렵게 할 뿐만 아니라 구조물의 안정성에 심각한 문제를 야기시키기도 한다. 이는 다양한 원인에 의해서 생성된 암반내 불연속면의 존재에 기인한다. 즉, 암반내 유체의 이동은 암석의 종류에 따라 약간의 차이는 있으나 신선암의 낮은 수리전도성 때문에 주로 상호 연결성을 가진 불연속면을 통하여 이루어지기

때문이다. 이러한 암반내 지하수 유동문제에 관한 연구는 최근까지 활발히 진행되어 왔으나 절리의 기하학적 성질과 개개 절리의 거칠기, 간극, 충전물이 지하수의 흐름에 미치는 영향을 규명한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

불연속 암반의 지하수 유동해석에는 크게 두가지 접근방식이 사용되어 왔다. 하나는 암반을 등가의 다공질 매체로 간주하여 분석하는 방법이고, 다른 하나는 절리를 개별적으로 분석하는 개별 절리망 해석(discrete joint network analysis)이다. 전자는 해석 영역이 매우 넓고 지하수를 함유한 무수히 많은 불

\* 1994년 4월 20일 접수

\* 이 연구는 1994년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임.

과제번호 : 941-1300-005-2

1) 학생회원, 한양대학교 공과대학 자원공학과 박사과정.

2) 정회원, 한양대학교 공과대학 자원공학과 부교수.

연속면이 상호 연결된 상태로 분포하는 경우에 적절하고 암반은 등가 수리전도계수(equivalent hydraulic conductivity)로 대표되는 하나의 연속매체로 간주된다.<sup>1,2)</sup> 반면, 후자의 방법은 해석영역이 크지 않고 절리간의 연결성이 낮으며 절리의 밀착도가 높은 경우 개개의 절리를 독립적으로 취급하는 방식이다.<sup>3,5)</sup> 이 경우 절리는 일정한 간극을 가진 평행한 평판으로 가정하였으며 절리의 길이와 간극, 절리간의 거리, 절리의 방향 등을 통계적 방법으로 처리하여 지하수의 흐름을 분석한다.

이상의 접근방법은 불연속 암반에서의 유체유동을 정확히 해석하기에는 모두 한계가 있다. 연속체 모델의 경우 지하수의 흐름은 주로 절리, 단층, 층리와 같은 공학적 스케일의 불연속면에서 이루어지며, 이때 절리들의 연결성이 낮을 경우에는 타당성을 잃는다고 볼 수 있다. 개별절리 모델의 경우, 실제 암반에서 관찰되는 절리는 절리면의 거칠기와 충전상태가 다양할 뿐만 아니라 수직 및 전단응력에 의해 벽면의 접촉상태가 변화하기 때문에 모델의 신빙성에 문제점이 제기되고 있다.<sup>6,8)</sup> 이론적으로 절리 벽면에 작용하는 수직응력과 절리의 거칠기가 유량에 미치는 영향을 분석한 결과, 평판모델은 낮은 응력상태에서 열린 절리에 적절한 것으로 나타났으며, 수직응력이 증가하고 접촉면이 증가할 경우에는 해석의 한계성이 있는 것으로 밝혀졌다.<sup>9)</sup>

본 연구는 공학적 스케일의 절리면에 대해 자연적인 불규칙성을 반영하면서 절리내의 유동현상을 규명하고, 2차원 절리망에서의 지하수 유동현상을 규명하기 위해 시도되었다. 개별절리에서의 유동을 분석하기 위해 절리의 간극을 통계적으로 발생시키고, 발생된

간극분포로부터 지하수의 유동을 해석할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램을 사용하여 절리의 간극분포에 따른 유동해석을 이론해와 유한차분법을 사용하여 분석하였다. 또한 2차원 절리망에서 유체의 유동을 분석하고 이로부터 등가 수리전도계수를 계산하는 전산 프로그램을 개발하였다. 절리도의 발생은 절리의 기하학적 변수에 따라 통계적으로 발생시켰다. 발생된 절리도를 대상으로 등가 수리전도계수 행렬을 구하고 이들의 분포양상을 연구하였다. 마지막으로, 원형공동의 굴착 후 절리의 수와 공동의 직경에 따른 지하수의 유입량을 예측하고 이를 이론해와 비교하는 모델실험을 수행하였다.

## 2. 단일절리에서의 유동

### 2.1 절리간극의 발생

절리암반내 유동해석의 관점에서 절리는 절리면 사이의 간극에 의해서 표현할 수 있다. 절리면의 형상은 암석의 생성원인, 풍화, 변성작용, 암종 등에 의해 영향을 받으며 이에 따른 절리간극의 분포양상은 상이하게 나타난다. 또한 절리면의 간극은 위치에 따라 상관관계를 가지고 있다고 볼 수 있다. 즉, 단일절리내 임의의 지점에서 간극이 크면 그 지점 주위에서의 간극 역시 클 가능성이 있으며, 반대로 접촉되어 있다면 그 주위 역시 접촉되어 있을 가능성이 높다고 볼 수 있다. 여러 가지 암종에 대한 실험 결과에 따르면 단일절리의 간극분포는 암석의 입자크기에 큰 영향을 받으며, 일반적으로 로그정상분포에 근사한 것으로 나타났으며, 간극간의 상관성은 거의 없는 것(절리길이의 0.2배 이하)으로 나타났다.<sup>7,10,11)</sup> 그러나

Table 1. The properties of joint aperture in rock joint samples<sup>7, 11)</sup>.

Rock type	Size(mm×mm) (diameter×length)	Aperture		Distribution function
		Mean(μm)	Standard deviation(μm)	
Granodiorite (natural joint)	50×50	64.0	10.53	normal or lognormal
Granodiorite	50×50	145.1	37.75	normal or lognormal
Granite	50×50	120.0	24.51	normal or lognormal
Granite	120(diameter)	120.0	—	gamma
Andesite	50×50	76.3	14.07	normal or lognormal
Sandstone	50×50	83.6	14.48	normal or lognormal
Schist	50×50	43.1	11.89	normal or lognormal

실험결과는 모든 절리에 다 통용되는 것은 아니며, 특히 현장실험에 의해 관찰되는 절리면의 간극분포와 간극간의 상관성은 아직 분명하지 않은 것으로 알려져 있다. 절리의 간극분포에 관한 실험적 결과는 Table 1과 같다.

절리면의 형상에 따른 간극분포와 상관관계를 고려하기 위하여 통계적 방법을 사용하였다. 간극의 분포는 여러 연구자들에 의해 제안된 로그정상분포를 가정하였다.<sup>7,10-13)</sup> 또한, 절리내 각 지점에서 간극간의 상관성을 고려하기 위해 지구통계학에서 도입된 상관길이(correlation length)라는 개념을 도입하였다. 여기서, 상관길이는 절리내 간극이 유사한 공간상의 범위를 뜻한다. 지구통계학에서 사용된 상관관계는 인접한 표본들의 성질이 공간적으로 서로 종속되어 있다는 가정에 의한 것으로 암석역학 분야에서 절리의 기하학적 자료의 상관성을 결정하는데 이용되고 있다.<sup>14)</sup>

단일절리내 간극분포의 상관관계의 특성과 범위를 결정하기 위해 변이함수(variogram function)를 사용하였다. 일반적으로 지수상관함수(exponential correlation function)  $A(r)$ 과 구형상관함수(spherical correlation function)  $C(r)$ 이 사용되며, 식 (1), (2)와 같이 표현된다.<sup>13,15)</sup>

$$A(r) = \sigma^2 \exp\left(\frac{-2r}{\lambda} |r|\right), \quad r < \lambda \quad (1)$$

$$C(r) = \sigma^2 \left(1 - \frac{3r}{2\lambda} + \frac{r^3}{2\lambda^3}\right), \quad r < \lambda \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 상관길이,  $r$ 은 계산영역 내에서의 거리를 나타내며,  $\sigma^2$ 은 간극분포의 분산(variance)을 나타낸다. 식 (1)과 (2)는 일정한 상관길이 내의 간극분포를 상호 관련시키는 역할을 한다. 이 이론적 방법을 사용하여 로그정상분포에 따라 간극을 발생시키는 프로그램을 작성하였고 그 계산과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(a) 절리면을 격자로 분할한다.

(b)  $-0.5 \sim 0.5$  사이의 균등분포를 지닌 난수를 발생시켜서, 격자로 나누어진 정방형의 영역에 할당한다.

(c) 이 난수를 평균 0, 표준편차 1의 정규분포를 갖는 값으로 전환한다.

(d) 발생된 개개의 간극값을 지수상관함수 또는 구형상관함수에 의해 상호 관련시킨다. 이 과정은 정방형의 영역에 할당된 간극값을 주어진 상관길이 내에 있는 간극들의 값으로 치환하는 것이다. 즉, 상관길이 내에 있는 정방영역의 수를 결정하고 그 영역 내에 있는 간극들의 값을 가중평균하여 주어진 정방영역의 간극으로 지정한다. 각 정방영역간의 거리는 정방영역의 중점간의 거리로 정하고 가중함수는 지수상관함수 또는 구형상관함수를 사용한다. 이상의 과정을 정방영역 전체에 반복 수행한다.

(e) 상용로그 스케일 상에서 계산된 간극값을 로그정상분포를 갖도록 치환하여 개개 정방영역의 간극값을 계산한다.

