암석절리에서의 유체유동과 불연속 암반의 수리전도성에 관한 이론적 수치해석적 연구

송 명규, 주 광수, 문 현구
(한양대학교 자원공학과)

1. 서론

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. 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 무수히 많은 불연속면이 상호 연결된 상태로 분포하는 경우에 적절하고, 후자의 방법은 절리간의 연결성이 낮으며 절리의 밀착도가 높은 경우 개개의 절리를 독립적으로 취급하는 방식이다[1~3].

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

2. 단일절리 유동해석

절리암반내 유동해석의 관점에서 절리는 절리면 사이의 간극에 의해서 표현할 수 있다. 여러가지 암종에 대한 실험 결과에 따르면 단일절리의 간극분포는 암석의 입자크기에 큰 영향을 받으며, 일반적으로 로그정상분포에 근사한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 간극의 분포형태를 로그정상분포로 가정하여 단일절리내의 간극분포를 통계적 방법을 사용하여 발생시켰다. 단일절리면의 크기(L x L)는 10 cm x 10 cm이며, 평균간극과 표준편차는 문헌조사 자료[4,5]를 참고로 각각 88 μm와 21.16 μm 를 사용하였다. 변이함수는 지수상관함수 및 구형상관함수를 사용하였으며, 상관길이는 1 cm 간격으로 단일절리 크기의 0.1 ~ 0.6 배로 하였다. 지수상관함수를 사용하여 상관길이가 단일절리의 크기의 0.2배인 경우의 간극분포는 Fig. 1과 같다.

임의의 간극분포를 갖는 단일절리내에서의 유동을 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.

이론해 및 유한차분법에 의해 단일절리에서의 속도분포를 분석하였다. 사용한 모델은 지수상관함수와 구형상관함수를 사용한 경우의 단일절리 모델이다. 경계조건은 모델의 좌우단경계의 수두차이를 10 cm(수압차이=1kN/m^2)로 하고 상하부경계를 차단하는 조건으로하였다. 이론해에 의한 속도분포는 Fig. 2와 같다. 절리내에서의 유동은 이론해와 유한차분법에 의한 결과 모두 간극이 큰 지역을 따라서 우세하게 흐르는 '채널(channel) 현상'이 나타났으며, 이러한 채널현상은 상관길이가 0.3 배, 0.4 배로 증가함에 따라 각 지점에서의 간극분포의 상관성으로 인해 둔화되는 경향을 볼 수 있으며, 이에 따른 속도분포의 편차도 줄어드는 경향을 보였다.

이상의 결과로부터 절리내에서의 유동은 간극간의 편차가 심할 경우 간극이 우세한 방향을 따라 흐르는 채널현상을 일으키고 있으며, 기존의 평판모델로는 절리의 유동현상을 규명하는데 한계가 있음을 알 수 있다.

3. 절리망 유동해석

불연속 암반에서 지하수의 유동은 암반내 절리의 밀도와 방향성 등 절리의 기하학적 성질에 좌우된다. 절리의 분포양상은 제한된 지질자료로부터 절리의 분포 양상을 통계적으로 발생시키는 과정이 필요하다. 절리의 기하학적 특성들을 통계적 변수로 보고 절리들의 기하학적 특성의 분포를 어떤 확률분포로 가정하고 추정하는 통계적 모델을 구현하는 것이 필요하다. 통계적 모델링 기법을 사용하여 절리도를 발생시키기 위해 관찰면의 각도, 절리의 위치와 간격, 절리의 길이, 그리고 방향성을 통계변수로 하는 절리도 발생기가 이용되었다.[6]

절리 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. 고립된 절리를 계산과정에서 제외시키 후, 주어진 경계조건으로부터 절리망내에서의 수두분포를 계산할 수 있다. 계산된 수두분포로부터 절리망에서의 속도분포를 계산한다. 각 방향의 평균속도로부터 등가 수리전도계수 k_{ij}를 구할 수 있다. .

