

삼차원 불연속면 연결망을 이용한 암반의 등가수리전도도 결정에 대한 연구

방상혁¹⁾, 전석원¹⁾, 최종근¹⁾

Determination of Equivalent Hydraulic Conductivity of Rock Mass Using Three-Dimensional Discontinuity Network

Sang-Hyuk Bang, Seokwon Jeon and Jonggeun Choe

Abstract. Discontinuities such as faults, fractures and joints in rock mass play the dominant role in the mechanical and hydraulic properties of the rock mass. The key factors that influence on the flow of groundwater are hydraulic and geometric characteristics of discontinuities and their connectivity. In this study, a program that analyzes groundwater flow in the 3D discontinuity network was developed on the assumption that the discontinuity characteristics such as density, trace length, orientation and aperture have particular distribution functions. This program generates discontinuities in a three-dimensional space and analyzes their connectivity and groundwater flow. Due to the limited computing capacity in this study, REV was not exactly determined, but it was inferred to be greater than $25 \times 25 \times 25 \text{ m}^3$. By calculating the extent of aperture that influences on the groundwater flow, it was found that the discontinuities with the aperture smaller than 30% of the mean aperture had little influence on the groundwater flow. In addition, there was little difference in the equivalent hydraulic conductivity for the two cases when considering and not considering the boundary effect. It was because the groundwater flow was mostly influenced by the discontinuities with large aperture. Among the parameters considered in this study, the length, aperture, and orientation of discontinuities had the greatest influence on the equivalent hydraulic conductivity of rock mass in their order. In case of existence of a fault in rock mass, elements of the equivalent hydraulic conductivity tensor parallel to the fault fairly increased in their magnitude but those perpendicular to the fault were increased in a very small amount at the first stage and then converged.

KeyWords: Equivalent hydraulic conductivity, Discontinuity fracture network, Representative element volume(REV), Groundwater flow analysis

초 록. 단층, 균열, 절리 등의 암반 내에 존재하는 수많은 불연속면은 암반의 역학적·수리적 특성을 좌우하는 중요한 요소이다. 암반 내 지하수 유동에 큰 영향을 미치는 요소는 불연속면의 발생빈도와 기하학적 특성 그리고 불연속면 상호간의 연결성이라고 할 수 있다. 이 연구에서는 불연속면의 특성인 발생빈도, 크기, 방향, 간극의 크기 등의 분포함수를 가정하여 3차원 불연속면 연결망 내에서 지하수 유동 해석을 실시하는 프로그램을 작성하였다. 이 프로그램은 3차원 상에 불연속면을 발생시키고 불연속면간 연결성을 분석하여 수리해석을 실시한다. 이 프로그램을 통해 수리해석을 실시한 결과, 컴퓨터 메모리의 한계로 인해 대상지역의 대표요소체적을 정확하게 결정할 수는 없었지만, 대략 $25 \times 25 \times 25 \text{ m}^3$ 이상에서 결정될 것으로 추정할 수 있었다. 지하수 유동해석에 영향을 미치는 간극의 범위를 계산한 결과, 불연속면 평균 간극의 30% 이하의 간극을 갖는 불연속면은 지하수 유동에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 또, 경계효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 등가수리전도도의 차이는 거의 없었으며 이는 대상지역에서 간극이 큰 일부의 불연속면을 통한 유동이 전체적인 지하수 유동에 크게 영향을 주기 때문인 것으로 판단되었다. 입력자료 중에서 암반의 등가수리전도도에 영향을 미치는 요소의 중요도는 불연속면의 길이, 간극, 방향의 순서로 나타났다. 대상 암반에 단층면이 존재할 경우, 등가수리전도도는 단층면에 평행한 방향의 요소는 증가하며 이에 수직인 방향의 요소는 약간 증가하다 수렴하는 경향을 보였다.

핵심어: 불연속면 연결망 모델, 등가수리전도도, 대표요소체적, 지하수 유동해석

¹⁾서울대학교 지구환경시스템공학부
접수일: 2002년 12월 23일
심사 완료일: 2003년 2월 26일

1. 서 론

불연속면 연결망 모델은 결정질 암반의 지하수 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 요소가 불연속면이라는 개념에 근거하여 먼저 불연속면의 방향, 간격, 길이, 간극을 표현할 수 있는 확률밀도함수를 설정하고 이를 통해 불연속면을 발생시키고 해석적인 방법이나 유한요소법, 경계요소법 등을 이용하여 지하수 유동해석을 실시하는 방법이다. 이 방법은 1980년대에 들어서서부터 활발하게 연구되기 시작하였으며 불연속면의 기하학적 특징은 통계적 함수로 잘 표현될 수 있다는 점과 실제 지하수 흐름과 가장 유사한 모델이라는 측면에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 이 모델은 수 km 이상의 광역 지하수 유동 해석의 경우에는 균열 수의 증가로 인한 컴퓨터 메모리의 한계가 있는 단점을 갖고 있다.

Billiaux(1989), Kulatilake(1993) 등은 불연속면 연결망의 구성요소인 불연속면의 길이, 중심분포, 방향, 형태, 간극에 대한 기존 연구에 기초하여 3차원 불연속면 연결망 모델에 관한 연구를 수행하였다. 국내에서는 송명규(1993), 장현익(1996)에 의한 2차원 해석, 고태영(2000)에 의한 3차원 해석 이외에는 NAPSAC, NAMMU 등의 상업용 프로그램에 의한 해석이 주로 수행되어 왔다(장근무, 1998; 박병운, 2000).

이 연구에서는 불연속면의 특성인 발생빈도, 추적길이, 방향성, 간극의 크기가 일정한 분포를 갖는다는 여러 연구(Priest, 1993, Long et al., 1982, Villaescusa and Brown, 1992, Neuman, 1987, Nordqvist, 1995)에 근거하여, 불연속면을 수학적 접근이 쉬운 원판형으로 가정하고, 포아송분포를 따르는 중심분포, Fisher 분포를 따르는 방향성분포, 대수정규분포(lognormal distribution) 또는 음지수분포(negative exponential distribution) 등을 따르는 길이분포 등을 가정하여 3차원 불연속면 연결망을 구현하였다. 이와 같이 발생된 3차원 불연속면 연결망을 이용하여 등가수리전도도의 대표요소체적을 구하고자 하였으며, 발생영역 외부의 불연속면이 지하수 유동에 영향을 미치는 경계효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하였다. 또한, 불연속면의 길이 및 간극 변화, 방향 분포 변화, 단층면 형성 등에 따른 암반의 등가수리전도도의 변화에 대해 고찰하였다.

2. 3차원 불연속면 연결망을 이용한 수리해석을 위한 이론적 배경

3차원 불연속면 연결망을 통한 수리해석을 위해서는 불연속면의 발생, 발생한 불연속면 사이의 연결여부를

결정하는 연결도 해석(connectivity analysis), 그리고 연결망을 통한 수리해석의 과정이 필요하다. 불연속면의 발생을 위해 불연속면의 방향, 길이, 간극, 중심분포 등의 기하학적 특성이 특정한 분포함수를 따른다고 가정하였다. 그리고 연결도 해석 및 연결망을 통한 수리해석은 고태영(2000), 최재영(2000) 등이 제시한 알고리즘을 이용하였다.