이상의 과정으로부터 단일절리내의 간극분포를 통계적 방법을 사용하여 발생시켰다. 단일절리면의 크기 ( $L \times L$ )는  $10 \times 10$  cm이며, 이 단일절리면의 영역을  $20 \times 20$ 의 일정한 격자로 분할하였다. 간극의 분포형태는 로그정상분포를 가정하였으며, 평균간극과 표준편차는 Table 1의 자료를 참고로 각각  $88 \mu\text{m}$ 와  $21.16 \mu\text{m}$ 를 사용하였다. 변이함수는 지수상관함수 및 구형상관함수를 사용하였으며, 상관길이는 1 cm 간격으로 단일절리 크기의 0.1~0.6배로 하였다.

지수상관함수를 사용한 경우 절리면의 간극분포는 Fig. 1과 같이 상관길이가 증가함에 따라 주위 간극간의 상관성의 증가로 인해 유사한 간극값을 갖는 경향을 볼 수 있다. 구형상관함수를 사용한 경우(Fig. 2), 지수상관함수를 사용한 경우와 마찬가지로 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나, 전체적인 간극분포는 상관길이가 증가함에 따라 다른 양상을 나타내고 있는데, 이는 간극간의 상관성을 결정해주는 변이함수의 차이 때문이다. 즉, 상관길이가 작은 경우, 같은 정규분포에 의해 발생된 간극분포의 상관성이 적으므로 사용된 두개의 변이함수가 미치는 차이는 상대적으로 작게 나타나지만, 상관길이가 증가함에 따라 변이함수가 간극분포에 미치는 영향은 크게 나타난다. 그러나, 변이함수에 따른 간극의 분포빈도수는 상관길이에 따라 전체적으로 거의 동일한 양상이 나타났으며, 두가지 모두 로그정상분포에 근사한 형상을 이루고 있음을 알 수 있다(Fig. 3, Fig. 4).

## 2.2 유동해석

임의의 간극분포를 갖는 단일절리내에서의 유동을

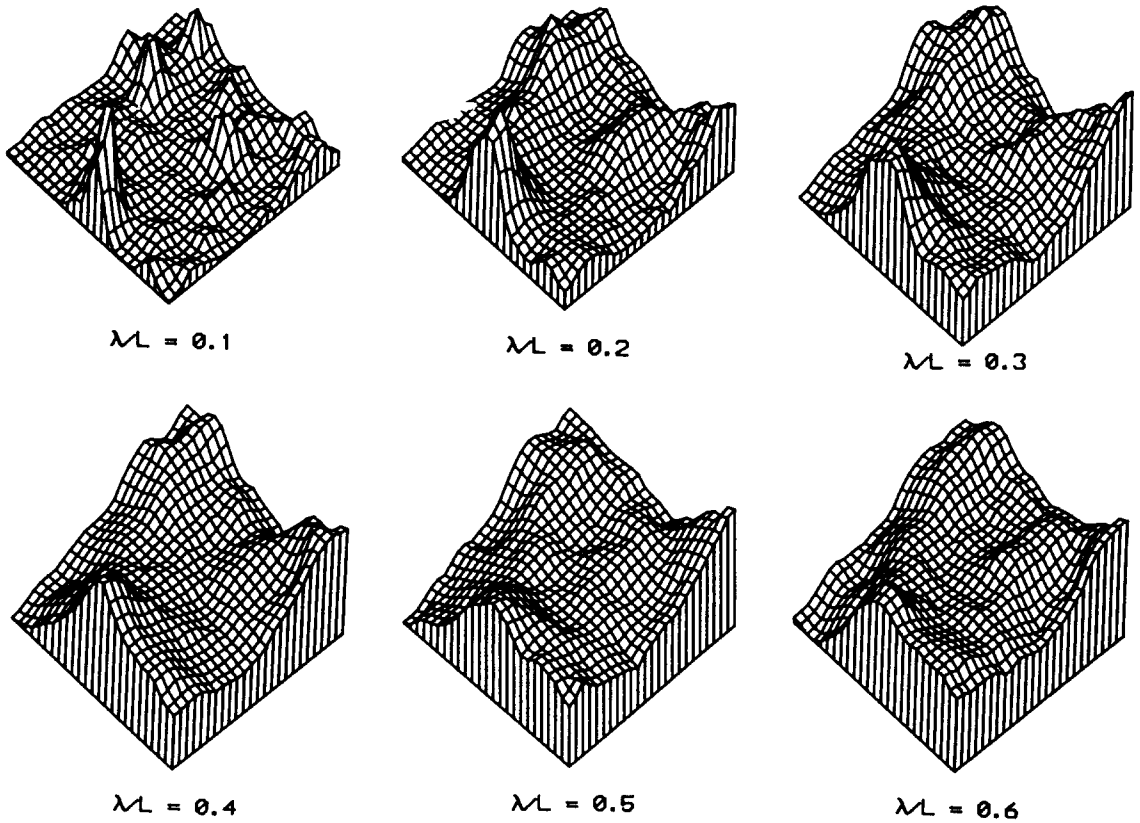


Fig. 1. Aperture profile from exponential correlation function with  $\lambda/L$ .

분석하기 위해서 단일절리내 각 지점에서의 수두분포와 속도분포를 이론해 및 유한차분법에 의해 계산하였다. 이론해의 경우 단일절리내에서의 유체유동 방정식의 해를 구하기 위해 Fourier 변환을 이용하여 해를 유도하였다. 유한차분법의 경우, 간극분포에 따라 Darcy 법칙을 적용하고 평형방정식으로부터 Gauss-Seidel 반복법을 사용하여 절리면에서의 수두분포와 속도분포를 계산하였다.

### 2.2.1 이론해(analytic solution)

단일절리내에서의 간극분포에 따른 유동해석을 수행하기 위하여 사용된 이론해는 비균질, 이방성 수리특성을 가진 절리내에서의 수두분포에 관하여 연속, 미분 가능한 해로 제시된 것이다. 즉, 주어진 경계조건과 식 (3)과 같은 유체유동에 관한 선형 미분방정식으로부터 적분변환법에 의하여 임의의 간극분포와 성질을 가진 절리에서의 수두분포 및 속도분포를 예측하는 것이다. 경계조건으로 수두경계조건과 유체의 흐름을 차단(no-flow)하는 경계조건을 사용하였으며,

절리내에서의 유동은 층류, 정상유동을 적용하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ & = \sum_{i=1}^{n_i} Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $T_x$ 와  $T_y$ 는 각각  $x$ 와  $y$  방향의 투과도(transmissivity),  $h$ 는 수두,  $Q$ 는 source 또는 sink에 의한 유량이다.

식 (3)에서 절리면의 거칠기에 따른 유동의 영향을 고려하기 위해 수리전도도와 절리내 간극의 크기의 곱으로 표현되는 투과도 성분에 Louis에 의해 제안된 상대거칠기라는 개념을 도입하였다.<sup>16)</sup> 상대거칠기는 절대거칠기( $n$ )와 각 지점에서의 평균간극( $b$ )의 비( $n/2b$ )로 표현되며, 절리간극의 급격한 변화에 의해 나타날 수 있는 수두손실의 영향을 배제하기 위해 절리면에 대하여 완만하게 변하는 값을 가정하였다. 이

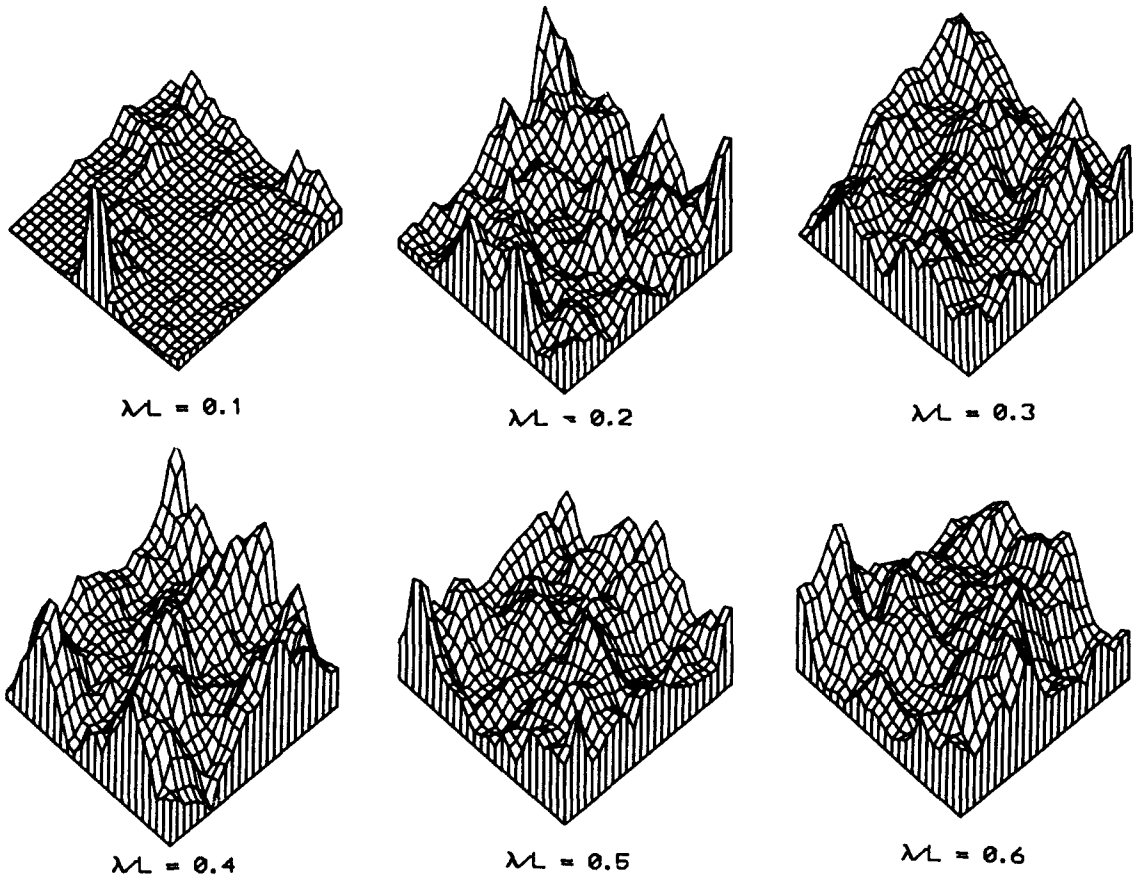


Fig. 2. Aperture profile from spherical correlation function with  $\lambda/L$ .