불연속 암반의 등가 수리전도계수의 분포양상을 알아보기 위해 같은 지질조건 하에서 절리발생 프로그램을 이용하여 100개의 절리도를 발생시켰다. 100개의 절리도에 대한 등가 수리전도계수 행렬(k_{xx}, k_{yy}, k_{xy}, k_{yx})의 분포양상은 수리전도계수 k_{xx}와 k_{yy}는 정규분포의 양상을 띄고 있으며, k_{xy}와 k_{yx}는 음지수분포 또는 로그정상분포에 근사한 분포양상을 띄고있다.

절리암반내 원형공동 굴착시 절리의 갯수 및 공동의 직경에 따라 공동내부로 유입되는 지하수의 유량을 예측하는 전산 모델실험을 수행하였다. 사용한 모델은 가로 세로 10 m의 절리암반을 대상으로 공동의 직경을 1 m에서 4 m까지 0.2 m 간격으로 증가시켰다. 절리군의 수는 3개이고,각 절리군의 절리의 갯수는 20, 30, 40, 50개로 증가시켰다. 이것은 개별 절리망 해석법을 사용하여 절리의 갯수를 증가시켰을 경우, 절리

암반을 연속체 모델로 간주하여 지하수의 유량을 해석하는 이론적 결과와 비교하기 위한 것이다. Fig. 3은 각 절리군의 절리수를 40개로 하고 공동의 지경이 3m인 경우의 모델이다. 사용한 경계조건은 상하경계에서의 수두를 각각 20 m와 30 m, 좌우측 경계의 수두는 상하경계의 수두사이에서 선형으로 변하도록 하였다. 공동벽면에서의 수두는 공동굴착으로 인한 수두감소를 고려하여 경계에서의 수두보다 낮은 10 m로 하였다. 각 절리의 간극은 100 μm 로 가정하였다. 작성된 절리망을 대상으로 공동의 직경이 증가함에 따라 공동내부로 유입된 유량을 이론해와 비교하였다. 사용된 이론해는 균질 등방성 매질을 대상으로 해저나 하저터널의 경우와 같이 지하수위가 변하지 않는 상태를 가정한 Goodman의 해이다[7]. 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. 한편 등방연속체를 가정한 이론해는 각각 분당 0.04 ~ 0.07 liter, 0.07 ~ 0.13 liter 사이의 유량이 발생하였다. 해석결과의 차이는 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 때문이라 생각된다. 이러한 차이는 각 절리군의 절리수가 40과 50으로 증가함에 따라 상당히 감소되는 경향을 볼 수 있다. Fig. 4는 각 절리군의 절리수가 40인 경우 절리망 해석법과 이론적 결과이다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 연속, 등방, 균질의 접근방식은 다수의 임의 방향의 불연속면이 존재하는 경우에 적용이 가능하며 개개의 지질자료에 따른 절리의 기하학적 정보를 효과적으로 고려하여 지하수의 유동을 해석하기 위해서는 절리망 해석법을 사용하는 것이 필수적이라고 생각된다.

4. 결론

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.

(3) 절리발생 프로그램으로부터 얻어진 100개의 절리암반에 대해 절리망 해석법을 적용하여 분포양상을 분석한 결과, 수리전도계수 k_{xx}와 k_{yy}는 정규분포의 양상을 띄고 있으며, k_{xy}와 k_{yx}는 음지수분포 또는 로그정상분포에 근사한 분포양상을 나타냈다.

(4) 절리망 해석법을 원형공동 굴착문제에 적용하였다. 절리 갯수 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 결과이기도 하지만 그 반대의 경우, 즉 상대적으로 적은

수(통계적 의미에서)의 절리가 분포하는 암반에서의 지하수 유동을 해석하는 데는 연속체 방법이 부적합하다는 사실을 입증하는 결과이기도 하다. 결과적으로 개개 절리의 기하학적 정보를 지하수 유동해석에 충실히 반영하기 위해서는 절리망 해석법이 필요하다.

5. 참고문헌

[1] J. A. Samaniego & 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.

[2] 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.