2.1 불연속면의 기하학적 특성

3차원 불연속면 연결망 내에서의 지하수 유동해석을 위해서는 불연속면의 형상, 길이, 간극, 중심분포 등과 같은 불연속면의 기하학적 특성에 대한 통계적 분포 특성이 필요하다. 본 연구에서는 불연속면의 형태를 원판형으로 가정하였다. 불연속면의 형태를 원판형으로 가정할 경우 불연속면의 크기의 방향성이 없으므로 수학적 접근이 용이한 장점이 있기 때문이다. 원판형 3차원 불연속면 모델을 발생하기 위해서는 불연속면의 지름(d), 중심(x, y, z), 방향벡터(l, m, n), 간극(a)등을 결정해야 한다(Fig. 1).

불연속면의 생성위치, 즉 입체적 분포특성에 관하여는 대부분의 연구에서 포아송분포, 즉 불연속면 중심점의 위치가 임의적으로 분포한다는 가정을 따르고 있다. 암반에서 불연속면의 중심은 층리가 뚜렷한 퇴적 지층이나, 파쇄대 혹은 지질 구조대 등이 존재하지 않는 일반적인 경우에, 임의의 위치에 불규칙하게 분산되어 있는 특징을 갖게된다(Baecher et al., 1977; Billiaux et al., 1989; Priest, 1993). 일반적으로 이런 불연속면의 특징을 표현하기 위해서 불연속면의 중심을 포아송분포로 가정하고 해석하게 된다.

불연속면의 방향 분포는 Fisher를 시작으로 Einstein and Baecher, Kelker and Langenberg, Mardia, Waton

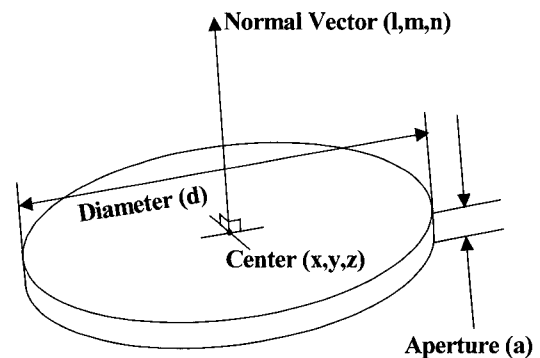


Fig. 1. Schematic diagram of a disk type joint.

등에 의해서 연구되었다(Priest, 1993). 그러나 Fisher 이후의 연구는 비대칭(asymmetric) 분포나 띠 형태(girdle orientation)의 특별한 경우의 분포에 대하여 연구되어, 그 형태가 복잡하고 분포양상이 일반적인 분포와는 다르다. 그러므로 이러한 분포는 불연속면의 방향 분포가 대칭 형태가 아닌 비대칭이나 띠 형태의 분포일 경우에도 도입될 수 있겠으나, 일반적으로 대칭형태로 불연속면의 방향이 나타나는 경우 그 분포식의 간결성과 적합성 측면에서 Fisher 분포는 가장 유용한 형태라 할 수 있으며, 이 연구에서도 불연속면의 방향분포를 Fisher 분포라 가정하였다.

불연속면의 수리간극은 불연속면의 연결도 해석과 더불어 수리해석을 하는 데 가장 중요한 요인이나, 현장이나 노두에서 측정되는 틈은 자유면의 생성으로 인한 응력 이완과 발파 진동으로 인해 틈새가 벌어지고, 파쇄된 암석 찌꺼기 등으로 간극이 메워져 실제 암반 내의 틈새와는 큰 차이를 보이게 되므로, 정량적 평가가 매우 어렵다. 그로 인해, 간극은 Nordqvist et al.(1995), Kobayash and Yamashita(1990) 등에 의해서 제안된 바 있는 대수정규분포(lognormal distribution)를 따른다고 가정하는 것이 일반적이다. 이 연구에서는 기본적으로 불연속면의 간극분포를 대수정규분포라고 가정하였으며, 필요에 따라 균등분포(uniform distribution), 정규분포(normal distribution), 그리고 음지수분포(negative exponential distribution) 등으로 발생할 수 있도록 프로그램을 작성하였다.

이와 마찬가지로 불연속면의 길이분포도 조사된 절리 자료에 따라 어떠한 분포 특성도 묘사할 수 있도록 대수정규분포, 음지수분포, 균등분포, 정규분포 등으로 발생 가능하도록 프로그램을 작성하였다.

2.2 연결망 내에서의 유동해석

불연속면 연결망 내의 유동은 불연속면 교차점(node)에서 중심으로의 유동으로 가정한다(Fig. 2). 이 때, 수두는 불연속면의 중심과 불연속면 사이의 교선의 중심에서 발생하며, 하나의 불연속면 내에서의 유입량과 유출량의 합은 0이 되어야 하는 조건으로부터 연립방정식을 구성하여 수두를 계산한다. n개의 불연속면이 불연속면 j와 연결되어 있을 때, 불연속면 i와 j의 교차점에서 불연속면 j의 중심으로의 유입량을 Q_{ij} 라고 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^n Q_{ij} = 0 \tag{1}$$

이 때, 단일 불연속면의 채널에서의 유량 Q_{ij} 는 식

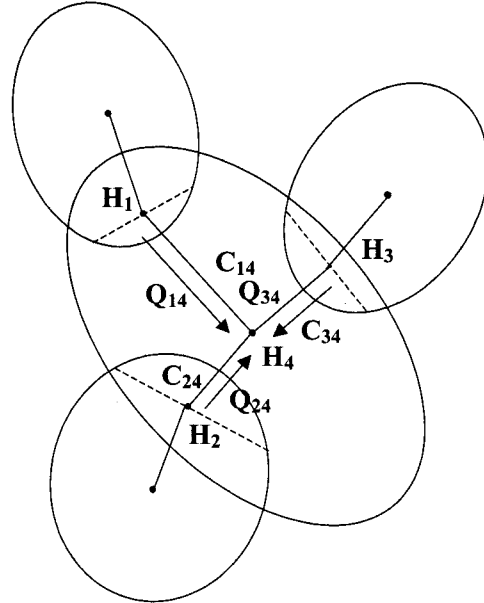


Fig. 2. A typical element in a discontinuity network consisted of 4 discontinuity planes (after Ko, 2000).

(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ij} = \frac{\lambda_{ij} g e_{h_j}^3}{12\nu L_{ij}} \Delta H = C_{ij} \Delta H \tag{2}$$

여기서, g 는 중력가속도(9.8 m/s^2), ν 는 물의 동점성계수($1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 20°C 로 가정), ΔH 는 채널 양 끝단에서의 수두차($H_j - H_i, \text{ m}$), e_{h_j} 는 불연속면 j의 수리간극(m), L_{ij} 는 채널의 길이(m), λ_{ij} 는 채널의 너비(m), 그리고 C_{ij} 는 컨덕턴스로 $\lambda_{ij} g e_{h_j}^3 / 12\nu L_{ij}$ 이다.