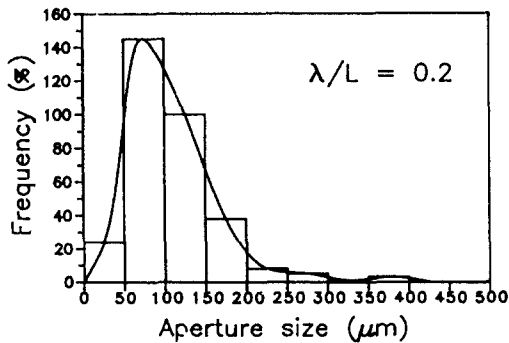


Fig. 3. Distribution of aperture size from exponential correlation function with  $\lambda/L=0.2$ .

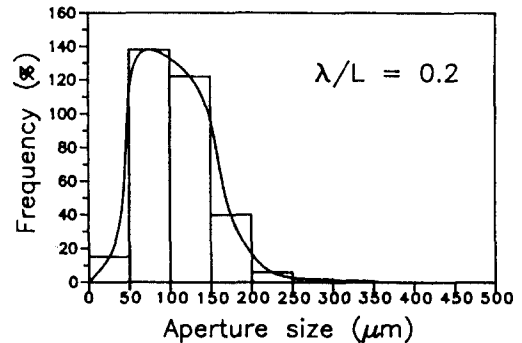


Fig. 4. Distribution of aperture size from spherical correlation function with  $\lambda/L=0.2$ .

러한 이론적 방법은 원래 비균질, 등방성 대수층에서의 지하수 유동을 해석하기 위한 것으로 Daly와 Morel-Seytoux<sup>17)</sup>에 의하여 연구된 것이며, Amadei<sup>16)</sup>

에 의해 절리내에서의 유동모델에 적용된 바 있다.

### 2.2.2 유한차분법(FDM)

유한차분법에 의해 임의의 간극분포를 갖는 단일

절리면을 통한 유체의 흐름은 절리면의 경계에 수압 경계조건과 유체의 흐름을 차단하는 경계조건을 할당하여 계산한다. 간극  $b$ 를 갖는 평행평판은 식 (4)의 Darcy 식을 만족하며 유량( $Q$ )은 식 (5)와 같다.

$$v = -\frac{1}{12\mu} b^2 \Delta P \quad (4)$$

$$Q = -\frac{1}{12\mu} b^3 W \Delta P / L \quad (5)$$

여기서  $v$ 는 Darcy 속도,  $\mu$ 는 점성계수,  $\Delta P$ 는 평판 길이( $L$ )의 수압차,  $W$ 는 평판의 폭을 나타낸다. 평행평판에 적용되는 식 (5)로부터 각 격자에 할당된 임의의 간극분포를 갖는 절리내에서의 유량에 관한 식으로 수정하면 식 (6)과 같이 된다.

$$Q_{ij} = \frac{P_i - P_j}{R_{ij}} \quad (6)$$

여기서  $P$ 는 각 격자내 영역에서의 수압,  $R_{ij}$ 는 격자 사이의 저항,  $Q_{ij}$ 는 격자간의 유량이다.  $R_{ij}$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$R_{ij} = 6\mu \frac{\Delta x}{\Delta y} \left[ \frac{1}{b_i^3} + \frac{1}{b_j^3} \right] \quad (7)$$

식 (7)과 주어진 경계조건을 사용하고, 식 (8)과 같이 각 격자에서의 평형방정식에 Gauss-Seidel 반복법을 적용하여 수압분포 및 속도분포를 계산하였다. Fig. 5는 유한차분법에 의한 해석방법을 개념적으로 나타낸 것이다.

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j \frac{P_i - P_j}{R_{ij}} = 0 \quad (8)$$

### 2.2.3 전산 모델실험

이론해 및 유한차분법에 의해 단일절리에서의 속도분포를 분석하였다. 사용한 모델은 Fig. 1, Fig. 2와 같이 지수상관함수  $A(r)$ 과 구형상관함수  $C(r)$ 을 사용한 경우의 단일절리 모델이다. 경계조건은 모델의 좌우측 경계의 수두차이를  $10 \text{ cm}$ (수압차이 =  $103 \text{ N/m}^2$ )로 하고 상하부 경계를 차단하는 조건으로 하였다. 이론해와 유한차분법에 의한 속도분포는 Fig. 6~Fig. 9와 같다.

지수상관함수를 사용한 경우, 상관길이가 절리크기

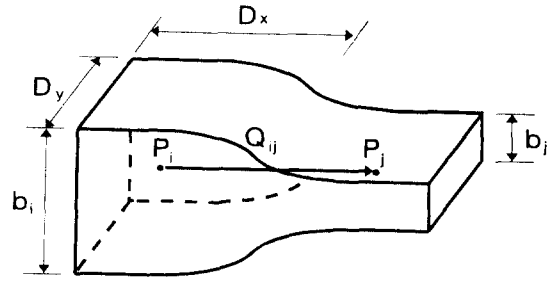


Fig. 5. Schematic representation of flow through different apertures.

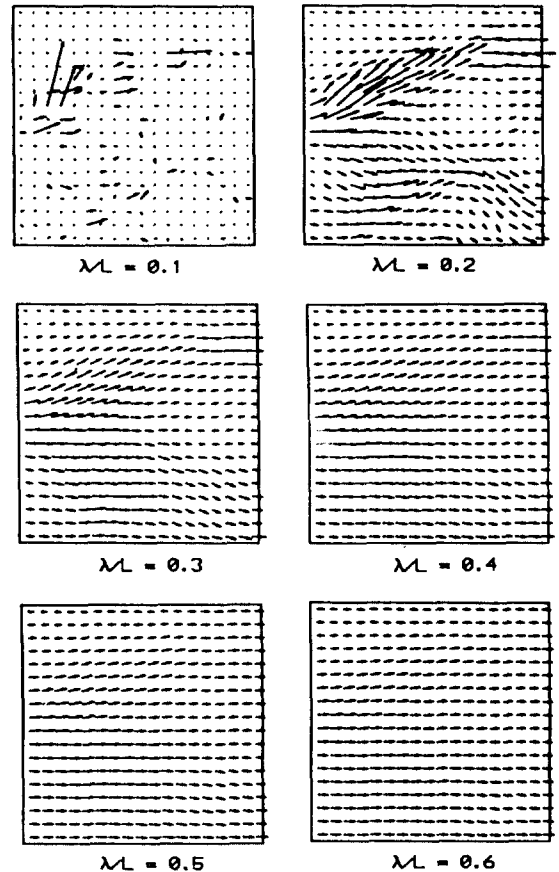


Fig. 6. Flow velocity plots for various  $\lambda/L$  values. (Analytic method: Exponential correlation function: Scale: 1 cm plot =  $20 \text{ cm/s}$  for  $\lambda/L = 0.1$ , 1 cm plot =  $4 \text{ cm/s}$  else)

의 0.1배( $\lambda/L = 0.1$ )일 때, 이론해 및 유한차분법에 의한 속도분포는 큰 차이를 보이고 있다(Fig. 6, Fig. 7). 즉, 간극분포의 불규칙성으로 인해 이론해에 의한

