

3차원 균열연결망 모델에서의 유효투수계수 평가 및 터널굴착 지하수 유동해석에 대한 수치실험

장 근 무¹⁾

Numerical Experiments on the Evaluation of Effective Permeability and Tunnel Excavation in the Three Dimensional Fracture Network Model

Keun-Moo Chang

ABSTRACT The effective permeability and the representative element volume(REV) of fracture network model were evaluated based on the parameters such as permeability tensor, principal permeability and the direction of principal permeability. The effective permeability ranges between the harmonic mean and the arithmetic mean of the local permeabilities of subdivided blocks. From the numerical experiments, which were for investigating the influence of model volume on the variation of flux for the cubic models, it was found that the variation of flux became reduced as the model volume approached REV. The variation of groundwater flux into the tunnel in the fracture network model was mainly dependent on the ratio of the tunnel length to model size rather than REV. And it was found that groundwater flux into the tunnel was not completely consistent between the fracture network model and the equivalent porous media model, especially when the ratio of the tunnel length to model size is small.

Key words : fracture network model, equivalent porous model, groundwater influx, representative element volume, effective permeability

초 록 균열연결망 모델에서의 투수계수 텐서, 주 투수계수 그리고 주 투수계수 방향 등에 대한 인자에 근거해서 유효 투수계수와 대표요소체적을 구하였다. 전체블록에 대한 소블록의 투수계수의 계산을 통해서 유효투수계수는 조화평균과 산술평균 사이의 범위를 알 수 있었다. 정육면체 모델에서 체적의 증가에 따른 유량의 변화계산에 대한 수치실험으로부터 유량의 변화는 모델의 체적이 대표요소체적에 접근함에 따라 감소함을 보여 주었다. 터널로의 지하수 유입량은 대표요소체적 개념보다는 터널길이대 모델크기의 비에 더 큰 영향을 받는다고 볼 수 있다. 그리고 균열연결망 모델과 등가다공성 모델에서의 지하수 유입량은 정확히 일치하지 않았으며 특히 모델크기에 대한 터널길이가 작을수록 그 차이가 크게 발생하였다.

핵심어 : 균열연결망 모델, 등가다공성 모델, 지하수 유입량, 터널유입량, 대표요소체적, 유효투수계수

1. 서 론

현재 우리나라의 중저준위 방사성폐기물의 처분개념은 천층처분과 동굴처분방식이 모두 고려되고 있으며 처분후부지의 특성을 고려하여 가장 적절한 처분방식이 결정될 예정이다. 동굴처분방식의 적절한 후보 암반으로는 투수성이 낮은 결정질 암반이 유력하다. 이러한 결정질 암반에서의 지하수 흐름은 암석매질의 낮은 투수성으로 인해서 균열을 통한 흐름이라고 할 수 있으며 이미 잘 알려진 바와 같이 균열연결망을 통한

지하수 유동해석은 결정질 암반에서의 지하수 흐름을 보다 사실적으로 모사 한다는 점에서 방사성폐기물 처분 분야에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.^{1,3)}

균열연결망 모델은 암반의 수리특성에 영향을 미치는 균열의 기하학적 특성과 수리적 특성을 입력자료로 하므로 이에 대한 자료의 정확성만 확보된다면 해석대상 암반의 대표요소체적의 정의와 이에 상응하는 유효투수

1) 정회원, 한국전력 원자력환경기술원 부지평가팀
원고 접수일 : 1998년 11월 1일
원고 심사 완료일 : 1998년 12월 1일

계수를 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 이 모델은 균열의 수리적 기하학적 특성을 통계적으로 구현함으로써 단일 투수계수 텐서를 입력치로 하는 등가다공성 해석의 결정론적 결과에 비교하여 보다 유연성 있는 결과를 제시할 수 있다. 그러므로 균열연결망 모델은 현장 수리시험이나 터널굴착으로 인한 지하수 유입량 등의 예측 및 결과분석에 유리한 점이 있다.

그러나 이 모델의 단점으로서 수 km 이상의 광역 지하수 유동 해석의 경우에는 균열 수로 인한 컴퓨터 메모리의 한계가 있으며 지열이나 방사성폐기물의 발열량을 고려해야 하는 커플링 모델에서는 등가다공성 모델이 수치적으로 유리하다.⁴⁾ 따라서 두 모델 중 특정모델이 항상 비교 우위에 있다고 단정하기 힘들며 해석목적이나 암반의 수리특성에 따라서 적절한 모델 선택이 이루어져야 하며 이에 앞서서 각 모델의 특징을 분석 비교해야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 기존의 데이터⁵⁾를 이용하여 3차원 균열연결망 모델을 구성하고 균열연결망 모델의 대표요소체적과 이에 상응하는 투수계수 텐서를 계산하고 수치실험을 통해서 대표요소체적하에서의 지하수 유동해석과 그 이하 체적규모에서의 해석과의 차이점을 분석하였다. 또한 균열연결망 모델을 64개의 소블록으로 등분할하고 각각 이 소블록의 투수계수를 계산하여 투수계수의 분포함수를 분석하였으며, 소블록의 투수계수의 산술, 기하 그리고 조화 평균을 구하여 등가투수계수와 비교하였다. 그리고 본 연구에서는 균열연결망 모델에서의 터널굴착 수치실험을 수행하였으며 이와 동일한 경계조건 및 해석조건하에서 균열연결망 모델을 통해 구해진 투수계수 텐서를 입력치로 하는 등가다공성 모델에서의 터널굴착 지하수 유동 해석결과와 상호 비교하였다. 이를 통해서 균열연결망 모델에서의 터널굴착 지하수 유동해석에서 고려되어야 할 점과 등가다공성 모델에서의 해석결과와의 차이점의 원인에 대한 분석을 수행하였다. 균열연결망 해석과 등가다공성 모델의 해석은 유한요소 프로그램인 Napsac⁶⁾과 Nammu⁷⁾를 이용하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 균열연결망 모델에서의 Steady-State 지하수 유동

지하수 흐름은 균열면을 통해서만 발생하며, 비압축

성이라 가정하면 아래의 질량보존법칙의 적용이 가능하다.

$$\nabla \cdot q = 0 \quad (1)$$

q 는 균열면을 통한 유량이다. 균열간극을 지닌 두 개의 평행평판을 통한 laminar viscous 유체흐름에 대한 유량 q 는 압력차에 선형적으로 비례하며 (2)식으로 정의된다.

$$q = -\frac{t^3}{12\mu} \nabla P \quad (2)$$

여기서, t 는 유효수리간극, μ 는 점성도, P 는 동적압력 (dynamic pressure, P)으로써 압력 P 는, $P = P^T - \rho g z$ 로 정의되며 P^T 는 전체압력, ρ 는 밀도, z 는 기준면에서의 수직 높이이다.

유량은 압력차에 선형적으로 비례하며 갤러킨 정식화에 의해 질량보존식은 아래의 식으로 표현된다.

$$\sum_j \hat{T} \int_{\Omega} \Psi_j \nabla^2 \Psi_j P_j = 0 \quad (3)$$

Ψ_j 는 기저함수이며, \hat{T} 는 투수량계수(Transmissivity)와 관련된 상수로써 $T = \rho g \hat{T}$ 이며, ρ 는 밀도이며 g 는 중력가속도이다.