2.3 경계효과

불연속면의 중심분포는 불연속면의 발생 영역 내에만 존재한다. 그러나, 중심이 발생 영역 밖에 존재하는 불연속면도 실제로는 수리해석에 영향을 미친다. 이렇게 해석영역 외곽에서 발생한 불연속면을 고려하지 않아 오차가 발생하는 것을 경계효과(boundary effect)라 칭하기로 한다.

경계효과는 불연속면의 발생 영역을 해석영역보다 확대하는 것으로 해결할 수 있다. 이 때, 각 방향으로 확대할 영역의 크기를 발생한 불연속면의 최대 반지름의 크기와 같게 하면 발생한 모든 불연속면에 대하여 경계면과의 연결성을 고려할 수 있다(Fig. 3). 그러나, 이 방법은 수리해석에 영향을 미치지 않는 불필요한 불연속면을 너무 많이 발생시켜 해석시간을 크게 증가시키게 된다. 따라서, 적절한 비율만큼 불연속면 발생영역을 확

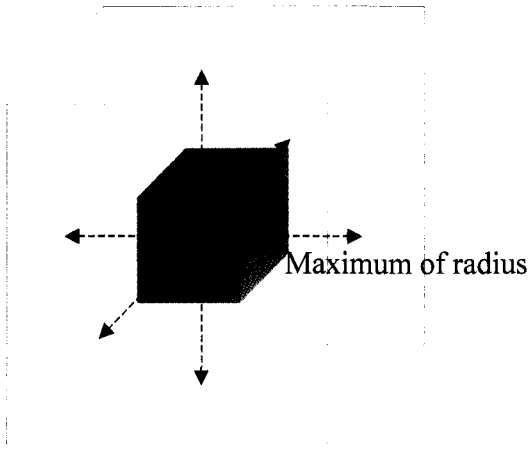


Fig. 3. Schematic diagram of a boundary effect.

대시키는 것이 필요하다.

경계효과가 없는 영역에서는 일정 체적내의 불연속면 간 교차빈도는 일정해야 한다. 그리고 경계효과가 영향을 미치는 영역에서는 이보다 적은 교차빈도가 발생한다. 따라서, 경계효과가 영향을 미치는 영역을 조사하기 위하여, 경계효과 발생영역을 xy면과 yz면에 평행한 방향으로 각각 40등분하여 40×40 개의 작은 직육면체를 발생시키고, 중심축에 인접한 네 개의 직육면체 내에 포함된 불연속면 교차점의 빈도를 계산하였다. 그리고, 네 개의 직육면체를 각각의 대각선 방향으로 이동시키며 각 직육면체 내에 포함된 교차점의 빈도를 계산하여 이를 히스토그램으로 나타내었다(Fig. 4).

Fig. 4에서 발생영역의 80%에서 100%로 해석영역의 한 변의 길이가 증가할 때, 다른 경우보다 매우 적은 교차빈도를 기록하였다. 이는 수리해석영역의 한 변의 길이가 발생영역의 그것의 80%이상이면 경계효과영역의 영향이 매우 크게 작용함을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 불연속면을 발생시키고 수리해석영역의 한 변의 길이가 발생영역의 80%가 되도록 설정하고 지하수 유동해석을 실시하였다.

3. 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동 해석 결과의 검증

불연속면 연결망을 통한 지하수 유동 해석 결과의 검증은 두 가지 방법으로 수행하였다. 먼저, 직접계산이 가능한 간단한 불연속면 연결망을 발생시킨 후, 직접 계산에 의한 결과와 프로그램을 통한 해석결과를 비교하였다. 그리고, 박병윤(2000)의 연구와 같은 입력자료

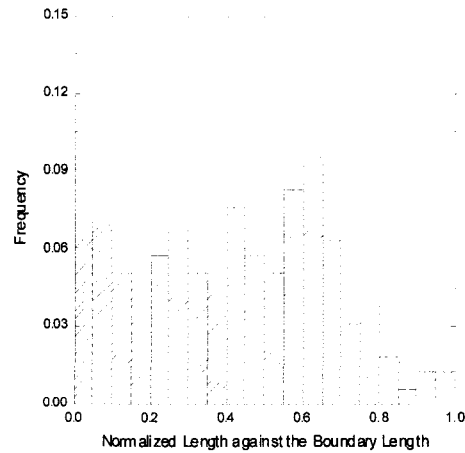


Fig. 4. Histogram of the number of nodes in each rectangular parallel pipe.

를 사용하여 계산한 등가수리전도도를 박병윤의 결과와 비교하였다.

3.1 직접계산에 의한 검증

Fig. 5의 (a), (b)와 같은 간단한 경우에 대하여 직접 계산한 결과와 프로그램의 결과를 비교하였다. 먼저, Fig. 5(a)과 같이 2개의 불연속면을 수직, 수평으로 발생시킨 후 불연속면의 중심과 교차점에서의 수두를 계산하고 이로부터 불연속면 연결망의 등가수리전도도를 계산하였다. 이 때, 경계효과는 고려하지 않았다. Fig. 5(b)에서는 경계효과를 가정한 경우에 대한 검증을 위하여 경계효과를 80%로 가정하고, 해석영역 밖에 세 번째 불연속면을 수직으로 위치시킨 후 해석을 수행하였다. 두 경우의 입력자료는 Table 1, 2와 같다. 두 경우 모두에 대하여 직접 계산한 결과와 프로그램으로 계산한 결과가 일치함을 확인하였다(Table 3, 4). 따라서, 불연속면 연결망 내에서의 지하수 유동 해석을 위해 작성한 코드가 수치적으로 오류가 없음을 알 수 있었다.

3.2 기존 문헌과의 비교에 의한 검증

박병윤(2000)은 전남 여수시 낙포동 일대에 대해 질리조사를 실시하고, 여기서 수집된 자료를 분석하여 지하수 유동 해석 프로그램인 NAPSAC을 이용하여 50×50×50 m³의 경계영역에 불연속면을 발생시켜 대상지역의 등가수리전도도를 구한 바 있다. 이에 이 연구에서는 박병윤의 입력자료로 3차원 불연속면 모델을 발생하고 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동해석을 실시하여 계산된 등가수리전도도를 박병윤의 결과와 비교하였다. 단, 이 연구에서 개발된 프로그램은 PC의 메모

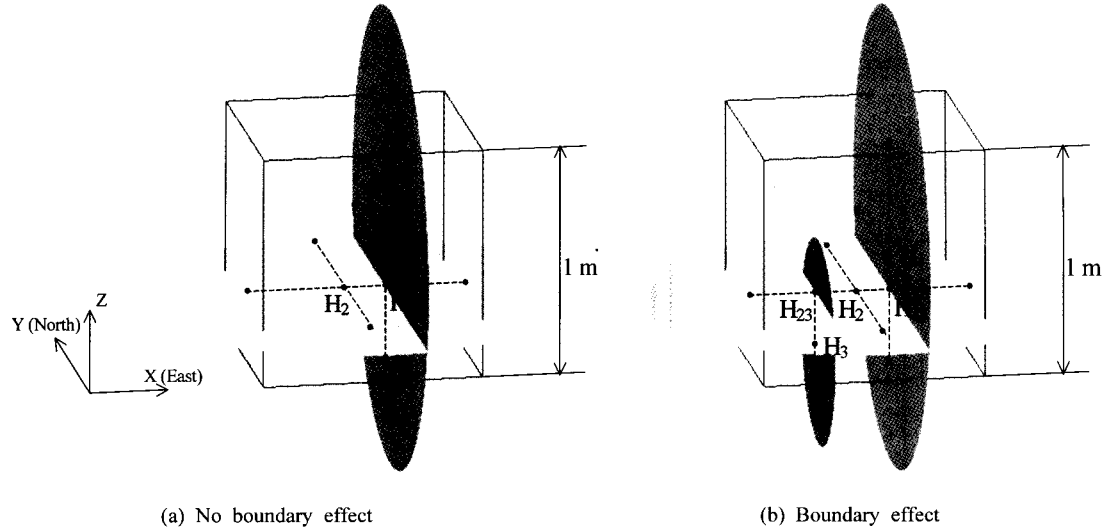


Fig. 5. Schematic diagram of two simple examples.