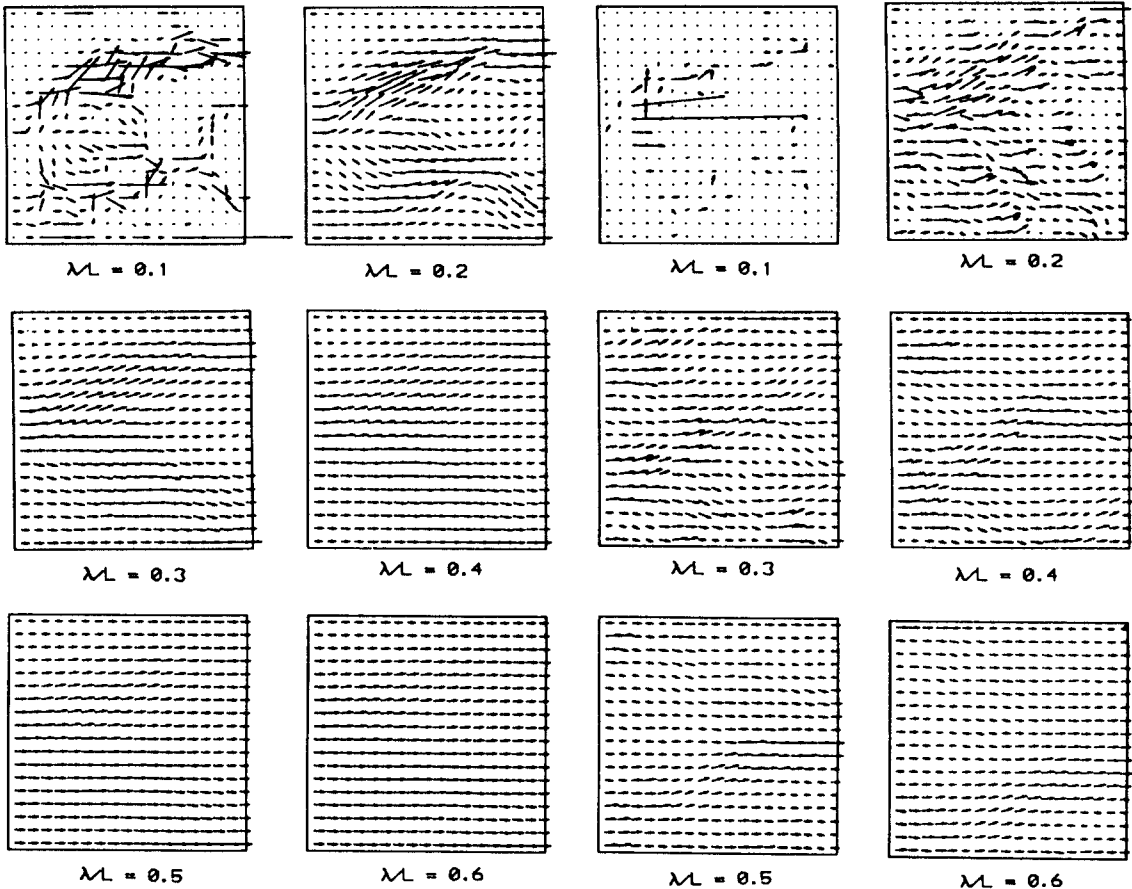


Fig. 7. Flow velocity plots for various  $\lambda/L$  values.  
(FDM: Exponential correlation function:  
Scale: 1 cm plot=4 cm/s)

속도분포는 유한차분법에 의한 속도분포의 최대 50 배까지 크게 나타났다. 이는 이론해의 경우, 간극분포에 대한 상관성의 상대적인 감소로 인해 급격한 간극변화에 의한 수두손실의 영향을 크게 받기 때문이라 생각된다. 상관길이가 절리크기의 0.2배인 경우 간극간의 상관성의 상대적인 증가로 인해 이론해의 경우 0.1~3.1 cm/s, 유한차분법에 의한 경우 0.1~2.3 cm/s의 속도분포를 갖는다. 또한, 절리내에서의 유동은 이론해와 유한차분법에 의한 결과 모두 간극이 큰 지역을 따라서 우세하게 흐르는 '채널(channel) 현상'이 나타나고 있다. 이러한 채널현상은 상관길이가 0.3배, 0.4배로 증가함에 따라 각 지점에서의 간극분포의 상관성으로 인해 둔화되는 경향을 볼 수 있으며, 이에 따른 속도분포의 편차도 줄어드는 경

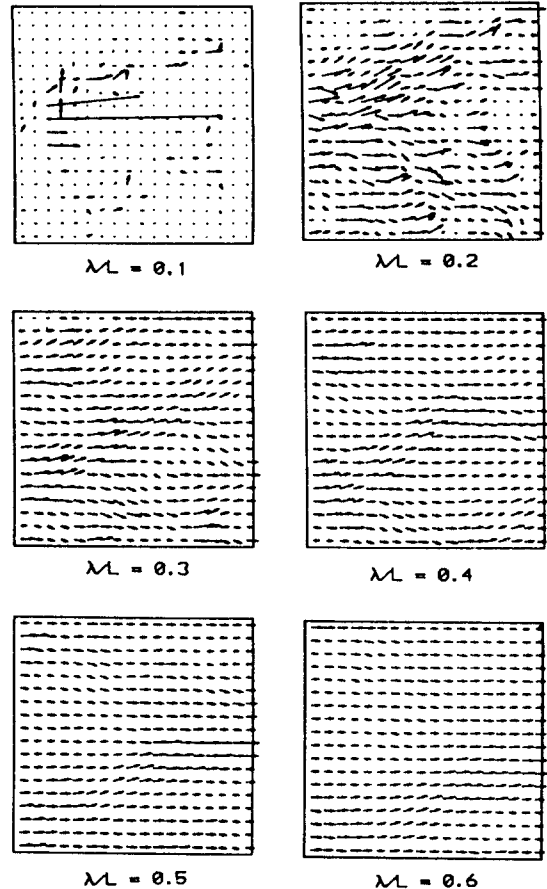


Fig. 8. Flow velocity plots for various  $\lambda/L$  values.  
(Analytic method: Spherical correlation function: Scale: 1 cm plot=20 cm/s for  $\lambda/L=0.1$ , 1 cm plot=4 cm/s else)

향을 보인다(Table 2). 상관길이가 절리크기의 0.5배, 0.6배인 경우 속도분포는 전 영역에 걸쳐서 유사하게 나타나며, 채널현상은 상당히 둔화되어 유체의 유동은 절리면 전체에 걸쳐 일정하게 일어나는 평판모델과 유사한 경향을 보인다. 또한 이론해와 유한차분법에 의해 계산된 유량은 상관길이가 절리크기의 0.1배인 경우를 제외하고 18% 이내에서 일치하였다.

구형상관함수를 사용한 경우, 이론해에 의한 속도분포는 지수상관함수를 사용한 경우와 마찬가지로 상관길이가 절리크기의 0.1배인 경우에 유한차분법에 의한 결과와 큰 차이(최대 60배)를 보이고 있다(Fig. 8, Fig. 9). 이러한 속도분포의 차이는 상관길이가 증가함에 따라 점차 감소하며(Table 2), 절리내에서의 유

동은 지수상관함수를 사용한 경우와 마찬가지로 채널현상이 둔화되는 경향을 볼 수 있다. 상관길이에

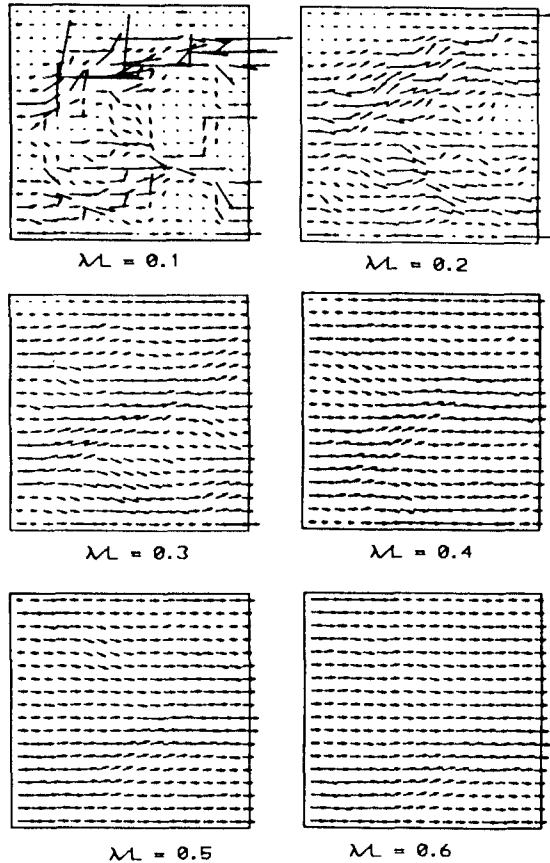


Fig. 9. Flow velocity plots for various  $\lambda/L$  values. (FDM: Spherical correlation function; Scale: 1 cm plot=4 cm/s).

따른 유량은 상관길이가 절리크기의 0.1배인 경우를 제외하고 44% 이내에서 일치하였다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 절리내에서의 유동은 간극간의 편차가 심할 경우 간극이 우세한 방향을 따라 흐르는 채널현상을 일으키고 있으며, 기존의 평판모델로는 절리의 유동현상을 규명하는데 한계가 있음을 알 수 있다. 또한, 간극분포의 편차가 심한 절리모델을 대상으로 Amadei에 의해 제안된 이론적 방법을 사용할 경우, 유동해석의 결과는 신뢰하기가 어렵다고 생각된다. 즉, Table 2에서 알 수 있듯이 상관길이가 절리크기의 0.1배인 경우 절리내 속도분포 및 유량은 유한차분법에 의한 결과와 큰 차이를 보이며 이는 절리간극의 급격한 변화에 따른 수두계산상의 오류에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서, 절리내 간극간의 상관성이 결여된(간극간의 편차가 심한) 모델의 유동해석은 유한차분법을 사용하는 것이 신뢰도를 높이는 방법이라고 판단된다.

### 3. 2차원 절리망에서의 유동해석

#### 3.1 절리도의 발생

불연속 암반에서 지하수의 유동은 암반내 절리의 밀도와 방향성 등 절리의 기하학적 성질에 좌우된다. 즉, 신선암의 낮은 수리전도성 때문에 불연속 암반 내에서의 유체유동은 절리들이 복잡하게 연결된 절리망에서 이루어진다고 볼 수 있다. 그러나, 절리의 분포양상은 암석을 절개하지 않고서 정확한 절리형상을 얻어내는 것은 불가능하기 때문에, 제한된 지질자료로부터 절리의 분포양상을 통계적으로 발생시

Table 2. The comparison of flow properties between different joint aperture realizations.