F_{ij} 를 아래의 식으로 정의하면,

$$F_{ij} = \hat{T} \int_{\Omega} \Psi_i \nabla^2 \Psi_j \quad (4)$$

F_{ij} 는 절점 j 에서 단위압력차와 나머지 절점에서 압력이 영일 때의 유량이며 절점 i 를 포함하는 교차선을 따라 절점 i 에 대한 기저함수에 대해 적분한 값이다. 그리고 균열면에서의 질량 보존에 따라서 해석영역의 다른 지점에서 $\nabla^2 \Psi_i$ 는 영이다.

F_{ij} 에 대한 하나의 균열면, k 로부터 유량, $f_j^{(k)}$ 기여는 아래식으로 표현할 수 있다.

$$\sum_{\text{fractures } k} \sum_{\text{node } j \text{ on fracture } k} f_j^{(k)} P_j = 0 \quad (5)$$

하나의 균열면에서의 $f_j^{(k)}$ 의 계산은 유한요소법에 의해 계산되며 경계조건은 균열면의 경계는 no-flux 조건이며 균열면에서의 교차선에 대한 압력조건은 $P_i = \text{Constant}$ 이다.

각각의 균열면은 사용자의 지정에 따라 Fig. 1의 일정 수의 선형 삼각 유한요소로 나뉘어지며 실제 균열교차선은 삼각요소의 모서리를 따라서 근사화된다. (3)식

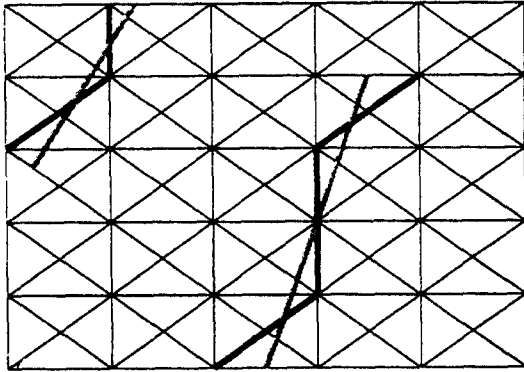


Fig. 1. Discretization of fracture plane (Fracture intersection shown in grey with the best-fit line of finite element edges)

은 각각의 $f_{ij}^{(k)}$ 로부터 조합되며, 주어진 전체 경계조건으로부터 Direct Frontal Solver 방법에 의해서 전체 절점계에서의 압력값이 계산된다. 그리고 균열면을 통한 유량은 (2)식으로 계산된다.

2.2 투수계수 텐서의 계산

투수계수 텐서 즉 6 방향의 성분인, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , K_{xy} , K_{yz} , K_{zx} 의 계산은 다음과 같다. 연속체 다공성 블록의 이방성 투수계수 텐서를 K_{ij} 라 하고, 주어진 수두구배를 G_i 라고 하면 유량은 다음식으로 계산된다.

$$q_i = - \sum_j k_{ij} G_j \tag{6}$$

블록의 면들을 통한 유량은

$$Q_\alpha = A_\alpha \sum_i n_{\alpha i} q_i = A_\alpha \sum_i n_{\alpha i} k_{ij} G_j \tag{7}$$

윗 식에서 n_α 는 면적 A_α 인, 면 α 의 수직성분이다. 유량은 주어진 수두 구배에 따라서 달라질 것이다. 그리고 균열연결망 모델의 경우에는 유량은 이방성 연속체 모델 블록의 한 면을 통한 유량의 변화에 비해서 단순하지 않다. 그러므로 수두구배에 따른 유량의 변화에 대한 최적 fitting을 통해서 평균적인 의미로의 투수계수 텐서를 구하는 것이 유효한 방법이 된다. Napsac에서는 15개의 방향에 대한 계산된 각각의 유량의 최적 fitting을 통해서 투수계수 텐서를 계산하여 수두구배 방향의 차이에 대한 오차를 최소화 하도록 하였다. 그러므로 투수계수 텐서의 성분은 최소화(minimizing)을 통해서

$$F = \sum_{\beta, \alpha} (q_\beta + A_\alpha \sum_{ij} n_\alpha i k_{ij} G_\beta)^2 \tag{8}$$

이 식에서 $Q_\beta \alpha$ 는 가해진 수두구배 G_β 에 대한 면 α 를 통한 유량이다. 이는 다음의 방정식으로 유도된다.⁸⁾

$$0 = \frac{\partial f}{\partial k_{ii}} = 2 \sum_{\beta, \alpha} \beta, \alpha (Q_\beta \alpha + A_\alpha \sum_{k,l} n_{\alpha k} k_{kl} G_\beta) A_\alpha n_{\alpha i} G_\beta, \tag{9}$$

i=1, 2, 3

$$0 = \frac{\partial f}{\partial k_{ij}} = 2 \sum_{\beta, \alpha} \beta, \alpha (Q_\beta \alpha + A_\alpha \sum_{k,l} n_{\alpha k} k_{kl} G_\beta) A_\alpha n_{\alpha i} G_\beta + A_\alpha n_{\alpha j} G_\beta \tag{10}$$

i < j

(9)식과 (10)식은 선형방정식으로써 가우스(Gauss) 소거법으로 풀 수 있다.

2.3 터널굴착 지하수 유입모델링

터널 또는 시추공과 같은 공학적 구조물이 균열을 교차할 경우, 압력장은 단일 sink를 가지는 평행평판내의 흐름장이 된다. 그러므로 아래식으로 표현된다.

$$P = P_w - \frac{\rho g Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) \tag{11}$$

이 식에서 P_w 는 벽면에서의 압력이며 r 은 공학적 구조물로의 거리, r_w 는 반경 그리고 Q 는 균열에서 공학적 구조물로의 유입량이다.

이러한 로그식은 규칙적인 선형삼각요소로는 적절치 않으며 보정이 필요하다. 보정치를 주어 유한요소법에 의해 계산된 공학적 구조물에서의 압력, P_{FE} 에 (12)식의 해석해를 이용하여 벽면에서의 압력, P_w 를 계산한다.

$$P_w = P_{FE} + \frac{Q}{\tau} \tag{12}$$

τ 는 상수로서 유한요소망의 크기, 공학적 구조물의 반경에 의존하는 값이다.

3. 균열압반의 유효 투수계수 계산

3.1 균열압반의 대표요소체적 및 유효투수계수 계산

압반의 투수계수는 Fig. 2에서와 같이 일정체적에 도달하기 전에는 수렴된 값을 보여주지 못하는 일종의 크기효과(Size Effect)를 나타낸다. 이는 대표요소체적으로 정의되는 일정체적에 이르기 전에는 균열 수의 한계로 인해서 압반의 투수계수에 영향을 미치는 개개 균열

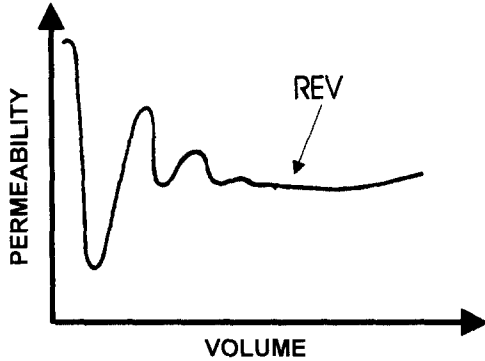


Fig. 2. Statistical Definition of a representative element volume

의 수리적 특성과 연결도 등의 요소가 평균화 된 값에 도달하지 않았기 때문으로 볼 수 있다. 그러므로 동일한 통계적 특성을 가지는 모델이더라도 대표요소체적 이하에서는 Seed에 따라서 편차가 크게 나타날 수 있다.