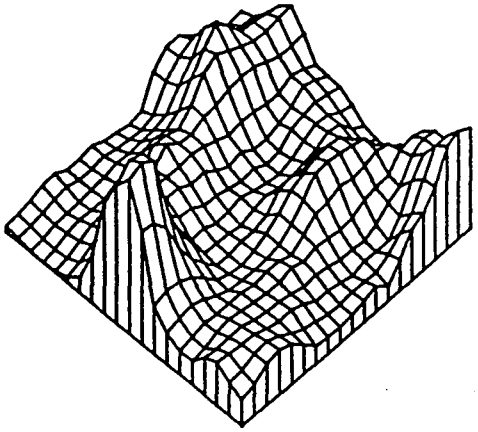
[3] Smith, L. & F. W. Schwartz (1984) An analysis of the influence of fracture geometry on mass transport in fractured media, Water Resour. Res., Vol. 20, No. 9, pp. 1241 - 1252.

[4] Tsang, Y.W. & C. F. Tsang (1987) Channels model of flow through fractured media, Water Resour. Res., Vol. 23, No. 3, pp. 467 - 479.

[5] 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.

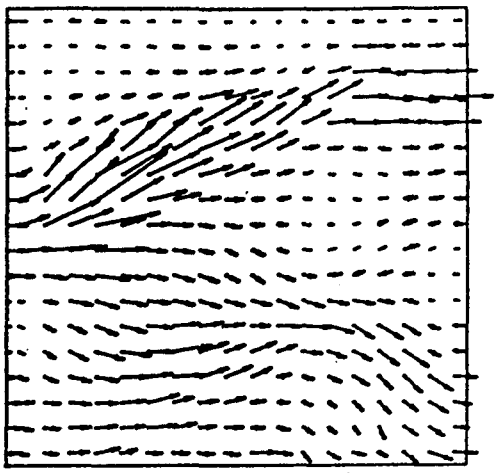
[6] 이근채 (1992) 통계적 절리구조 모델링과 지하공동 안정성 평가에의 적용, 석사학위 논문, 한양대학교.

[7] L. Zhang & 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.



λ/L = 0.2

Fig. 1. Aperture profile from exponential correlation function



λ/L = 0.2

Fig. 2. Flow velocity plot

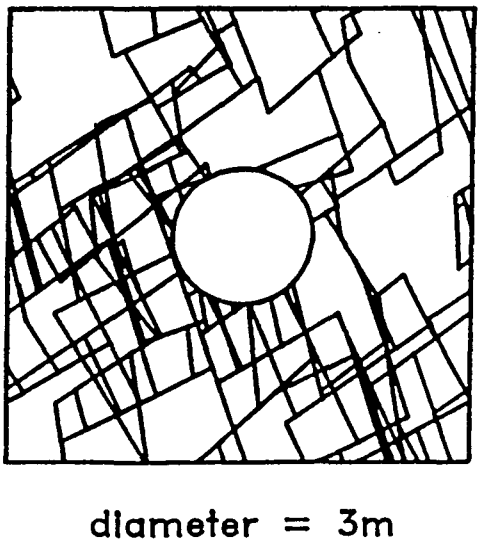


Fig. 3. Case of excavation in joint rock mass

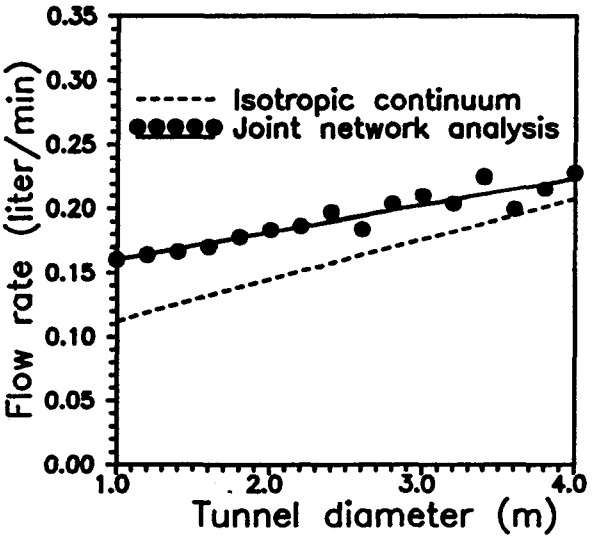


Fig. 4. Volumetric flow rate