$\lambda/L$	Exponential correlation function (A(r))				Spherical correlation function (C(r))			
	Velocity(cm/sec)		Flow rate(liter/min)		Velocity(cm/sec)		Flow rate(liter/min)	
	Analytic	FDM	Analytic	FDM	Analytic	FDM	Analytic	FDM
0.1	0.002~18	0.006~10	11.02	6.18	0.05~72.6	0.01~6.6	20.40	8.66
0.2	0.1~3.1	0.1~2.3	5.60	5.75	0.1~2.5	0.1~3.0	7.39	5.30
0.3	0.2~2.0	0.2~1.4	4.76	5.03	0.1~2.0	0.2~2.5	4.81	4.77
0.4	0.3~1.8	0.3~1.3	4.44	4.84	0.3~2.0	0.3~1.5	4.60	4.60
0.5	0.4~1.7	0.4~1.1	4.31	4.81	0.5~1.9	0.4~1.4	4.52	4.77
0.6	0.5~1.6	0.6~1.1	4.10	4.85	0.5~1.9	0.7~1.4	3.53	5.11



키는 것이 필요하다. 절리의 기하학적 성질들을 다양한 통계적 분포들에 접목시키기 위해서는 표본 집단의 자료로부터 얻어진 절리의 기하학적 특성들을 통계적 변수로 보고 모집단의 자료 즉 현장의 관심 영역에 존재하는 절리들의 기하학적 특성의 분포를 어떤 확률분포로 가정하고 추정하는 통계적 모델을 구현하는 것이 필요하다. 이러한 통계적 모델링은 적합한 확률분포를 가정할 경우, 자료의 대표값으로 전체의 경향을 단순화하는 결정적 모델에 비하여 보다 현장의 조건을 충실하게 반영할 수 있다는 장점이 있다. 통계적 모델링 기법을 사용하여 절리도를 발생시키기 위해서는 다음과 같은 변수들이 필요하다.

### 3.1.1 관찰면

절리의 양상은 임의의 관찰면을 통해서 나타난다. 3차원에서의 절리는 실제로 우리가 현장에서 절리를 관찰할 경우, 관찰면에 의하여 절리가 잘리워진 절리길이(joint trace length)의 1차원 형태로 나타나게 된다. 이때, 절리의 형상은 관찰면의 방향에 따라 다르게 나타날 수 있다. 즉 절리의 경사가 45°, 경사방향(dip azimuth)이 90°인 경우, 관찰면의 방향이 경사 0°, 경사방향 0°이면 관찰면에 나타나는 절리는 45°의 기울기를 가지게 되나 관찰면의 경사방향이 90°로 바뀌면 이 절리는 관찰면 상에서는 수평절리, 즉 기울기가 0°인 절리로 관찰될 것이다. 따라서 관찰면의 방향은 3차원적인 절리구조의 통계적 모델링에서 필수적으로 고려해야 된다. 관찰면에 대한 상대적 방향성의 의미로 저변각(base angle)이란 개념을 도입하였다. 저변각은 관찰면을 기준으로 한 기울기이므로 반시계 방향으로  $[0^\circ, 180^\circ]$  사이의 값을 가질 수 있다.

### 3.1.2 절리의 위치와 절리간격

절리의 위치는 전체 절리길이의 중심으로 정의된다. 절리의 위치를 결정하는 방법은 상호 종속적인 방식과 상호 독립적인 방식으로 나눌 수 있다. 전자는 먼저 발생된 절리의 위치가 나중에 발생하는 절리의 위치에 영향을 주는 방법이다. 이러한 방법은 절리간의 간격을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 후자의 경우, 절리의 위치는 발생하는 절리 상호간에 아무런 영향을 미치지 않는다. 전자를 결정적인 과정, 후자를 통계적인 과정이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 후자의 방법을 사용하였으며 사용된 분포함수는 Poisson 분포이다. 이 과정을 통하여 절리의 위치는 상호 독립

적으로 균등분포를 따르며 발생하게 된다.

### 3.1.3 절리의 길이

절리의 길이는 2차원의 평면상에서 절리의 크기를 나타내는 요소이다. 절리의 길이의 통계분포에 대해 많은 연구가 있었으며 다양한 분포함수가 제시되어 왔다. 본 연구에서 사용된 절리발생 프로그램에서는 로그정상분포의 경우를 가정하였다.<sup>18)</sup> 절리의 길이가 관찰면의 밖으로까지 연장된 경우, 경계효과를 고려하여 잘려진 절리를 반대면에 반영하였다. 이는 중심점이 분석영역 밖에 있으나 영역 안으로 일부가 들어온 절리를 고려해야 하기 때문이다. 만일 이러한 고려가 없으면 경계에서의 절리밀도는 중심에서보다 낮은 경향을 보이게 된다.

### 3.1.4 방향성

방향성은 경사와 경사방향으로 표현된다. 방향성을 통계적으로 처리할 때 확률변수는 경사와 경사방향이다. 확률변수로서 경사와 경사방향을 독립적으로 고려한다면 동일한 통계변수에 대하여 결과가 다르게 나올 수 있다. 즉, 같은 경사방향도 다른 경사에 대하여 다른 기하학적인 의미를 가진다는 것이다. 본 연구에서는 각 절리군의 평균 방향성을 가지는 절리면의 연직벡터 방향을 z축으로 하는 새로운 좌표계를 기준으로 한 확률분포를 사용하였다.

평균 방향성으로부터 각 절리 방향성의 각거리(angular distance)를  $\phi$ , 각 거리의 표준편차를  $\phi_{STD}$ 라 하고, 각거리는 이 각거리의 코사인 값과 1의 차가 확률변수  $(1 - \cos\phi)$ 가 되는 정상분포를 따른다고 가정하면 각거리는 식 (9)와 같은 확률밀도함수  $f(\phi)$ 를 따른다고 할 수 있다.

$$f(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1 - \cos\phi_{STD})}} \exp\left[-(1 - \cos\phi)^2 / 2(1 - \cos\phi_{STD})^2\right] \quad (9)$$

이와 같이 결정되는 각거리는 새로운 좌표계에서의 경사의 의미로 생각할 수 있다. 새로운 좌표계에서의 경사방향은  $[0^\circ, 360^\circ]$ 의 범위에서 균등하게 분포한다고 가정한다. 결정된 경사와 경사방향은 평균 방향성을 기준으로 하여 처음의 좌표계로 변환된다. 이와 같은 방법으로 경사와 경사방향에 관계없이 동일한 기하학적인 의미를 가질 수 있다.

이상의 전제로부터 작성된 절리발생 프로그램은

다음과 같은 특징을 보인다.

(a) 주어진 2차원 영역 안에서 각 절리의 중심점은 균등하게 분포하며, 분포는 Poisson 분포함수를 따르고 절리의 간격은 음지수분포를 따른다.

(b) 절리의 길이는 주어진 평균과 표준편차에 대하여 로그정상분포를 따른다.

(c) 절리의 방향성은 평균 절리방향을 수직방향으로 놓았을 때, 이 방향에 대한 각 절리의 사잇각의 코사인값과 1의 차이가 정상분포를 가지며 경사방향은 균등하게 분포한다.

(d) 절리길이와 절리간격은 절리의 방향성(또는 관찰면의 방향성)에 독립적이다.

(e) 각 절리의 발생은 상호 독립적이다. 즉, 먼저 생성된 절리의 위치에 영향을 받지 않으며 어떠한 절리의 존재에 의해 다른 절리가 끊기지 않는다.

### 3.2 연결성 조사

암반내에서의 유체의 흐름은 서로 연결된 절리를 주된 경로로 하기 때문에 발생된 절리도로부터 연결성을 분석해야 한다. 이는 신선암이 불투수 매질이라는 전제와 고립된 절리는 유체의 흐름에 영향을 미치지 않는다는 가정에 의한 것이다. 절리들의 연결성을 조사하는 방법은 각 절리의 방향성, 위치, 절리길이로부터 직선의 방정식을 만들고 절리간의 교차점을 구한다. 교차점을 가지는 절리에 대하여 행렬을 구성하고, 구성된 행렬로부터 교차점이 두개 이상인 절리를 선별하며 교차점이 한개인 경우는 분석에서 제외시킨다. 마지막으로 경계와 만나지 않는 절리들을 제거한다. 이상의 과정을 전산 프로그램화하였다.

### 3.3 절리망에서의 유동해석

절리망에서의 유동해석을 하기에 앞서 개별절리에 대한 정의가 필요하다. 본 연구에서는 개개 절리의 거칠기를 고려한 기계적 간극(mechanical aperture)을 수리적 간극(hydraulic aperture)으로 치환하여 절리망 전체의 유동특성을 분석하였다. 이는 개개 절리의 간극분포를 직접 고려할 경우, 다수의 절리로 이루어진 절리망 전체에 대한 유동분석시 발생할 수 있는 컴퓨터의 기억용량의 한계를 극복하기 위한 것이다. 수리적 간극은 같은 경계조건하에서 같은 유량을 통과시키는 매끈한 두개의 평판사이의 간격을 의미한다.

입의의 간극분포를 지닌 절리를 평판으로 치환하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

(a) 모든 절리의 기계적인 간극은 통계적인 분포를 따른다.

(b) 모든 절리군에 속하는 개개 절리의 간극분포는 각 절리군에 따라 일정하다.

이상의 가정을 고려하여, 주어진 경계조건으로부터 식 (10)을 사용하여 절리망에서의 수두분포를 계산할 수 있다.

$$h_i = \frac{\sum c_{ij} h_j}{\sum c_{ij}} \quad (10)$$

여기서,  $h_i$ 와  $h_j$ 는 각각  $i$  노드와  $j$  노드의 수두를 의미하며  $c_{ij}$ 는  $i$ 노드에서  $j$ 노드로의 콘덕턴스에 해당한다. 식 (10)의 해를 구하기 위해 sparse matrix solving method를 사용하였다. 이 방법은 0이 아닌 항을 1차원 배열에 저장하고 지수(index)를 만들어 2차원 행렬의 위치를 1차원 배열의 위치로 치환하기 때문에 불필요한 메모리의 낭비를 최소화 할 수 있다.