대표요소체적에서는 균열의 수리적 기하학적 평균화가 이루어져 Seed에 따른 투수계수의 변화가 줄어든다고 할 수 있다. 그러므로 이러한 대표요소체적하에서의 투수계수는 균열암반의 투수계수를 정의한다고 볼 수 있으며 주어진 압반을 대표할 수 있는 투수계수이며 이를 유효투수계수로 정의할 수 있다.⁹⁾

이 연구에서는 균열암반의 수리적 기하학적 특성을 방사성형기물 처분연구로 사용된 Stripa 광산의 시험 터널에서 얻어진 자료를 이용하였다.⁵⁾ 균열연결망 모델 구성을 위한 수리적 기하학적 통계 분포 함수는 Table 1과 같다.

이러한 특성을 가진 암반의 대표요소체적을 정의하기 위하여 정육면체의 한변의 길이를 20 m에서 10 m 단위로 증가시키면서 투수계수 6성분(K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , K_{xy} , K_{xz} , K_{yz})과 주투수계수(Principal permeability, K_{11} , K_{22} , K_{33}), 그리고 주투수계수의 주방향을 계산하여 체적의 증가에 따른 변화를 분석하였다. 정육면체 모델의 X 방향은 동쪽, Y 방향은 북쪽, 그리고 Z 방향은 수직 방향으로 정의하였다. 이미 언급된 바와 같이 투수계수 텐서는 15개의 방향에 대해 계산된 각각의 유량의 최적 fitting을 통해서 계산되어 수두구배 방향의 차이에 대한 오차를 최소화 하도록 하였다. 해석모델에서 한 변의 길이가 20 m의 경우의 정육면체에는 평균적으로 약 2,000여개, 60의 경우에는 약 15,000여개의 균열 수를 포함한다.

Table 1. Statistical description of fractures

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Density (m^{-3})	0.0136	0.0182	0.0103	0.0122
Distribution	Poisson			
Mean	4.01	3.09	1.24	0.58
Variance	1.58	0.85	0.68	0.40
Distribution	Log-normal			
Mean	$3.6 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$			
Variance	$4.1 \times 10^{-11} m^2 s^{-1}$			
Distribution	Log-normal			
Mean	240	169	101	160
Variance	15.6	18.9	24.5	31.7
Distribution	Normal			
Mean	71	78	80	18
Variance	10.6	15.5	25.0	22.5
Distribution	Normal			

투수계수 텐서의 계산은 Fig. 3의 "A" 또는 "B" 균열과 같이 해석영역의 모서리에 수리전도성이 큰 균열이 존재하는 경우, 다른 균열의 존재에 비해서 투수계수 텐서에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 영향을 배제하기 위해서 해석영역은 계산하고자 하는 영역 이상으로 확대("Garden Zone" 설정)하고 측정면은 계산하고자 하는 영역과 동일시 하였다. 이 연구에서는 균열의 길이를 고려하여 실제 계산하고자 하는 영역보

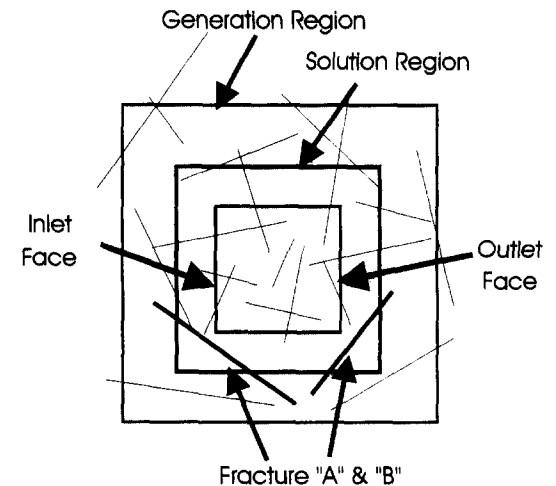


Fig. 3. "Garden zones" to exclude conducting fractures at the corner (After A.W. Herbert et al, 1996)

다 8 m를 x, y, z 세방향으로 연장하였다.

Fig. 4는 4개의 각각 다른 Seed에 대한 체적의 증가에 따른 투수계수 텐서의 각 성분의 변화를 보여준다. 해석대상 모델에서는 파쇄대와 같은 수리전도도의 이방성에 큰 영향을 미치는 요소가 포함되지 않은 이유 등으로 인해서 체적의 증가에 따른 투수계수의 큰 폭의 변화는 없으나 60 m 이후로는 수렴하는 양상을 보여준다고 할 수 있으며 Seed에 따른 투수계수의 차이도 감소한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5는 체적의 증가에 따른 주투수계수의 변화를 보여준다. 이 그림의 분석결과, 50 m 체적부터 안정된 값을 보이며 60 m와 70 m 체적 규모에서는 서로 큰 차이를 보여주지 않는다. Fig. 4와 5에서 z 방향, 즉 수직방향의 투수계수는 다른 두 방향에 비해서 Seed에 따른 변화가 다소 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 해석모델에서 4개의 균열군 중에서 3 균열군의 경사가 70~80° 범위로써 수직방향의 절리군의 수의 분포가 다수로 인한 상대적인 편차도 크기 때문인 것으로 분석할 수 있다.

대표요소체적의 정의를 위한 또다른 요소로써 주투수계수 성분의 방향코사인(Direction Cosine) 을 도시

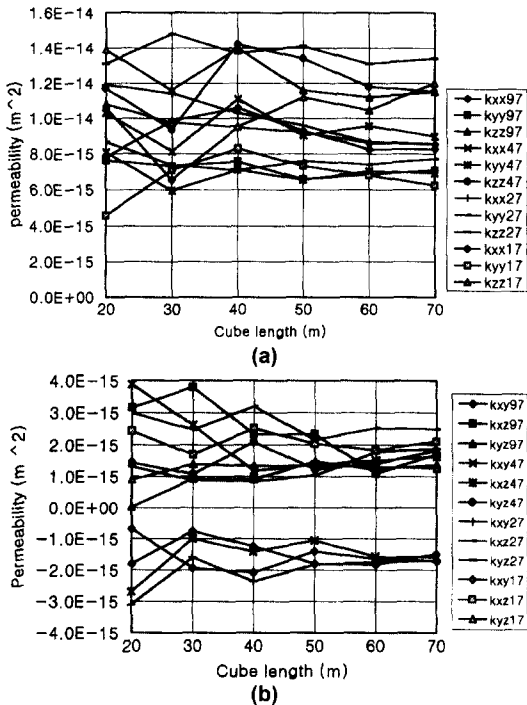


Fig. 4. Permeabilities versus cube length. (a) K_{xx} , K_{yy} , and K_{zz} and (b) K_{xy} , K_{yz} , and K_{xz}

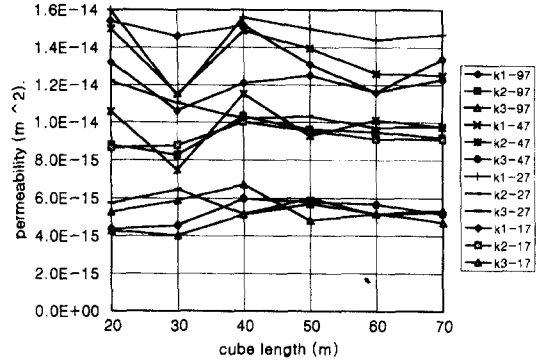


Fig. 5. Principal permeabilities versus cube length

하였다. 3차원 방향코사인 성분을 효과적으로 도시하기 위해서 2차원 Stereonet를 이용하였다. Fig. 6(a)~(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 체적이 증가함에 따라서 4개의 각 seed의 방향코사인을 나타내는 등근 점들이 서로 모이는 것을 알 수 있으며 50 m 이후로는 거의 일치하는 것을 보여준다.