Table 1. Input data of 2 discontinuities when not considering the boundary effect.

	Discontinuity 1	Discontinuity 2
Normal vector	(1, 0, 0)	(0, 0, 1)
Center	(0.667, 0.5, 0.5)	(0.5, 0.5, 0.25)
Aperture	1 mm	2 mm
Diameter	2.0 m	2.0 m
Dip direction	90°	0°
Dip angle	90°	0°
Boundary	1 × 1 × 1 m ³	

Table 2. Input data of 3 discontinuities when considering the boundary effect.

	Discontinuity 1	Discontinuity 2	Discontinuity 3
Normal vector	(1, 0, 0)	(0, 0, 1)	(1, 0, 0)
Center	(0.667, 0.5, 0.5)	(0.5, 0.5, 0.25)	(0.333, 0.5, 0.5)
Aperture	1 mm	2 mm	3 mm
Diameter	2.0 m	2.0 m	0.9 m
Dip direction	90°	0°	90°
Dip angle	90°	0°	90°
Boundary	1 × 1 × 1 m ³		

Table 3. The heads at centers and a node calculated by the program(I) and the calculation(II) when not considering the boundary effect. (unit: m).

Direction of head loss	H ₁ (I / II)	H ₂ (I / II)	H ₁₂ (I / II)
x - axis	1.363 / 1.363	1.496 / 1.500	1.481 / 1.481
y - axis	1.500 / 1.500	1.500 / 1.500	1.500 / 1.500
z - axis	1.544 / 1.544	1.744 / 1.744	1.722 / 1.722

Table 4. The heads at centers and nodes calculated by the program(I) and the calculation(II) when considering the boundary effect. (unit: m).

Direction of head loss	H ₁ (I / II)	H ₂ (I / II)	H ₃ (I / II)	H ₁₂ (I / II)	H ₂₃ (I / II)
x - axis	1.335 / 1.335	1.529 / 1.529	0.000 / 0.000	1.508 / 1.508	1.668 / 1.668
y - axis	1.500 / 1.500	1.500 / 1.500	1.500 / 1.500	1.500 / 1.500	1.500 / 1.500
z - axis	1.561 / 1.561	1.836 / 1.836	0.000 / 0.000	1.806 / 1.806	1.963 / 1.963

리 한계로 박병윤의 입력자료로 사용된 체적밀도에서는 최대 20×20×20 m³의 영역까지 불연속면을 발생시켜 경계효과를 80%로 고려한 16×16×16 m³까지의 해

석을 수행할 수 있었다. 입력자료는 Table 5와 같다.

Fig. 6은 이 연구에서 작성한 프로그램 코드에 의해 계산된 등가수리전도도와 박병윤의 결과를 비교한 것

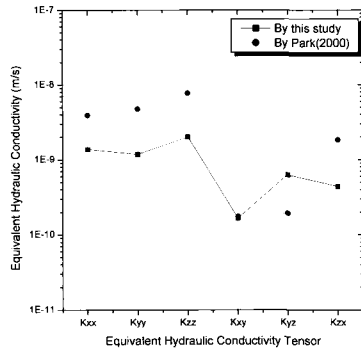


Fig. 6. Comparison of equivalent hydraulic conductivity tensors calculated by this study and by Park(2000).

으로써, 두 결과는 같은 지수를 가지며 변화양상도 유사한 경향을 보였다. 이 때, 박병윤의 결과가 큰 경향을 보였는데 이는 해석영역의 크기 차이에서 발생하는 것으로 보인다.

그러나, 다음에서 설명할 대표요소체적을 고려하여 해석영역을 확대한다면, 두 결과의 차이는 더욱 줄어들 것으로 판단된다. 이는 대표요소체적 이하의 체적에서는 해석영역의 체적이 증가함에 따라서 등가수리전도도가 증가하는 경향을 보이기 때문이다.

따라서, 이 연구에서 개발된 프로그램이 등가수리전도도를 비교적 정확하게 계산하는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 프로그램의 타당성을 정확하게 검증하기 위해서는 동일모델에 대한 기존 상용프로그램의 해석결과와의 비교가 필요하다고 판단되며 향후 연구에서 이 부분을 보완할 예정이다.

Table 5. Input data of each discontinuity set.

Item	Set 1	Set 2	Set 3
Dip Direction (°)	158.6	251.4	67.8
Dip Angle (°)	89.3	87.2	15.6
Fisher Dispersion K	9.95	7.46	7.17
Mean Length (m)	2.74	2.91	2.45
L_{max} (m)	20.0	30.0	10.5
L_{min} (m)	1.0	1.0	1.0
Fracture Density (EA/m ²)	0.1260	0.0476	0.0226
Mean Aperture (mm)	2.7751	3.0066	3.9047
STD Aperture (mm)	3.4942	3.4895	4.5659

4. 불연속면 연결망의 등가수리전도도에 영향을 미치는 인자

4.1 대표요소체적

대표요소체적(REV: Representative Elemental Volume)이란 체적을 증가시키면서 등가수리전도도를 계산할 때 더 이상의 등가수리전도도의 변화가 없어지기 시작하는 한계체적을 의미한다. 그러므로 REV 이하의 체적에서 구한 등가수리전도도는 해석대상지역을 넓히면 값의 차이가 발생할 수 때문에 신뢰할 만한 것이 되지 못한다. 따라서 현장적용을 위해서는 REV이상의 체적에서 등가수리전도도를 구해야한다. 대표요소체적의 해석방법은 불연속면의 방향성, 길이분포, 체적밀도 등의 입력자료를 일정하게 하고 해석 대상지역의 체적을 점진적으로 확대하면서 등가수리전도도의 변화를 살펴보면 된다.