계산된 수두분포로부터 절리망에서의 속도분포는 식 (11)을 사용하여 계산한다.

$$\bar{V}_i = \frac{1}{L^2} \sum_{m=1}^n V_m \cos \theta_{im} e_m l_m \quad (11)$$

여기서,  $\theta_{im}$ 은 절리  $m$ 과  $i$  축간의 각도,  $e_m$ 은 절리의 간극을 나타내며,  $l_m$ 은 절리  $m$ 의 길이를 나타낸다. 식 (11)의  $i$  방향의 평균속도로부터 수리전도계수  $k_{ij}$ 를 구할 수 있다. 이상의 이론식을 사용하여 계산의 편의를 위해 전산 프로그램화하였다.

#### 3.3.1 불연속 암반의 수리전도계수에 관한 실험

불연속 암반의 등가 수리전도계수의 분포양상을 알아보기 위해 같은 지질조건 하에서 절리발생 프로그램을 이용하여 100개의 절리도를 발생시켰다. 이때 다른 지질자료를 사용하여 절리도를 발생시킨다면 비교의 근거를 상실하므로 같은 지질자료를 이용하는 대신에 난수 발생의 핵(seed)을 0부터 99까지 변화시키며 발생하였다. 이것은 동일한 지질조건하에서 100개의 표본을 채취한 것과 같은 의미를 지니며, 수리전도계수의 분포양상과 편차의 정도가 관심의 초점이 된다. 이는 같은 지질자료를 갖는 다양한 표본들에서 나온 수리전도계수의 분포양상이 편차가

Table 3. The geologic data used for joint network analysis.

Joint set number	Number of joints	Mean joint trace length(m)	STD of joint trace length (m)	Mean dip (degree)	Mean dip azimuth (degree)
1	40	3.5	1.28	34	303
2	40	3.5	1.77	76	107
3	40	3.5	1.38	65	157

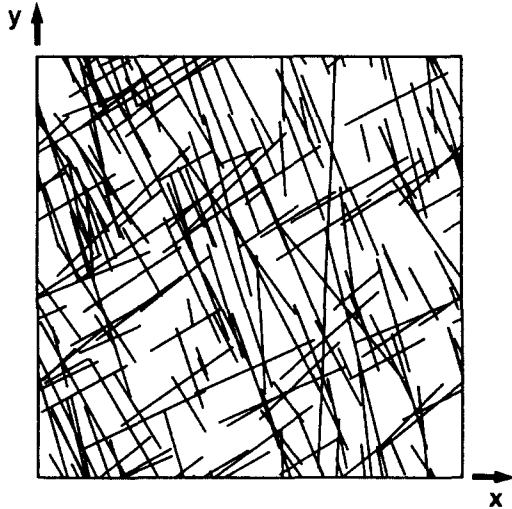


Fig. 10. Two dimensional realization of joint map. (40 joints for each joint set)

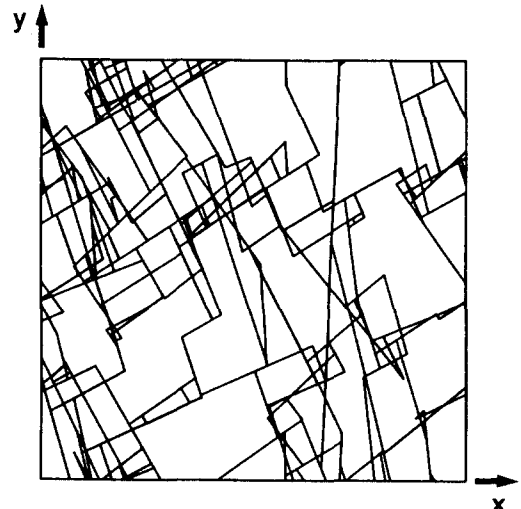
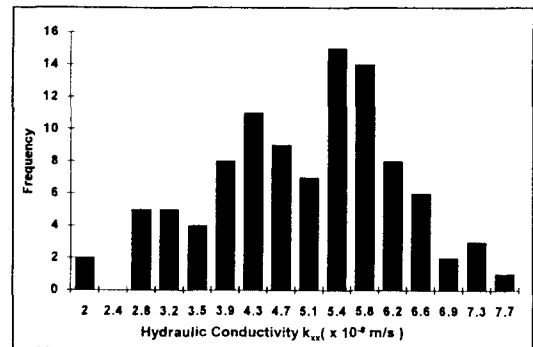


Fig. 11. Two dimensional realization of joint network. (40 joints for each joint set)

크다면 그 결과를 신뢰하기 어렵기 때문이다.

Table 3은 절리망 해석법에 사용된 지질자료이다. Table 3의 지질자료로부터 절리도를 발생시키고(Fig. 10) 유동해석을 위해 절리들의 연결성 조사 프로그램을 사용하여 상호 연결된 절리망으로 재구성하였다(Fig. 11). 사용한 경계조건은 모델의 상하부의 수두를 각각 10 m와 20 m로 하고, 측면에서의 수두는 심도에 따라 선형으로 변하는 경계조건을 사용하였다. 각 절리의 간극은  $100 \mu\text{m}$ 으로 가정하였다.

100개의 절리도에 대한 등가 수리전도계수 행렬( $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{xy}$ ,  $k_{yx}$ )의 분포양상은 Fig. 12~15와 같다. 수리전도계수  $k_{xx}$ 와  $k_{yy}$ 는 정규분포의 양상을 띄고 있으며, 수리전도계수  $k_{xy}$ 와  $k_{yx}$ 는 음지수분포 또는 로그정상분포에 근사한 분포양상을 띄고 있다. 수리전도계수  $k_{xx}$ 의 경우 최소  $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 에서 최대  $7.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 까지 분포하였으며, 수리전도계수  $k_{yy}$ 의 경우 최소  $6.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 에서 최대  $1.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 까지 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 수리전도계수의 이

Fig. 12. Distribution of hydraulic conductivity  $K_{xx}$ .

방성에 의해 나타난 수리전도계수  $k_{xy}$ ,  $k_{yx}$ 는 각각  $0 \sim 3.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ,  $0 \sim 5.4 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  내에 분포하였다. 수리전도계수  $k_{xx}$ 의 평균은  $5.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  표준편차는  $1.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  이고, 수리전도계수  $k_{yy}$ 의 평균은  $9.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  표준편차는  $1.4 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 이다. 이러한 결과를 볼 때 등가 수리전도계수의 편차가 비교적 작

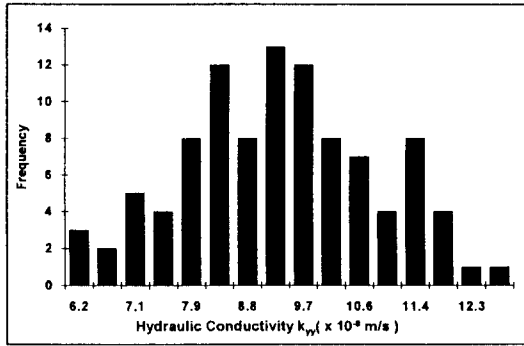


Fig. 13. Distribution of hydraulic conductivity  $k_{yy}$ .

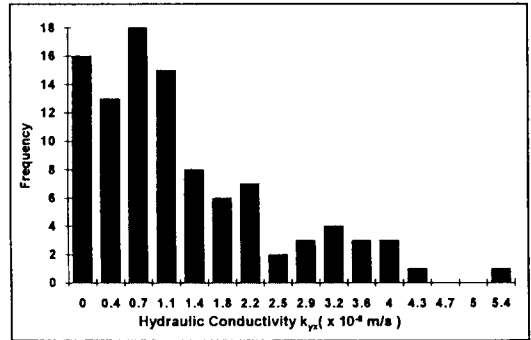


Fig. 15. Distribution of hydraulic conductivity  $k_{yx}$ .

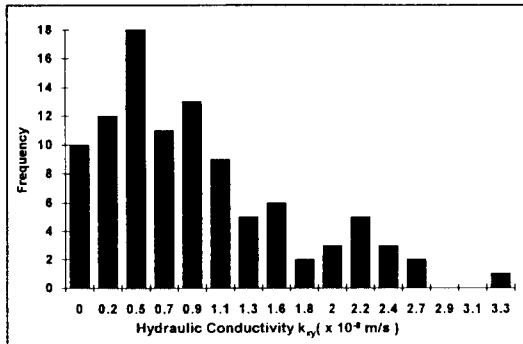


Fig. 14. Distribution of hydraulic conductivity  $k_{xy}$ .

으므로 해석결과의 신뢰도가 높다고 판단된다.

### 3.3.2 원형공동에서 유체유동에 관한 실험

절리암반내 원형공동 굴착시 절리의 갯수 및 공동의 직경에 따라 공동내부로 유입되는 지하수의 유량을 예측하는 전산 모델실험을 수행하였다. 이를 위해 절리와 공동벽면의 교차여부를 판단하고 굴착면과 절리가 만나는 노드에 경계조건을 할당하여 공동내부로 유입되는 유량을 예측하였다. 전처리 과정으로 공동의 굴착 후 제거되는 절리를 판단하는 작업이 필요하다. 사용한 모델은 가로 세로 10 m의 절리암반을 대상으로 공동의 직경을 1 m에서 4 m까지 0.2 m 간격으로 증가시켰다. 이 모델에 사용한 지질자료는 Table 3과 같은 3개의 절리군을 대상으로 하였으며, 각 절리군의 절리의 갯수는 20, 30, 40, 50개로 증가시켰다. 이것은 개별 절리망 해석법을 사용하여 절리의 갯수를 증가시켰을 경우, 절리암반을 연속체 모델로 간주하여 지하수의 유량을 해석하는 이론적 결과와 비교하기 위한 것이다. Fig. 16은 각 절리군의 절리수를 40개로 한 경우의 모델이다.