Fig. 7은 Seed에 따른 투수계수 텐서 6 성분의 표준

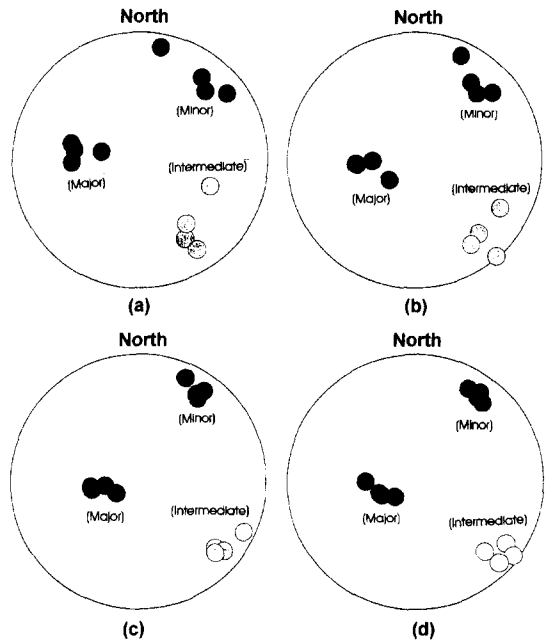


Fig. 6. Stereographic projection of direction cosines of principal permeability. (a) a cube model with side length of 20 m, (b) a cube model with side length of 30 m, (c) a cube model with side length of 50 m and (d) a cube model with side length of 60 m

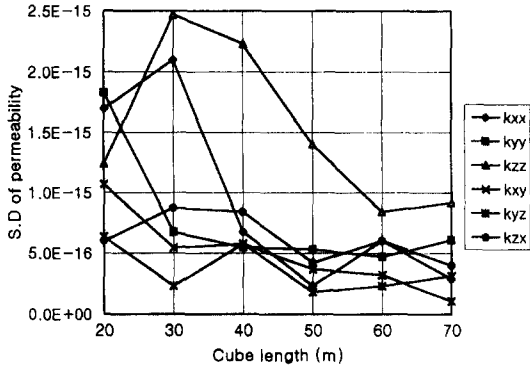


Fig. 7. Ratio of standard deviation to average of permeabilities vs. cube length

편차를 체적의 증가에 따라 그린 것이다. 수직방향 투수계수의 표준편차가 다른 성분에 비해서 변화가 크며 60 m에 이르면 안정된 값을 나타냄을 알 수 있다.

그러므로 Fig. 4~7에서 보여준 대표요소 체적의 결정을 위한 상기한 몇 가지 요소를 종합적으로 분석하면 이 해석모델의 대표요소체적은 60 m라고 정의할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 균열암반의 체적분할을 통한 암반의 투수계수 평가

균열암반의 투수계수는 균열의 연결도 및 연결된 균열의 투수계수에 의존한다. 그러므로 전체 해석대상 암반의 투수계수는 각 소영역마다 이러한 특성에 따라 달라질 수 있다. 따라서 이 연구에서는 그림에서와 같이 (60 m)³ 체적을 가지는 전체 균열연결망 모델을 4×4×4의 64개 소블록으로 소분할하여 각각의 소블록에 대한 투수계수를 계산하였다. 이를 통해서 투수계수의 분포 형태에 대한 평가를 수행하였다. 그리고 각각의 소블록들의 투수계수의 산술평균(Arithmetic mean), 기하평균(Geometric Mean) 그리고 조화평균(Harmonic Mean)을 계산하여서 전체체적에 대한 유효투수계수와 비교해 보았다.

해석은 Fig. 8과 같이 한변의 길이가 60 m인 정육면체 블록을 한변의 길이가 15 m인 전체 64개 소블록으로 나누어 각 소블록의 투수계수를 계산하였다.

Fig. 9는 x, y 그리고 z축 방향의 투수계수의 분포 형태를 보여준다. 일반적으로 균열 암반의 투수계수 확률 분포함수는 대부분 log-normal 분포 형태인데 이 연구에서 대상으로 하는 모델의 투수계수 확률분포함수도

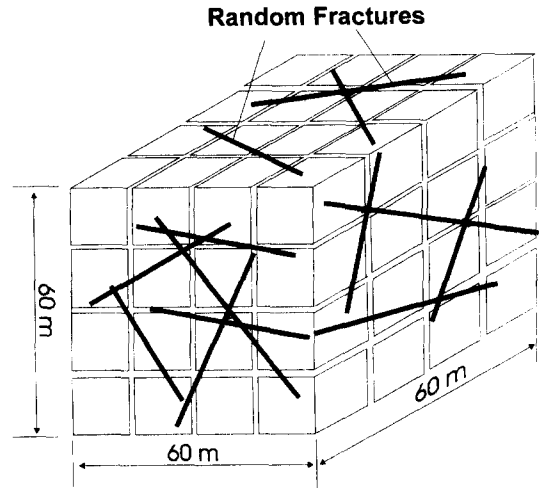


Fig. 8. Division of a whole model into 4×4×4 small blocks

log-normal로 볼 수 있다. 투수계수는 각 균열의 투수량계수와 연결도에 의해서 결정되며, 이 연구에서는 포아송 분포에 따라 균열발생이 이루어 졌으므로 전체 영역에 대해서 통계적으로 평균화 된 분포를 보인다고 할 수 있다. 따라서 투수계수의 log-normal 분포형태는 투수량계수의 확률분포함수로 입력된 log-normal 함수와 관련성이 클 것으로 판단된다.

그리고 전체블록의 유효투수계수는 Table 2에서 보여주는 바와 같이 소블록 투수계수의 산술평균과 조화평균의 가운데 값의 범위이다. 그러므로 이러한 결과는 단일공 주입시험을 통한 국부적인 영역에서의 투수계수로부터 유효투수계수를 평가하는 지침에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 대표요소체적과 비대표요소체적에서의 수리시험 결과 비교

이 절에서는 대표요소체적 및 비대표요소체적하에서 균열연결망 모델에서 Fig. 10에서와 같이 각각 동일한 압력조건하에서 Seed를 달리하여 수치실험을 수행하였다. 해석은 3.1절에서와 같이 한변의 길이가 20, 40, 60 m 그리고 70 m인 정육면체에서 x, y 그리고 z축 방향으로의 유량을 계산하였다. 해석은 x 방향의 유량계산일 경우, x축과 수직한 두면에서 압력을 가하고 나머지 네 면은 no flow 조건을 가하였으며 나머지 축에 대해서도 같은 방법으로 수치실험이 수행되었다.