이 연구에서는 Table 5와 같이 입력자료를 일정하게 하고, 경계효과를 고려한 해석영역을 불연속면 발생영

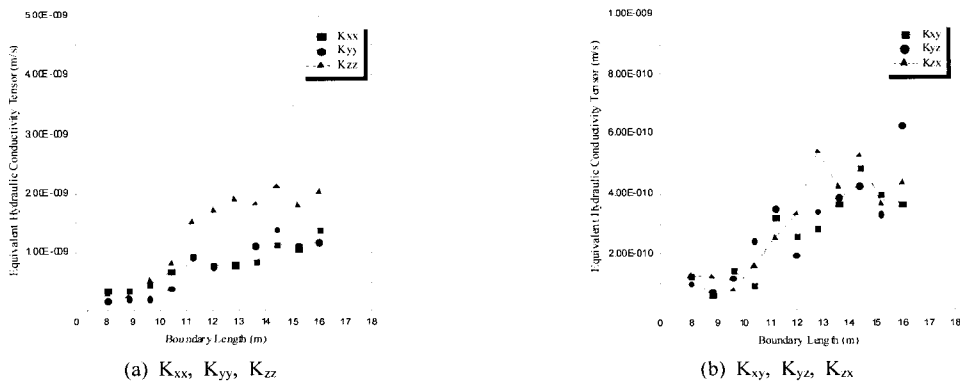


Fig. 7. Influence of volume on equivalent hydraulic conductivity tensors.

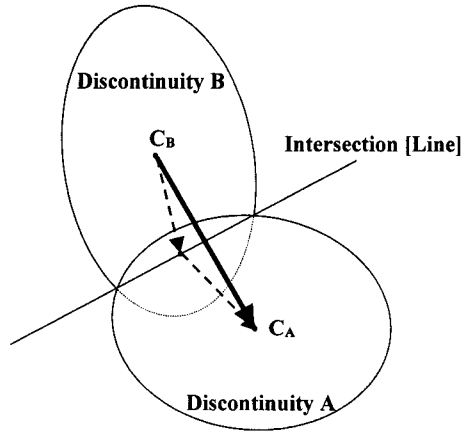


Fig. 8. The groundwater flow from the one center to the other.

역의 80%로 하여, 수리 해석을 실시하였다. 이 때, 불연속면의 발생영역의 한 변의 길이는 10 m에서 20 m까지 1 m씩 증가시켰다. 따라서 해석영역의 한 변의 길이는 8 m부터 16 m까지 0.8 m씩 증가한다.

Fig. 7은 해석영역의 크기 증가에 따른 등가수리전도도의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 해석영역의 크기가 증가함에 따라 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , K_{xy} , K_{yz} , K_{zx} 의 값이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 컴퓨터의 메모리 한계로 인한 수리 해석 영역의 최대값인 16 m 이후의 등가수리전도도 변화를 살펴보는 것이 필요하였다. 이 연구에서 컴퓨터의 메모리 한계에 빠르게 도달하는 가장 큰 이유는 해석영역의 체적이 증가함에 따라 불연속면과 불연속면 사이의 교차점의 수가 급속하게 증가하기 때문이다. 따라서, 교차점을 고려하지 않고 Fig. 8과 같이 불연속면의 중심과 중심 사이의 직접

유동을 가정하면, 교차점을 고려해서 해석한 경우와 비교하였을 때, 비교적 넓은 범위까지 해석이 가능하다. 그러나 이러한 방법의 해석은 이 연구에서 기본적으로 가정한 불연속면의 중심과 교차점 사이의 채널 유동을 고려하지 않을 뿐만 아니라, 중심사이의 유동을 가정하므로 불연속면에 따른 간극값을 일정하게 사용해야하는 문제점이 있다. 그러므로, 이 연구에는 대표요소체적을 파악하기 위한 목적으로만, 중심 사이의 유동을 가정한 해석을 실시하고 그 밖의 해석에는 중심과 교차점 사이의 채널 유동을 가정한 해석을 실시하였다. 중심사이 유동을 가정하고 경계효과에 의한 해석영역 비율을 불연속면 발생영역의 80%로 하였을 경우, 최대 수리 해석 영역은 28 m이었다.

Fig. 9는 불연속면의 중심과 교차점 사이의 유동을 가정한 경우와 불연속면의 중심사이의 유동을 가정한 경우를 함께 나타낸 그래프이다. 불연속면의 중심과 중심사이의 유동을 가정한 경우의 등가수리전도도는 불연속면의 중심과 교차점 사이의 유동을 가정한 경우에 비하여, 약간 크게 계산되었지만 증가하는 경향은 비교적 일치하였다. 고태영(2000)의 연구에 따르면, 대상암반의 간극분포가 일정간극 분포를 따를 때에 대수정규분포를 따르는 경우에 비하여 등가수리전도도가 크게 나오므로 위의 결과는 타당하다고 볼 수 있다. 따라서 불연속면의 중심과 교차점 사이의 유동을 가정하는 경우도 수리 해석 영역이 28 m까지 증가할 경우까지도 계속 증가하는 경향을 보일 것으로 예측할 수 있다. 그러나 28 m 까지도 등가수리전도도가 계속 증가하는 경향을 보이므로, 대상 지역의 대표요소체적을 구할 수는 없었으며, 단지 $25 \times 25 \times 25 \text{ m}^3$ 이상에서 대표요소체적이 결정될 것으로 추정할 수 있었다.

대표요소체적보다 작은 체적에서 해석할 경우, 대표

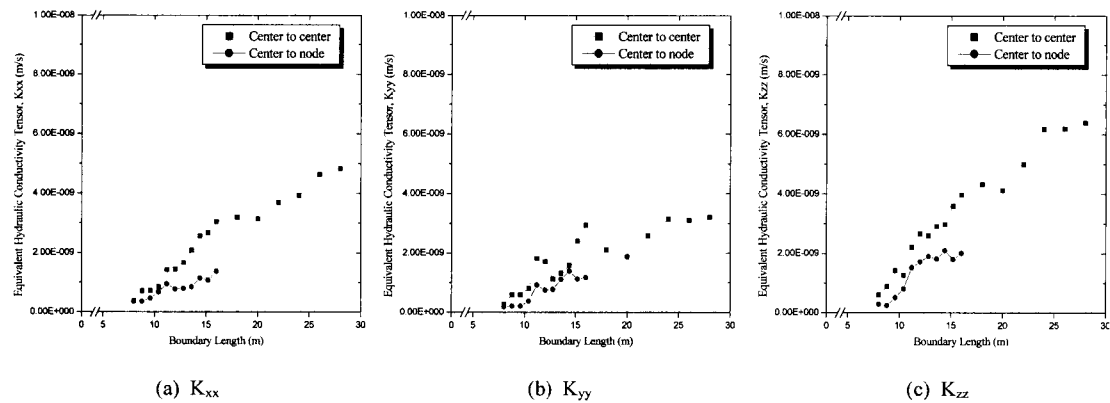


Fig. 9. Influence of volume on equivalent hydraulic conductivity tensors, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} .

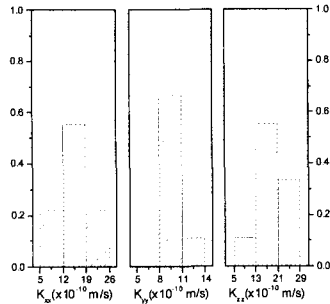


Fig. 10. Histogram of equivalent hydraulic conductivity tensors, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} .