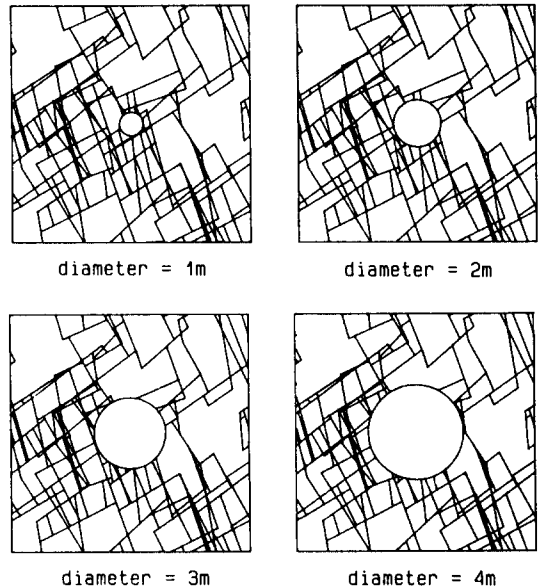


Fig. 16. Four cases of excavation in jointed rock mass with increasing diameter.

사용한 경계조건은 상하경계에서의 수두를 각각 20 m와 30 m, 좌우측 경계의 수두는 상하경계의 수두 사이에서 선형으로 변화도록 하였다. 공동벽면에서의 수두는 공동굴착으로 인한 수두감소를 고려하여 경계에서의 수두보다 낮은 10 m로 하였다. 각 절리의 간극은 100  $\mu$ m로 가정하였다.

작성된 절리망을 대상으로 공동의 직경이 증가함에 따라 공동내부로 유입된 유량을 이론해와 비교하였다. 사용된 이론해는 균질 등방성 매질을 대상으로 해거나 하저터널의 경우와 같이 지하수위가 변하지 않는 상태를 가정한 정상상태의 해이다.<sup>19)</sup>

Table 4. The isotropic hydraulic conductivity  $K_s$  varying with the number of joints of three joint sets.

Number of joints for each joint set	$k_{xx} (\times 10^{-8} \text{ m/s})$	$k_{yy} (\times 10^{-8} \text{ m/s})$	$K_s (\times 10^{-8} \text{ m/s})$
20	1.0	3.0	2.00
30	3.4	4.0	3.70
40	3.6	8.2	5.90
50	6.4	12.9	9.65

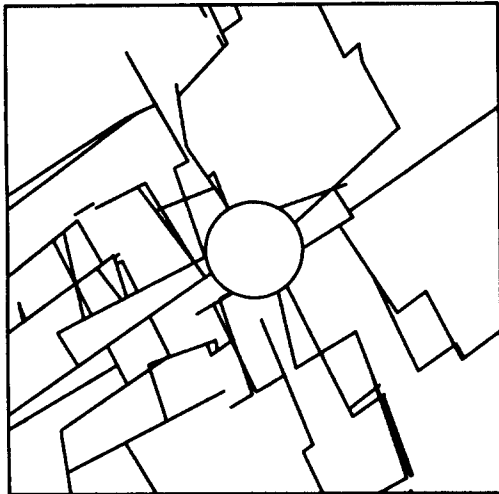


Fig. 17. Channel flow in 2 dimensional joint network.

$$Q = \frac{2K_s \pi H_0}{\ln\left(\frac{4L}{d}\right)} \quad (12)$$

여기서,  $Q$ 는 터널의 단위 길이당 유입량,  $K_s$ 는 등방 수리전도계수,  $H_0$ 는 정수압 수두,  $L$ 은 지표면으로부터 터널까지의 깊이,  $d$ 는 터널의 직경이다. 절리망 해석법에 의한 결과와 비교하기 위해  $H_0$ 를 15 m,  $L$ 을 5 m로 하였다. 또한, 수리전도계수  $K_s$ 가 등방성이라는 성질을 가지고 있으므로, 터널을 굴착하지 않은 상태에서 절리망의 등가 수리전도계수  $k_{xx}$ 와  $k_{yy}$ 를 구하여 그 산술평균을  $K_s$ 에 할당하였다. Table 4는 각 절리군의 절리수에 따른 등방성 수리전도계수  $K_s$ 를 나타낸다.

2차원 절리망에서의 유동현상에 대하여 살펴본 결과 유체의 흐름이 우세한 절리가 존재함을 발견하였다. 이는 절리내에서의 유동이 최단거리와 간극이 큰 절리를 찾아서 선택적으로 흐르는 현상이다. 단일 절리내에서 간극이 우세한 방향으로 흐르는 것과 마

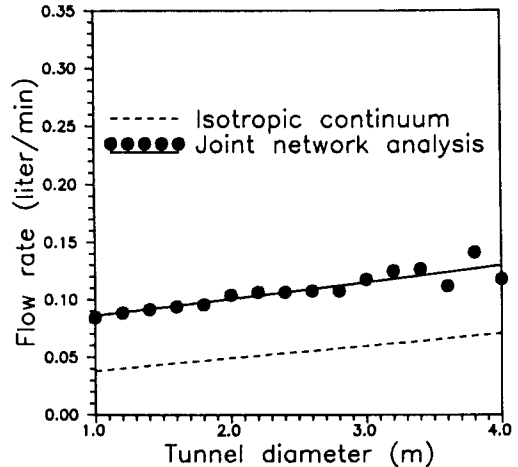


Fig. 18. Volumetric flow rate with varying tunnel diameter. (Number of joints for each joint set=20).

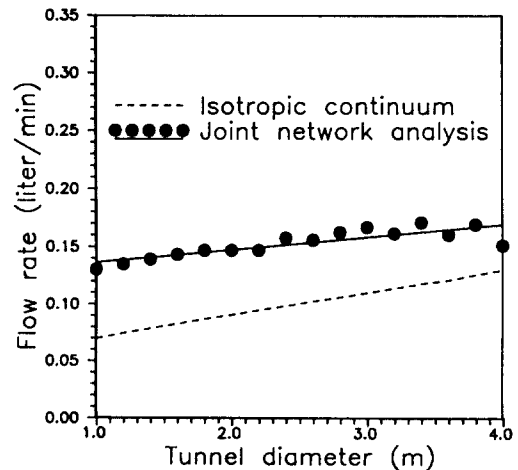


Fig. 19. Volumetric flow rate with varying tunnel diameter. (Number of joints for each joint set=30).

찬가지로 2차원 절리망에서도 채널현상이 존재함을 알 수 있다. Fig. 17은 터널 연장방향으로 10 m 구간

에서 시간당 1.8 liter 이상 흐르는 절리 만을 그린 절리도이다.

각 절리군의 절리수가 20과 30인 경우 공동의 직경에 따라 공동 내부로 유입되는 유량은 절리망 해석법의 경우 각각 분당 0.08~0.14 liter, 0.13~0.17 liter 사이에 분포하였다(Fig. 18, Fig. 19). 한편 등방 연속체를 가정한 이론해는 각각 분당 0.04~0.07 liter, 0.07~0.13 liter 사이의 유량이 발생하였다. 절리망 해석 결과는 이론해에 비해 최대 2.3배, 1.8배 크게 나타났다. 이는 절리망의 해석법의 경우 상호 연결된 절리만이 지하수의 유동에 영향을 미치므로 임의의 방향성을 지닌 무수히 많은 절리들이 상호 연결된 상태를 가정한 연속, 등방, 균질의 이론해에 부합되지 않기 때문이다.

이러한 차이는 각 절리군의 절리수가 40과 50으로 증가함에 따라 상당히 감소되는 경향을 볼 수 있다. 각 절리군의 절리수가 40인 경우 절리망 해석법에

의한 유량(0.16~0.23 liter/min)은 이론적 결과(0.11~0.21 liter/min)의 최대 44%까지 크게 나타났으며(Fig. 20), 각 절리군의 절리수가 50인 경우 이론적 결과의 최대 13% 이내에서 일치하는 경향을 보였다(Fig. 21). 또한 절리망 해석법의 경우, 공동의 직경에 따라 공동 내부로 유입되는 유량이 연속적으로 증가하지 않는 경향을 보이는데, 이는 공동에 의해 제거된 절리들의 영향 때문이라 생각된다.

대표체적요소(RVE)의 경우 실험에 사용된 체적이 증가하면 암석의 물성이 암반을 대표하는 물성에 수렴하는 현상을 볼 수 있으며, 이는 체적의 증가로 인해서 포함되는 절리가 증가하고 따라서 대표체적 요소 이상의 암석 물성은 암석의 체적과 형상에 관계없이 일정한 양상을 띄게 된다. 본 연구에서는 체적을 일정하게 유지하면서 절리의 수를 증가시킬 경우 암석의 물성, 특히 수리전도 특성이 어떻게 변화하는가를 살펴보았다. 그 결과 절리의 밀도가 증가하

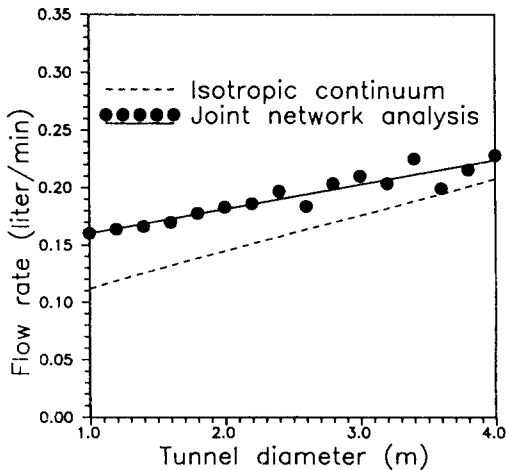


Fig. 20. Volumetric flow rate with varying tunnel diameter. (Number of joints for each joint set=40).