Table 3은 20, 40, 60 m 그리고 70 m 크기 범위에서

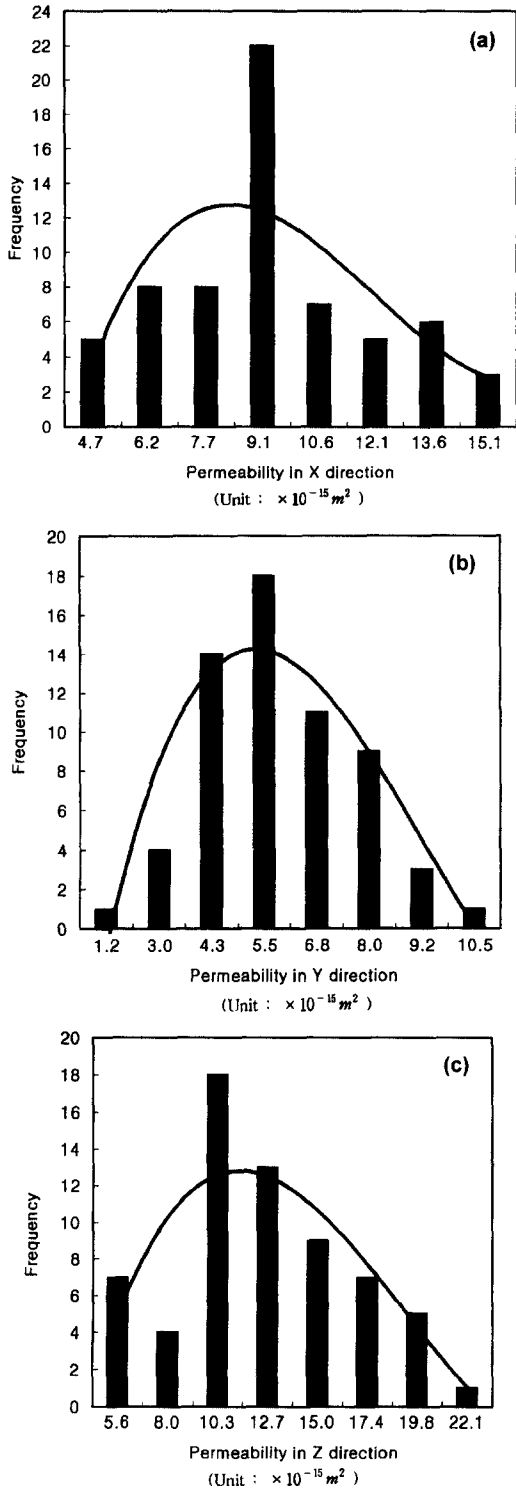


Fig. 9. Histogram of local permeabilities. (a) X direction, (b) Y direction and (c) Z direction

Table 2. Arithmetic, harmonic and geometric mean of local permeabilities (Unit: $10^{-15} m^2$)

Mean	Permeabilities	k_{xx}	k_{yy}	k_{zz}
Permeability of a whole block		8.65	6.90	1.18
Arithmetic Mean		8.85	6.96	1.30
Harmonic Mean		7.92	5.81	1.13
Geometric Mean		8.67	6.49	1.24

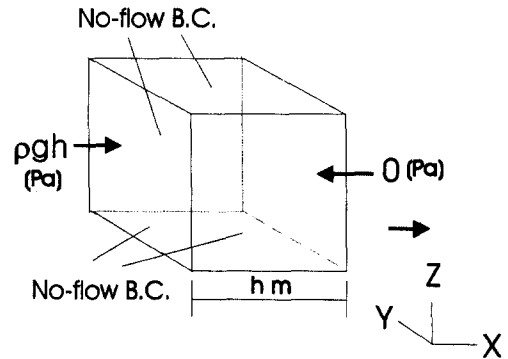


Fig. 10. Schematic diagram to illustrate boundary condition and cube dimension

x, y 그리고 z축 방향의 유량이며 Fig. 11은 체적의 증가에 따른 유량의 평균 대 표준편차의 비를 보여준다. 표와 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대표요소체적으로 정의된 $(60 m)^3$ 에 도달함에 따라 Seed에 따른 결과의 편차가 줄어들며 대표요소체적을 지난 $(70 m)^3$ 에서도 $(60 m)^3$ 와 거의 유사한 결과의 편차를 보여준다. 그러므로 균열연결망 모델에서의 해석에서는 대표요소체적 범위에서의 해석을 통해서 해석의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 균열연결망 모델에서의 3차원 터널 굴착 지하수유동 해석

균열암반의 등가다공성 모델에서의 터널굴착 지하수 유동해석은 단일 투수계수를 입력치로 하는 경우, 터널 굴착 구간에 무관하게 거의 동일한 유입량이 계산된다. 그러나 실제현장에서는 터널굴착 진행에 따라 균열의 발생빈도 및 수리전도성이 큰 균열의 교차 등에 따라서 유입량이 달라지게 된다. 이러한 측면에서 볼 때 균열 연결망 모델에서의 터널굴착 해석은 터널굴착에 따른 지하수 유입량의 변화를 통계적으로 예측할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 Fig. 12와 같은 비교적 간단한 경계조건 하에서 터널굴착 해석을 수행하였다. 해석

Table 3. Average and S.D. of groundwater flux in X, Y, & Z direction for various volumes of model (Unit: m³/sec)

Cube Dimension		Flux	Flux in X dir.	Flux in Y dir.	Flux in Z dir.
20 m Cube	Avg.		3.00×10^{-9}	2.83×10^{-9}	5.41×10^{-9}
	S.D.		1.57×10^{-9}	8.23×10^{-10}	2.09×10^{-9}
	S.D./Avg. × 100(%)		52.3	29.08	38.63
40 m Cube	Avg.		1.15×10^{-8}	8.91×10^{-9}	1.63×10^{-8}
	S.D.		2.04×10^{-9}	1.28×10^{-9}	3.03×10^{-9}
	S.D./Avg. × 100(%)		17.70	14.37	18.71
60 m Cube	Avg.		2.53×10^{-8}	1.97×10^{-8}	3.67×10^{-8}
	S.D.		2.17×10^{-9}	2.26×10^{-9}	3.89×10^{-9}
	S.D./Avg. × 100(%)		8.57	11.47	10.59
70 m Cube	Avg.		3.47×10^{-8}	2.68×10^{-8}	4.90×10^{-8}
	S.D.		2.96×10^{-9}	2.94×10^{-9}	5.63×10^{-9}
	S.D./Avg. × 100(%)		8.53	10.97	11.49

Avg: Average, S.D.: Standard Deviation.