요소체적 이후의 값과는 상당한 차이를 보일 수 있으며, 불연속면 기하학적 특성의 분포함수생성을 위한 난수 발생의 초기치인 시드번호(seed number)에 따라 등가수리전도도가 크게 변할 수도 있다. 이 연구에서는 대부분의 수리 해석이 대표요소체적보다 작은 범위인 $16 \times 16 \times 16 \text{ m}^3$ 의 영역에서 이루어지므로 해당 영역의 값이 타당한 지 여부를 확인해야한다. 이를 확인하기 위해 $16 \times 16 \times 16 \text{ m}^3$ 의 수리 해석 영역에 대하여 시드번호에 변화를 가하며 해석을 수행하였다.

Fig. 10에서와 같이 등가수리전도도는 시드번호와 관계없이 평균값을 중심으로 정규분포의 형태를 나타냈다. 따라서, 대표요소체적 이후의 값에 비해 상대적으로 작은 값을 가질 뿐, 시드번호에 따른 값의 차이는 매우 작으므로 $16 \times 16 \times 16 \text{ m}^3$ 의 영역의 수리 해석을 통해 입력변수 등에 따른 변화에 대한 고찰도 의미가 있는 것으로 판단하였다.

4.2 불연속면의 방향성, 길이 및 간극에 의한 영향

불연속면의 길이와 간극변화에 따라 등가수리전도도

가 변화하는 양상을 살펴보기 위해, Table 5의 입력자료를 기준으로 간극의 평균값을 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00배씩 단계적으로 증가시켰으며, 길이의 평균값을 0.50, 0.75, 1.00, 1.20배까지 단계적으로 증가시켰다. 해석 결과 불연속면의 간극과 길이가 각각 증가함에 따라 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 증가하는 경향을 보였다(Fig. 11). 그리고, 길이의 증가에 따른 등가수리전도도의 변화량은 최대 10^4 배 이상의 차이를 보이는데 비해, 간극의 증가에 따른 변화량은 최대 10^3 배의 차이를 보이는 것을 볼 때, 불연속면의 길이가 간극보다 등가수리전도도에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

두 번째로, 불연속면의 방향성에 대한 영향을 알아보기 위해, 입력자료에서 60% 이상을 차지하는 불연속면군 1의 경사각을 89.3° , 79.3° , 69.3° , 59.3° , 49.3° , 39.3° , 29.3° , 19.3° , 9.3° , 0° 까지 변화시켜가면서 등가수리전도도의 변화를 살펴보았다. 그 결과, 불연속면군 1의 경사각이 줄어들어 따라 등가수리전도도 K_{zz} 는 점차 감소하는 경향을 보였으며, K_{xx} , K_{yy} 는 점차 증가하는 경향을 보였다(Fig. 12). 또, dip angle 감소에 따른 등가수리전도도의 변화는 최대-최소 비율이 4.0을 넘지 않아서, 불연속면의 방향에 의한 영향이 길이나 간극의 영향보다 작음을 알 수 있었다.

4.3 등가수리전도도에 영향을 주지 않는 작은 간극을 갖는 불연속면의 제거

간극이 작은 불연속면이 지하수유동에 미치는 영향을 알아보기 위해 간극이 작은 불연속면을 단계적으로 제거하면서 등가수리전도도의 변화를 살펴보았다. 이 때, 불연속면의 발생영역은 $20 \times 20 \times 20 \text{ m}^3$ 로 하였으며, 경제효과는 80%로 하여 수리해석을 실시하였다. 그리고, 간극의 제거는 평균값을 기준으로 10%씩 증가하면서

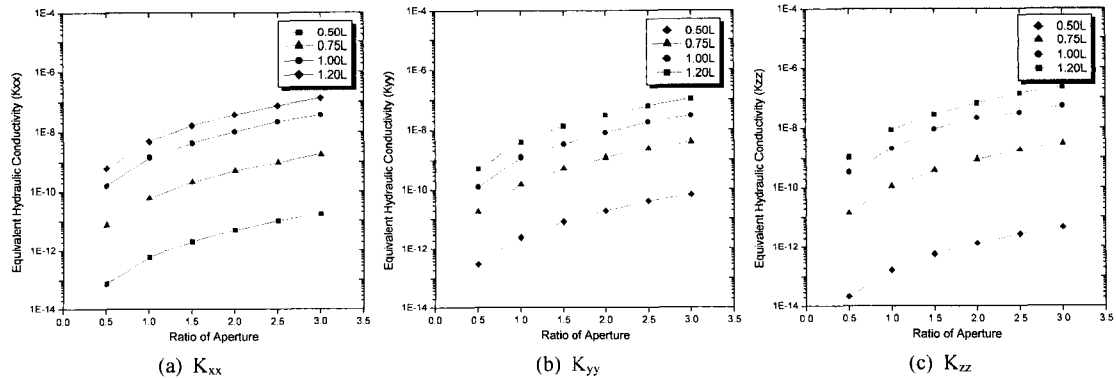


Fig. 11. Influence of length and aperture of discontinuities on equivalent hydraulic conductivity tensors, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} .

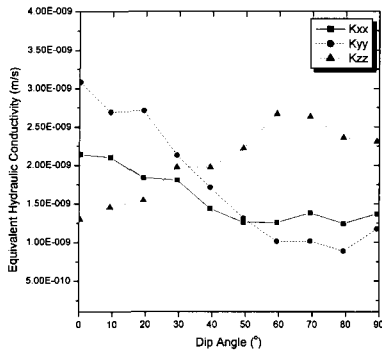


Fig. 12. Influence of dip angle on equivalent hydraulic conductivity tensors, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} .

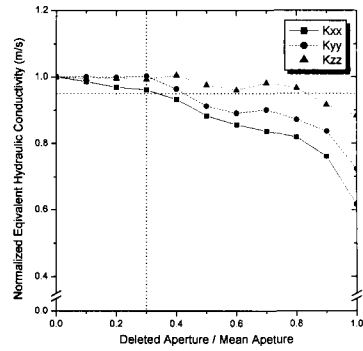


Fig. 13. Influence of eliminating discontinuities with small aperture on normalized equivalent hydraulic conductivity tensors, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} .

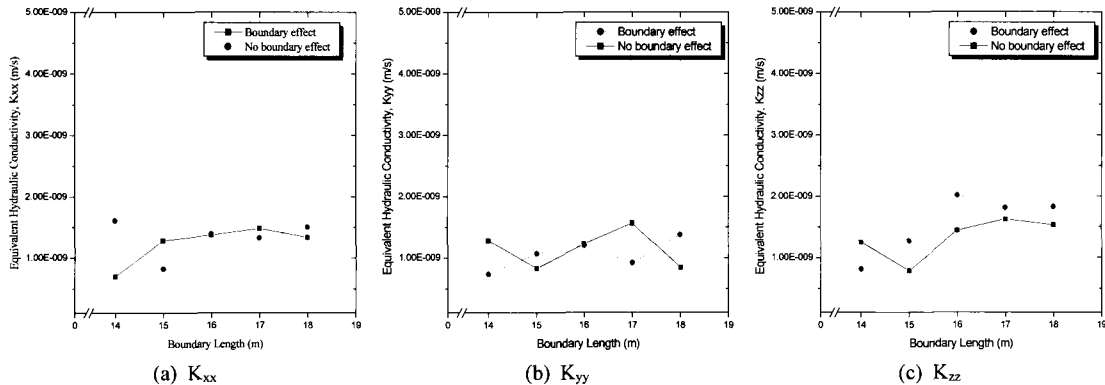


Fig. 14. Influence of boundary effect on equivalent hydraulic conductivity tensors, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} .