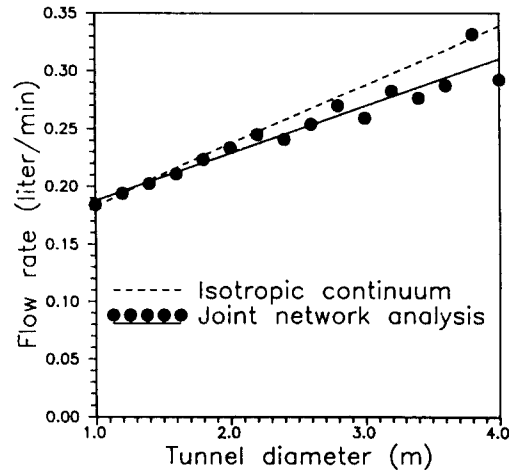


Fig. 21. Volumetric flow rate with varying tunnel diameter. (Number of joints for each joint set=50).

Table 5. The comparison of inflow between joint network analysis and analytic solution.

Number of joints for each joint set	Inflow per 1 m tunnel length (liter/min)	
	Joint network analysis	Analytic solution(isotropic continuum)
20	0.08~0.14	0.04~0.07
30	0.13~0.17	0.07~0.13
40	0.16~0.23	0.11~0.21
50	0.18~0.33	0.18~0.34

면서 절리망해석법의 결과와 등방, 연속체를 가정한 이론해와 근접하는 경향을 보였다(Table 5). 절리의 밀도가 크거나 대표체적요소 이상의 암석은 등가의 연속체로서 거동하며, 반대의 경우는 불연속체로 거동함을 의미한다.

즉 암석의 체적이 대표체적요소 이상인 경우 또는 암석내의 절리의 밀도가 큰 경우는 등가 연속체로 분석이 타당하며, 암석의 체적이 대표체적요소 이하인 경우 또는 암석내의 절리의 밀도가 크지 않은 경우는 개별절리를 직접 분석하는 것이 타당하다. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 연속, 등방, 균질의 접근방식 뿐 만 아니라, 절리의 발달이 어떤 편중된 방향성을 지니고 있거나, 소수의 절리만이 발달되어 있는 경우 개개의 지질자료에 따른 절리의 기하학적 정보를 효과적으로 고려하여 지하수의 유동을 해석하기 위해서는 절리망 해석법을 사용하는 것이 필수적이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 단일절리를 대상으로 간극 분포를 분석한 결과 상관길이가 작은 경우 간극의 편차가 심하게 나타났으며 이에 따라 절리면의 굴곡이 심하게 나타났다. 이러한 경향은 상관길이가 증가함에 따라 굴곡이 점차로 줄어 상관길이가 최대인 경우는 평판에 가까운 양상을 띄었다.

(2) 통계적 방법에 의해 발생된 간극분포로부터 단일절리내에서의 지하수 유동을 이론해 및 유한차분법을 사용하여 분석하였다. 상관길이가 작은 경우 유동은 간극이 큰 지역을 따라 우세하게 흐르는 채널현상이 발생하였다. 이러한 채널현상은 상관길이가 증가함에 따라 점차 감소하였으며 상관길이가 최대인 경우 속도분포는 전 영역에 걸쳐서 균일하게 나타났다. 간극의 편차가 심한 절리모델 즉 상관길이가 작은 경우, 이론적 방법과 유한차분법에 의한 결과는 큰 차이를 보였다. 이는 이론해의 절리간극의 급격한 변화에 따른 수두계산상의 오류에 기인한다. 따라서 간극의 상관성이 결여된 절리 모델의 유동해석에는 유한차분법을 사용하는 것이 해석결과의 신뢰도를 높이는 방법이라고 판단된다.

(3) 절리발생 프로그램으로부터 얻어진 100개의 절리암반에 대해 절리망 해석법을 적용하고 등가 수리전도계수의 분포양상을 분석하였다. 수리전도계수  $k_{xx}$ 와  $k_{yy}$ 는 정규분포의 양상을 띄고 있으며,  $k_{xy}$ 와  $k_{yx}$ 는 음지수분포 또는 로그정상분포에 근사한 분포 양상을 나타냈다. 예측된 등가 수리전도계수의 낮은 표준편차는 해석결과의 신뢰도를 입증한다.

(4) 절리망 해석법을 원형공동 굴착문제에 적용하였다. 2차원 절리망에서도 단일절리내에서와 같이 우세한 방향을 따라서 선택적으로 흐르는 채널현상이 존재함을 알 수 있었다. 또한 절리 개수 및 공동 직경의 변화에 따른 지하수 유입량을 계산하였고 이를 이론해와 비교하였다. 각 절리군의 절리수가 증가함에 따라 절리망 해석법에 의한 결과는 연속, 등방, 균질의 이론적 결과에 근접하는 경향을 보였다. 이는 절리암반의 유동해석에 사용되는 연속체적 접근방식의 타당성을 잘 입증해주는 결과이다. 따라서 절리의 밀도가 큰 경우에는 등가 연속체로 분석이 타당하지만 그 반대의 경우, 즉 상대적으로 적은 수(통계적 의미에서)의 절리가 분포하는 암반에서의 지하수 유동을 해석하는 데는 등가 연속체 분석법 보다 개개의 절리를 직접 분석하는 것이 타당하다. 결과적으로 개개 절리의 기하학적 정보를 지하수 유동해석에 충실히 반영하기 위해서는 절리망 해석법이 필요하다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Pickens, J.F. & G.E., Grisak (1981) Modelling of scale-dependent dispersion in hydrogeologic systems, *Water Resour. Res.*, Vol. 17, No. 6, pp. 1701-1711.
- 2) Bear, J. (1979) *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, pp. 569.
- 3) Samaniego, J.A. & S.D. Priest (1984), The prediction of water flows through discontinuity networks into underground excavations, *Proceedings of Design and Performance of Underground Excavations*, ISRM/BGS, Cambridge, pp. 157-164.
- 4) Long, J.C.S. & P.A. Witherspoon (1985) The relationship of the degree of interconnection to permeability of fracture networks, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, No. B4, pp. 3087-3098.
- 5) Smith, L. & F.W. Schwartz (1984) An analysis of the influence of fracture geometry on mass transport in fractured media, *Water Resour. Res.*, Vol.

- 20, No. 9, pp. 1241-1252.
- 6) Witherspoon, P.A., J.S.Y. Wang, K. Iwai, & J.E. Gale (1980) Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 6, pp. 1016-1024.
  - 7) Tsang, Y.W. & C.F. Tsang (1987) Channels model of flow through fractured media, *Water Resour. Res.*, Vol. 23, No. 3, pp. 467-479.
  - 8) Brown, S.R. (1987) Fluid flow through rock joints : The effect of surface roughness, *J. Geophys. Res.*, Vol. 92, No. B2, pp. 1337-1347.
  - 9) Tsang, Y.W. (1984) The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture, *Water Resour. Res.*, Vol. 20, No. 9, pp. 1209-1215.
  - 10) Tsang, Y.W. & C.F. Tsang (1988) Flow and tracer transport in fractured media : A variable aperture channel model and its properties, *Water Resour. Res.*, Vol. 24, No. 12, pp. 2049-2060.
  - 11) Masahiro Iwano & Herbert Einstein (1993) Stochastic analysis of surface roughness, aperture and flow in a single fracture, *EUROCK '93*, Ribeiro e Sousa & Grossmann(eds), pp. 135-141.
  - 12) Tsang, Y.W. & C.F. Tsang (1990) Hydrological characterization of variable-aperture fractures, *Rock Joint, Barton & Stephansson(eds)*, pp. 423-431.
  - 13) Stratford, R.G., A.W. Herbert & C.P. Jackson (1990) A parameter study of the influence of aperture variation on fracture flow and the consequences in a fracture network, *Rock Joint, Barton & Stephansson(eds)*, pp. 413-422.
  - 14) Villaescusa, E. & E.T. Brown (1990) Characterizing joint spatial correlation using geostatistical methods, *Rock Joint, Barton & Stephansson(eds)*, pp. 115-122.
  - 15) Hopkins, D.L., N.G.W. Cook & L.R. Myer (1990) Normal joint stiffness as a function of spatial geometry and surface roughness, *Rock Joint, Barton & Stephansson(eds)*, pp. 203-210.
  - 16) Amadei, B. & T. Illangasekare (1992) Analytical solution for steady and transient flow in non-homogeneous and anisotropic rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 29, No. 6, pp. 561-572.
  - 17) Daly, C.J. & Morel-Seytoux H.J. (1981) An integral transform method for the linearized Boussinesq groundwater flow equation, *Water Resour. Res.*, Vol. 17, pp. 875-884.
  - 18) 이근채 (1992) 통계적 절리구조 모델링과 지하공동 안정성 평가에의 적용, 석사학위 논문, 한양대학교.
  - 19) Zhang, L. & J.A. Franklin (1993) Prediction of water flow into rock tunnels ; an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 1, pp. 37-46.