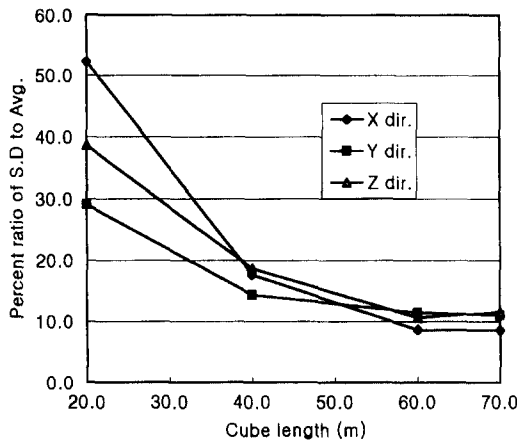
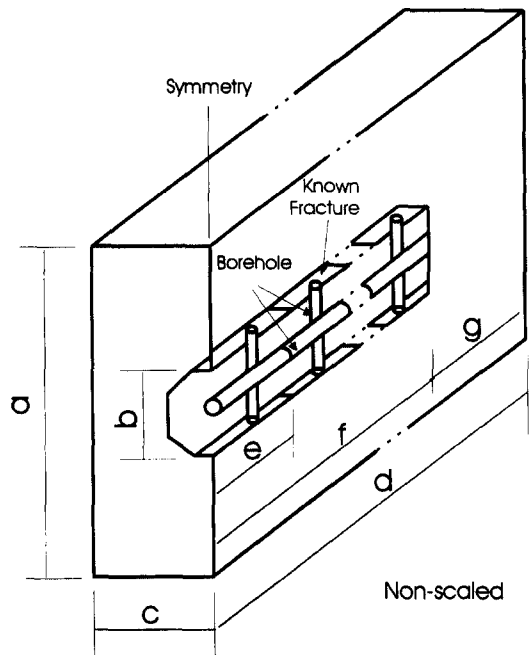


Fig. 11. Percent ratio of standard deviation to average of flux vs. cube length

은 두 종류의 모델에 대해서 수행되었다. 두 모델에서 터널의 길이 및 단면은 일정하며 터널과 모델 경계면의 길이를 각각 30 m, 60 m로 설정하여 터널길이대 터널 방향의 모델 한변의 길이비를 각각 1:2, 1:3으로 설정하였다. 터널과 모델 경계면의 길이가 30 m인 경우는, 3.1절의 결과에 근거하여 대표요소체적 이하라고 할 수 있으며, 60 m인 경우에는 대표요소체적 규모라고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 특징적인 두 모델에 대한 해석을 통해서 그 결과를 상호 비교하고자 하였다. 그리고 각각의 체적 규모에서 3.1절에서와 같은 방법으로 등가 투수계수를 계산하고 이를 입력치로 하는 등가 다공성 모델에 대한 해석을 실시하여 그 결과를 균열연



(Unit : m)

	a	b	c	d	e	f	g
Model A	66	6	33	60	3	30	30
Model B	126	6	63	90	3	30	60

Model A : Distance between tunnel and model boundary = 30 m
 Model B : Distance between tunnel and model boundary = 60 m

Fig. 12. Schematic diagram of tunnel, inside boreholes and boundary conditions

결망 모델의 결과와 비교 분석하였다.

균열연결망 모델에서의 터널굴착 해석에서 터널은 원

형으로 가정하여 Fig. 12에서와 같이 8개의 균열로 모델화 하였다. 이러한 균열면의 중심점에는 그림에서와 같이 Napsac 모델에서 설정된 수평 시추공과 이를 8개의 균열면과 연결하는 수직 시추공을 적용하여 이 시추공으로 유입되는 지하수가 터널내부로의 지하수 유입량이 되는 개념이다. 터널굴착 지하수 유동에 대한 경계조건은 수평시추공에 대기압이 작용하게 하고 터널을 나타내는 균열의 투수계수를 10^{-17} m^2 의 초기치에서 10^{-2} m^2 로 증가시켰다. 모델의 경계면에 대한 압력조건으로는 터널의 시작면에서는 no-flow 조건이며 나머지 면들은 해석의 단순화를 위해 0 Pa의 압력을 가하였다. 터널의 전체길이는 30 m이며, 단면은 반경 3 m의 원형이며 3 m 단위에서 지하수 유입량을 계산하였다.

Fig. 13은 터널주변의 2차원적 압력의 재분포를 보여준다. 그림에서 터널벽면을 나타내는 균열은 보이지 않으나 터널내부의 수직, 수평공의 위치로써 터널의 존재를 알 수 있다. 그림에서와 같이 터널을 중심으로 압력이 증가하고 있음을 알 수 있다.

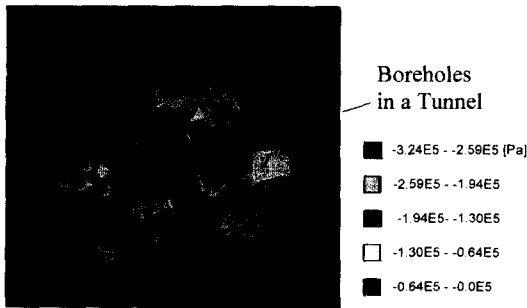


Fig. 13. Distribution of Groundwater pressure in a fracture network model

Table 4는 터널과 경계면의 거리가 30 m인 모델에 대해서 10개의 각각의 Seed로 발생시킨 균열모델에서의 터널로의 지하수 유입량을 보여준다. Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 동일 Seed에 대해서도 구간별로 다양한 결과치를 보여준다. 이는 구간별로 균열의 수와 각 균열의 투수계수가 다르기 때문이다. 그리고 마지막 구간에서 유입량이 다른 구간에 비해서 큰 값을 나타내는데, 이는 터널의 상하부 뿐만 아니라 막장면에서의 균열의 교차를 통한 지하수 유입량 때문이라고 할 수 있다. 각 구간에서 지하수 유입량의 차이는 마지막 구간을 제외하더라도 Seed에 따라서는 구간별 지하수 유입량은 최고 3배 이상의 변화를 보인다. 그러나 전체 30 m 구간에서의 지하수 유입량은 Seed에 따라서 비교적 일정한 값을 보여준다. 이는 전체 터널 구간에서 볼 때, 균열모델에서는 균열의 기하학적, 수리적 특성이 통계적으로 평균화 되었기 때문으로 볼 수 있다.

이러한 균열연결망 모델의 해석결과는 이미 언급한 바와 같이 이 모델의 투수계수를 입력치로 하는 동일한 경계조건하에서의 등가다공성 해석 결과와 비교되었다. 연속체 모델에서의 터널굴착은 중심선에 균열연결망 해석과 동일하게 대기압을 가하였고 터널내부의 투수계수는 1000배 증가시켰다. Fig. 14는 터널주위의 2차원적 압력 분포를 보여준다. 그림에서와 같이 터널을 중심으로 압력이 증가하고 있음을 알 수 있으며 균열로 인한 이방성 특징으로 인해서 동심원적인 양상에서는 다소 벗어난다고 할 수 있다.

Table 5는 등가다공성 모델에서의 터널로의 지하수 유입량을 보여준다. Table 5와 Fig. 15에서 볼 때 터널의 구간별 지하수 유입량은 차이가 있지만 터널내부로

Table 4. Groundwater influx into tunnel for ten realisations in fracture network model (Distance between model boundary and tunnel=30 m) (Unit: $10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$)

Segment \ Seed	No. 1 (97)	No. 2 (47)	No. 3 (18)	No. 4 (27)	No. 5 (15)	No. 6 (25)	No. 7 (35)	No. 8 (40)	No. 9 (50)	No. 10 (60)
1	1.67	2.35	2.82	2.69	1.99	5.30	3.13	3.91	3.58	2.03
2	1.65	3.39	2.33	3.72	1.75	4.10	1.77	3.85	4.47	2.03
3	2.07	2.45	2.44	4.11	2.17	3.65	3.14	2.71	4.76	2.32
4	2.69	2.77	1.57	2.83	2.44	4.27	1.81	2.27	3.32	5.15
5	3.80	3.04	1.57	3.26	3.80	6.33	3.15	2.06	3.41	3.27
6	5.98	2.97	3.29	3.52	2.90	4.21	3.99	1.70	3.86	1.93
7	7.23	3.43	3.38	3.31	3.69	3.53	3.91	3.30	6.01	2.45
8	5.13	4.79	4.10	3.58	5.44	4.65	4.01	4.44	5.18	2.94
9	5.48	7.40	4.49	4.35	5.20	5.82	5.24	5.45	4.54	4.23
10	7.13	7.94	6.68	6.85	8.24	6.60	6.46	6.81	8.56	8.19
Sum	42.82	40.43	32.67	38.21	37.60	48.45	36.61	36.50	47.78	34.53