평균값까지 수행하였다.

Fig. 13에서와 같이 평균의 30% 이하에 해당하는 간극을 갖는 불연속면을 제거하고 지하수 유동해석을 실시한 결과는 제거하지 않은 경우에 대하여 95% 이상의 비율을 보였다. 그리고, 30% 이후로는 등가수리전도도가 점차 감소하는 경향을 보인다. K_{zz} 는 K_{xx} , K_{yy} 에 비해 상대적으로 감소율이 작는데, 이는 발생한 대부분의 불연속면이 수직에 가까운 불연속면이므로 불연속면 제거에 상대적으로 적은 영향을 받았기 때문으로 보인다. 또한, 1570개의 불연속면 중에서 평균의 80% 이하에 해당하는 926개의 불연속면이 제거된 뒤에도 등가수리전도도가 제거하지 않은 경우에 대해 약 80%의 값을 갖는 것을 통해, 간극이 큰 불연속면을 통해 대부분의 지하수 유동이 이루어짐을 알 수 있었다.

4.4 경계효과

경계효과의 영향을 알아보기 위해, 수리 해석 영역을 14 m부터 1 m씩 증가시켜가며 경계효과를 고려한 경

우와 그렇지 않은 경우에 대해 각각 수리 해석을 실시하였다. 그러나 예상과는 달리 경계효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 등가수리전도도 값이 거의 비슷함을 알 수 있었다(Fig. 14). 이는 대상지역의 간극의 평균값이 2.89 mm로 불연속면의 투수성이 상대적으로 커서 투수성이 큰 일부의 불연속면이 등가수리전도도에 대부분의 영향을 미치므로 이로 인해 경계효과 고려 시 추가되는 불연속면의 영향이 상대적으로 작기 때문인 것으로 보인다.

4.5 단층대 형성에 의한 영향

지하수 유동에 있어 단층대의 영향은 매우 크다. 단층대의 존재여부에 따라 등가수리전도도는 매우 크게 달라질 수 있을 것이다. 따라서, 이 장에서는 yz 평면, xy 평면과 평행한 단층(Fig. 15)을 각각 발생시켜, 각 단층이 형성되었을 때의 등가수리전도도 변화를 살펴보고자 하였다. 이 때, 단층의 간극은 불연속면의 간극의 평균값이 2.89 mm의 1배, 2배, 3배, 4배, 5배, 7.5배,

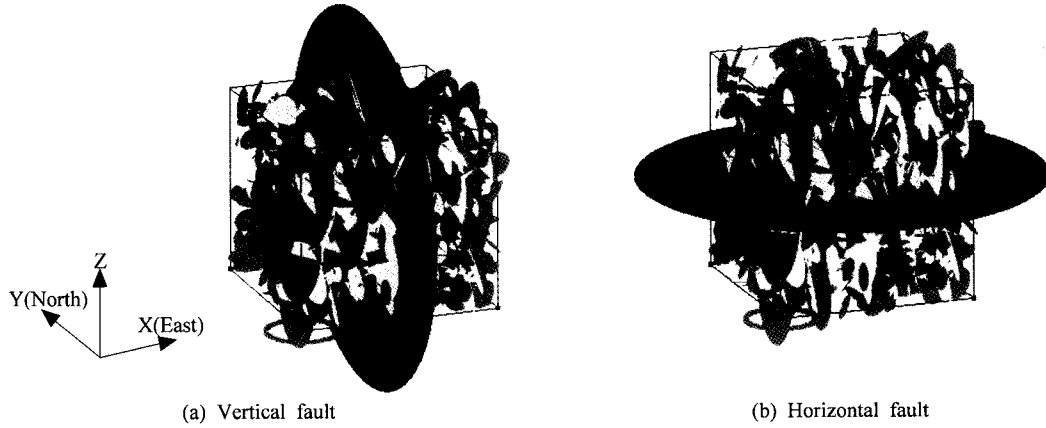
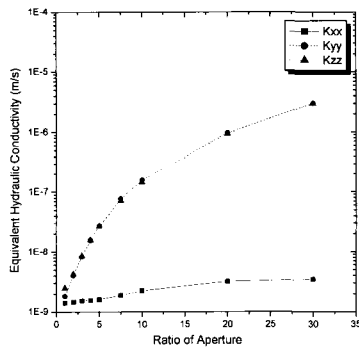
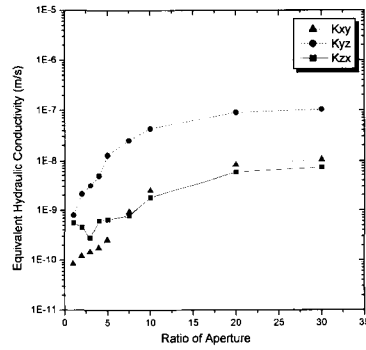


Fig. 15. Schematic diagram of vertical and horizontal faults.

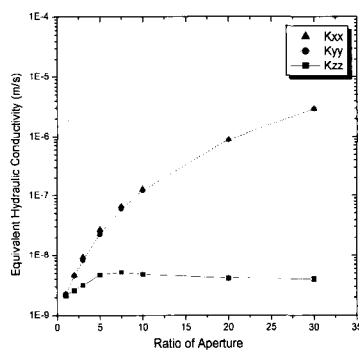


(a) K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}

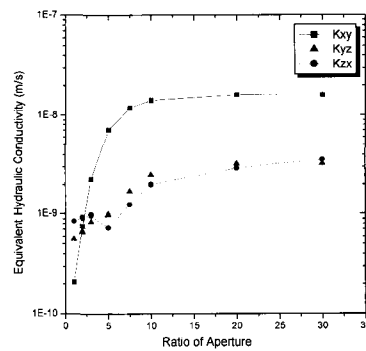


(b) K_{xy} , K_{yz} , K_{zx}

Fig. 16. Influence of a vertical fault on equivalent hydraulic conductivity tensors, (a) K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , (b) K_{xy} , K_{yz} , K_{zx} .



(a) K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}



(b) K_{xy} , K_{yz} , K_{zx}

Fig. 17. Influence of a horizontal fault on equivalent hydraulic conductivity tensors, (a) K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , (b) K_{xy} , K_{yz} , K_{zx} .

10배, 20배, 30배까지 증가시켜가며 간극에 따른 변화를 살펴보았다.

Fig. 16은 x축과 평행한 방향의 법선벡터를 갖는 단층면이 형성되었을 경우 단층면의 간극을 변화시켰을

때의 등가수리전도도 변화를 나타내는 그래프이다. 단층면의 간극비가 커짐에 따라 단층면과 평행한 방향인 y축 방향과 z축 방향의 등가수리전도도인 K_{yy} , K_{zz} 는 증가하였으며, 단층면과 수직인 x축 방향의 등가수리전

도도 K_{xx} 도 증가하는 방향을 보였으나 그 변화량은 다른 두 값에 비해 매우 작았다. K_{yy} 와 K_{zz} 가 빠르게 증가하는 이유는 단층면이 y 축 방향과 z 축 방향에 평행하여 단층면의 간극이 커짐에 따라, 단층면으로의 유동이 빠르게 증가하기 때문이다. K_{xx} 가 증가하는 이유는 단층면과 연결된 수평방향의 불연속면에서의 유동이 증가하기 때문이며, 단층면과 연결된 수평방향의 불연속면은 제한되어 있고 간극도 일정하므로 그 증가량은 다른 두 값에 비해 매우 작은 것으로 볼 수 있다. 또한, K_{yz} 의 증가량이 K_{xy} 와 K_{zx} 에 비해 큰 것도 같은 이유로 설명할 수 있다.