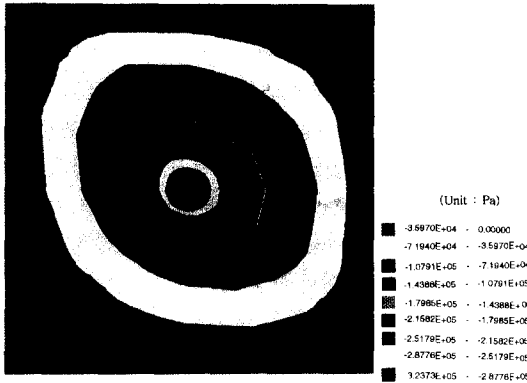


Fig. 14. Distribution of Groundwater pressure in a equivalent porous model

의 전체 지하수 유입량은 균열연결망 모델과 등가다공성 암반모델에서 거의 유사하다. 그러므로 이는 균열연결망 모델에 대해서 투수계수 텐서의 정의가 유효하다는 것을 보여준다.

Table 6과 7은 터널의 경계면과 터널벽면의 거리가 60 m 떨어진 암반에 대한 균열연결망 모델과 등가다공성 모델에서의 터널 내부로의 지하수 유입량을 보여준다. Table 6, 7 및 Fig. 15로부터 대표요소체적 규모를 만족한다고 볼 수 있는 터널의 경계면과 터널벽면의 거리가 60 m 떨어진 암반의 경우에 있어서 터널로의 지하수 유입량의 변화가 심하며 등가다공성 모델의 비교 결과도 일치성이 줄어들음을 알 수 있다.

Table 8은 다공성 모델과 균열연결망 모델에서의 지하수 유입량 비를 백분율로 나타내었다. Table 8을 전체적인 관점에서 보면 균열연결망 모델과 이에 대한 등가다공성 모델에서의 지하수 유입량은 비교적 잘 일치

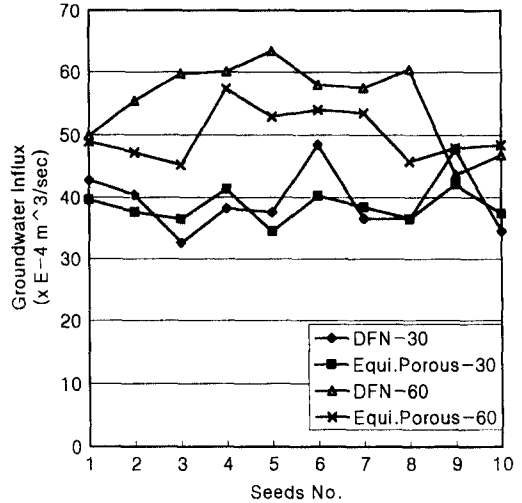


Fig. 15. Comparison of groundwater influx into tunnel between fracture network model and equivalent porous model for cube length of 30 and 60 m

한다고 볼 수 있다. 이 표에서 주의 깊게 관찰 할 수 있는 점은 터널의 경계면과 터널벽면의 거리가 30 m의 경우에는 다공성 모델과 균열연결망 모델에서의 지하수 유입량 비가 Seed에 따라서 최고 20%, 정도이지만 60 m의 경우에는 최고 32%의 오차를 보여준다. 이 결과를 통해서 볼 수 있는 것은 60 m 암반의 경우에 대해서는 30 m에 비해서 터널의 길이대 전체 영역의 비가 작아짐으로 인해서 균열 특성의 통계적 평균의 개념이 적용되기 힘든 이유라고 판단된다. 또한 30 m와 60 m의 경우에서 등가다공성연속체 모델과 균열연결망 모델의 결과치가 완전히 일치할 수는 없지만 그 경향성에 대해서는 유사한 값을 보여 주어야 한다. 30 m의 경우

Table 5. Groundwater influx into tunnel for ten realisations in equivalent porous model (Distance between model boundary and tunnel=30 m) (Unit: 10⁻⁴ m³/sec)

Seed	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
Segment	97	47	18	27	15	25	35	40	50	60
1	3.27	3.10	3.00	3.41	2.85	3.31	3.15	2.30	3.48	3.07
2	3.24	3.07	2.99	3.37	2.84	3.28	3.13	2.96	3.42	3.03
3	3.26	3.09	3.00	3.39	2.85	3.30	3.14	2.98	3.44	3.04
4	3.29	3.11	3.03	3.42	2.87	3.33	3.17	3.01	3.48	3.07
5	3.33	3.15	3.06	3.46	2.90	3.37	3.21	3.05	3.52	3.12
6	3.38	3.21	3.11	3.53	2.95	3.43	3.27	3.10	3.59	3.18
7	3.48	3.29	3.19	3.62	3.03	3.53	3.36	3.20	3.69	3.27
8	3.64	3.45	3.34	3.80	3.17	3.70	3.52	3.35	3.86	3.43
9	4.00	3.79	3.67	4.17	3.48	4.10	3.88	3.69	4.25	3.78
10	8.76	8.34	8.04	9.15	7.58	8.97	8.61	8.23	9.39	8.41
Average	39.64	37.59	36.44	41.33	34.52	40.29	38.43	36.55	42.11	37.39

Table 6. Groundwater influx into tunnel for ten realisations in fracture network model (Distance between model boundary and tunnel=60 m) (Unit: 10^4 m³/sec)

Segment \ Seed	No. 1 (84)	No. 2 q(27)	No. 3 q(17)	No. 4 q(57)	No. 5 q(81)	No. 6 (97)	No. 7 (65)	No. 8 q(82)	No. 9 (66)	No. 10 (48)
1	3.34	4.62	1.89	2.80	2.09	2.94	3.21	3.21	4.47	2.25
2	3.12	3.80	2.77	3.72	5.27	4.22	5.03	4.29	3.70	4.40
3	2.88	5.96	3.26	5.69	4.42	4.18	4.75	4.30	4.84	5.04
4	3.19	4.78	4.66	5.35	5.86	4.27	4.13	4.32	3.39	3.26
5	4.57	4.65	2.88	5.81	5.70	4.51	5.14	3.70	3.07	3.67
6	5.11	5.94	7.30	4.20	6.55	5.12	4.98	4.35	4.09	3.93
7	5.38	6.11	5.62	6.17	5.05	6.90	6.11	7.39	3.46	4.38
8	3.79	4.85	5.66	6.19	6.51	5.91	8.95	7.37	4.45	4.67
9	6.09	7.92	11.47	5.17	7.00	10.78	6.81	9.11	5.59	6.25
10	9.41	6.78	14.23	15.02	14.96	9.23	8.34	12.38	6.62	8.80
SUM	49.88	55.41	59.74	60.12	63.41	57.97	57.46	60.43	43.68	46.84