이와 같은 이유로 수평방향의 단층면이 형성된 경우의 변화양상을 설명할 수 있다. 수평방향의 단층면이 형성된 경우 단층면과 평행한 방향의 등가수리전도도 K_{xx} 와 K_{yy} 는 빠르게 증가하는 경향을 보였으며, 단층면과 수직인 방향의 등가수리전도도 K_{zz} 도 증가하는 경향을 보이지만 변화량은 다른 두 값에 비해 매우 작았다. 또한, K_{xy} 의 증가량이 K_{yz} 와 K_{zx} 에 비해 상대적으로 큰 경향을 보였다(Fig. 17).

5. 결 론

암반은 수많은 단층, 균열 절리 등의 불연속면을 갖고 있으며, 불연속면은 역학적으로 매우 취약하고, 수리적으로는 지하수의 유동 통로가 되므로 암반의 역학적·수리적 성질을 좌우하는 중요한 요소가 된다. 이 연구에서는 불연속면의 방향성, 중심분포, 길이분포, 간극분포를 바탕으로 하여, 3차원 불연속면 모델을 발생시키고, 3차원 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동해석을 실시하였다. 또한, 불연속면의 길이 및 간극, 방향성 등 입력자료에 의한 영향을 살펴보고, 대표요소체적을 구하려 시도하였으며, 그 밖에 단층대에 의한 영향, 경계 효과에 의한 영향을 알아보았다. 또, 수리 해석에 불필요한 간극의 범위를 제시하였다. 그리고 이 연구에서 얻어진 결론들이 주어진 불연속면군이 아닌 일반적인 결론이 되기 위해서는 보다 많은 현장자료에 대한 추가 해석이 필요할 것으로 판단된다. 이 연구를 통해 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1) 3차원 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동 해석 및 가시화 코드를 작성하여, 주어진 경계수두 조건에서 각 불연속면 중심과 불연속면간의 교차점에서의 수두를 계산하고, 이를 통해 암반의 등가수리전도도를 계산하였다. 또, 직접 계산에 의한 방법과 기존 문헌과의 비교를 통해 프로그램을 검증하였다.

- 2) 작성한 코드를 통해 대표요소체적(REV: Representative element volume)은 $25 \times 25 \times 25 \text{ m}^3$ 이상에서 결정될 것으로 추정하였다.
- 3) 수리 해석에 불필요한 간극을 갖는 불연속면을 제거한 결과, 대상지역의 평균 간극인 2.89 mm의 30%에 해당하는 0.867 mm이하의 간극을 갖는 불연속면을 제거해도 등가수리전도도에는 거의 차이가 없는 것으로 확인되었다.
- 4) 불연속면의 방향, 길이 및 간극에 의한 영향을 분석한 결과, 길이가 등가수리전도도에 미치는 영향이 가장 크며, 그 다음으로는 간극, 방향의 순서인 것을 확인하였다.
- 5) 불연속면에 비해 상대적으로 큰 간극을 갖는 단층면이 존재할 경우, 발생시킨 단층면에 평행한 방향으로의 등가수리전도도는 매우 빠르게 증가하였으며 단층면과 수직하는 방향의 등가수리전도도 또한 증가하는 경향을 보였지만 그 크기는 평행한 방향의 두 값에 비해 매우 작았다.
- 6) 3차원 불연속면 연결망 모델은 컴퓨터 메모리의 한계로 넓은 지역을 대상으로 하는 모델링이 어려운 단점이 있으며, 이 연구에서 개발된 프로그램은 최대 $18 \times 18 \times 18 \text{ m}^3$ 의 체적에 대한 등가수리전도도를 구할 수 있었다. 그러나, 불균질한(inhomogeneous) 암반이나 불연속면이 군집(clustering)하여 분포하는 암반의 국부적인 지하수 유동특성에 효율적으로 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이와 같은 한계는 컴퓨터 하드웨어의 빠른 발전과 보다 효율적인 알고리즘 및 프로그램 코드 작성을 통해 극복할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00058-0(2002))지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 고태영, 3차원 절리망에서의 지하수 유동에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문, 2000.
2. 박병윤, 화산암질 암반에서의 공동 굴착에 따른 지하수체계 변화에 대한 3차원 수치모델 해석, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 2000.
3. 송명규, 불연속 암반의 수리전도 특성과 암석 절리에서의 유체유동에 관한 수치해석적 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문, 1993.
4. 장근무, 3차원 균열연결망 모델에서의 유효투수계수 평가

및 터널굴착 지하수 유동해석에 대한 수치실험, 터널과 지하공간, 8, 275-286, 1998.

5. 장현익, 통계적 접근법에 의한 불연속 암반의 지하수 유동 해석, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1996.
6. 최재영, 원판형 절리 모형에 의한 암반의 3차원 불연속 연결망 모사에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 2000.
7. Baecher, H.B., Einstein, H.H., and Lanney, N.A., Statistical description of rock properties and sampling, Proceedings of the 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1-8, 1977.
8. Billaux, D., Chiles, J.P., Hestir, K., and Long, J.C.S., Three dimensional statistical modelling of a fractured rock mass - An example from the Fanay-Augeres Mine, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr. 26, 281-299, 1989.
9. Kobayashi, A., and Yamashita, R., Numerical studies of fluid flow through channels on fracture plane, Proceedings International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 613-620, 1990.
10. Kulatilake, P.H.S.W., Wathugala, D.N., and Stephansson, O., Joint network modelling with a validation exercise in Stripa Mine, Sweden, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30.5, 503-526, 1993.
11. Long, J.C., Remer, J.S., Wilson, C.R., and Witherspoon, P.A., Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resources Research, 18.3, 645-658, 1982.
12. Neuman, S.P., Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternative to the REV and fracture network concept, Proc. of the 28th US Symp. on Rock Mechanics, 533-561, 1987.
13. Nordqvist, A.W., Tsang, Y.W., Tsang, C.F., Dverstorp, B., and Andersson, J., A variable aperture fracture network model for flow and transport in fractured rock at different scales, Fractured and Jointed Rock Masses, 1995.
14. Priest, S.D., Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, 1993.
15. Villaescusa, E. and Brown, E.T., Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements, Rock Mechanics and Rock Engineering, 25, 67-87, 1992.

방상혁



2000년 서울대학교 공과대학 지구환경 시스템공학부 공학사
2002년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사

Tel: 02-880-7232
E-mail: bsh2218@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부

전석원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1991년 미국 캘리포니아 주립대학 공학 석사

1991년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부

최종근



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1995년 미국 Texas A&M University 공학박사

Tel: 02-880-8081
E-mail: jchoe@geofluid.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부