Table 7. Groundwater influx into tunnel for ten realisations in equivalent porous model (Distance between model boundary and tunnel=60 m) (Unit: 10^4 m³/sec)

Segment \ Seed	No. 1 (84)	No. 2 (27)	No. 3 (17)	No. 4 (57)	No. 5 (81)	No. 6 (97)	No. 7 (65)	No. 8 (82)	No. 9 (66)	No. 10 (48)
1	4.18	4.05	3.89	4.83	4.43	4.54	4.50	3.94	4.08	4.13
2	4.35	4.21	4.03	4.79	4.42	4.49	4.46	4.09	4.26	4.29
3	4.37	4.22	4.03	4.82	4.45	4.53	4.49	4.10	4.28	4.32
4	4.41	4.25	4.07	4.89	4.51	4.58	4.55	4.13	4.32	4.36
5	4.48	4.32	4.13	4.99	4.60	4.68	4.65	4.19	4.38	4.42
6	4.58	4.41	4.22	5.14	4.74	4.82	4.79	4.28	4.48	4.52
7	4.72	4.56	4.36	5.38	4.95	5.05	5.01	4.42	4.63	4.67
8	4.96	4.79	4.58	5.78	5.33	5.43	5.39	4.64	4.86	4.90
9	5.27	5.09	4.87	6.57	6.07	6.18	6.13	4.94	5.16	5.21
10	7.60	7.29	7.05	10.18	9.43	9.67	9.53	7.08	7.47	7.58
SUM	48.92	47.17	45.23	57.37	52.90	53.97	53.49	45.81	47.92	48.40

Table 8. Percent ratio of groundwater influx calculated by fracture network model and equivalent porous model for ten realisations (Unit: Percents)

Realisations \ Cube length	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	108.0	107.6	89.7	92.5	108.9	120.3	95.26	99.9	113.5	92.4
60	102.0	117.5	131.5	104.5	116.3	107.4	107.4	131.9	91.6	96.7

에는 seed에 따른 지하수 유입량의 변화가 잘 일치한다고 볼 수 있다. 그러나 60 m의 경우에는 seed에 따른 경향성이 낮게 나타남을 보여 준다. 예를 들어 즉, 60 m의 경우에는 특히 seed No. 3과 seed No. 8의 경우에서 연속체와 균열연결망의 결과에 대한 경향성이 차이가 심한데 이는 상기한 이유에서와 같이 터널의 길이대 전체 영역의 비가 작아짐으로 인해서 균열 특성의 통계적 평균의 개념이 적용되기 힘든 이유라고 볼 수 있다.

그러므로 터널굴착 지하수 유입량 해석에서는 모델의 대표요소체적보다는 터널 대 경계면의 길이 비가 중

요한 요소가 되며 이 값이 커질수록 결과의 편차가 커진다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 조사자료에서 구해진 균열의 수리적 기하학적 특성에 대한 분포함수를 이용하여 균열연결망 모델을 구성하고 이 모델의 대표요소체적 평가 및 유효투수계수를 계산하였다. 그리고 대표요소체적 이상의 크기를 가지는 체적모델을 소분할하여 각각의 소블록에 대한 투수계수의 분포함수 형태 및 전체체

적에 대한 압박의 유효투수계수와 소블록 압박의 평균 값에 대한 비교 분석을 수행하였다. 균열연결망 모델에서의 3차원 터널굴착 지하수 유동해석은 터널의 길이를 일정하게 고정하고 터널과 경계면의 거리를 각각 30 m와 60 m로 설정하여 각각 10개의 Seed에 대해서 해석을 수행하였다. 이 균열연결망 터널모델은 이 압박의 등가투수계수를 입력치로 하는 등가다공성 해석을 실시하여 그 결과를 상호 비교 분석하였다. 본 연구에서 이루어진 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 균열압박의 대표요소체적 평가를 위해서 체적의 증가에 따른 투수계수 6성분, 주투수계수 및 방향코사인인의 변화를 Seed를 달리하여 분석한 결과, 해석대상 모델의 대표요소체적은 60 m^3 으로 결정되었다.

2) 해석모델을 64개의 소블록으로 등분할하여 각각의 투수계수를 구한 결과, 투수계수의 분포함수는 일반적인 압박의 투수계수 분포 특성이라고 할 수 있는 log-normal 분포특성을 나타내었고 전체블록의 유효투수계수는 이 소블록 투수계수의 산술평균과 조화평균의 가운데 값의 범위로 나타났다.

3) 정육면체의 한변을 source로 하고 마주보는 면을 sink 면으로 설정하여 수치실험을 수행한 결과, 대표요소체적에 이르면서 sink 면에서의 유량의 변화가 작아짐을 보여 주었는데 이는 대표요소체적에서 균열의 수리적 기하학적 특성이 통계적으로 평균화 되기 때문이며 균열연결망 모델에서의 지하수 유동해석에서는 우선적으로 압박의 대표요소체적 평가가 선행되어야 함을 보여준다.

4) 터널굴착으로 인한 균열연결망 모델과 이 모델의 등가 투수계수를 입력치로 하는 다공성 모델에서의 해석결과, 각 구간별 지하수 유입량은 두 모델에서 상당히 다르지만 전체 유입량의 합은 30 m인 경우, Seed에 따라서 최고 20% 그리고 60 m인 경우 최고 32%에서 범위에서 유사함을 보였다.

5) 터널과 경계면의 거리가 30 m인 경우가 60 m 모델에 비해서 균열연결망 모델과 등가다공성 모델의 지하수 유입량이 전체구간에서 볼 때 더 잘 일치한 결과를 보였는데 이로부터 터널굴착 지하수 유입량 해석에

서는 터널 대 경계면의 길이 비가 커질수록 해석결과의 편차가 커진다고 할 수 있다. 이러한 균열연결망 모델에서의 터널굴착 모델링은 향후 현장모델의 비교를 통해서 지속적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 1997년도 전반기 한국과학재단 해외 Post-Doc. 과정을 통해서 수행되었으며, 지원해주신 한국과학재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. La Pointe, P., P. Wallman, S. Follin, 1995, Estimation of effective block conductivities based on discrete network analyses using data from Aspo site, SKB Technical Report 95-15.
2. J.E. Bolt, P.J. Bourke, *et al*, 1995, The application of fracture network modelling to the prediction of groundwater flow through highly fractured rock, AEA Technology, NSS/R281.
3. J.E. Geier, C-L. Axelsson, L. Hassler, 1992, Discrete fracture modelling of Finnsjon rock mass, phase2, SKB 92-07.
4. S. Norris, E.F. Bailey *et al*, 1997, An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield., Nirex science report S/97/012.
5. A. Herbert, J. Gale, G. Lanyon & R. Macleod, 1992, Modelling for the stripa site characterization and validation, Stripa project report TR 91-35, SKB.
6. A.W. Herbert and P.M. Wilcock, 1996, Napsac (Release 4.1) Summary Document, AEA D & R report 0271.
7. L.H. Harteley, C.P. Jackson and S.P., 1996, Watson, Nammu (Release 6.4) User Guide AEA-ES-0138.
8. W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling, 1986, Numerical Recipes. The art of scientific computing, Cambridge Univ. press.
9. Johan G Holmen, 1997, On the flow of groundwater in closed tunnels, SKB TR 97-10.