

절리 암반의 등가 수리전도도와 터널 내 지하수 유입량 예측에 관한 3차원 연구

A 3-Dimensional Study on the Estimation of Equivalent Hydraulic Conductivity of Jointed Rock Mass and Groundwater Inflow in a Tunnel

고태영¹⁾ · 문현구²⁾

1. 서론

본 연구에서는 불연속체 모델 기법을 통하여 절리 암반에서의 등가 수리전도도와 터널 내 지하수 유입량을 예측하였다. 불연속체 모델 기법을 통하여 지하수 유동을 분석할 때 불연속면을 2차원으로 발생시켜 해석을 하게 되면 2차원 평면상에서 연결되지 않은 불연속면도 실제 3차원 공간에서는 연결될 수 있기 때문에 2차원 해석의 결과는 3차원 해석 결과와 많은 차이를 지니게 된다. 따라서 3차원 절리 모델 발생 프로그램을 개발하여 2차원 해석이 지니는 단점을 보완하고자 하였다. 절리는 수학적 접근이 쉬운 원형평판으로 가정하고 포아송 분포를 따르는 절리의 중심, Fisher 분포를 따르는 절리의 방향성, 로그정규분포, 음지수분포 또는 감마분포를 따르는 절리의 직경을 이용하여 3차원 절리 모델 발생 프로그램을 개발하였다. 그리고 절리간의 연결성을 조사하여 지하수의 흐름이 발생하지 않는 불필요한 절리를 제거하고 연결된 절리만으로 구성된 3차원 절리망을 구현하였다. 이렇게 만들어진 3차원 절리망에서 수리 경계조건에 의하여 절리 암반의 수리전도도(hydraulic conductivity)를 결정하는 전산 해석을 수행하였다. 또한 원형 터널 굴착 시 터널 내부로 유입되는 지하수의 양을 예측하였으며, 이를 기존의 이론해와 비교분석하였다.

2. 3차원 절리 모델 발생 프로그램의 개발

3차원 절리 모델의 개발을 위해서는 절리의 형상, 중심의 위치, 방향성, 크기를 결정해야 한다. 절리의 형상을 직접 관측하기는 거의 불가능하므로 일반적으로 타원형이나 원형, 사각형, 다각형을 가정한다(Dershowitz, 1988). 본 연구에서는 절리를 원형평판으로 가정하였다. 원형 모델은 장축과 단축의 구별이 없기 때문에 절리의 중심, 직경(크기), 방향성만 알면 모델링이 가능하다. 그리고 절리의 연결성을 파악할 때 수학적 접근이 용이한 장점이 있다. 절리의 중심의 위치는 포아송 분포를 따른다고 가정하였다. 즉 절리 중심의 위치는 상호 독립적으로 균등하게 분포함을 의미한다. 절리의 방향성은 Fisher 분포를 사용하여 발생시켰다. 절리의 직경은 직접적인 관측이 불가능하므로 노두나 굴착면에 나타난 절리 자취길이(trace length)를 이용하여 통계적으로 추정하였다.(Warburton, 1980; Villaescusa and Brown, 1992; Zhang and Einstein, 2000)

이상의 내용을 바탕으로 3차원 절리 모델 발생 프로그램 3DJG(3D Joint Generator)를 개발하였다. 프로그램 3DJG의 입력자료는 전처리 프로그램 JDP(Joint Data Preprocessor)의 결과 자료를 사용한다. 전처리 프로그램 JDP는 절리의 경사, 경사방향, 절리 자취길이를 입력받아 각 절리군별로 Fisher 분포의 군집도, 평균 경사와 평균 경사방향, 절리 직경의 분포와 평균, 표준편차를 출력한다. 본 연구에서는 Table 1의 절리 자료 중 전체 절리수가 60개인 경우를 이용하여 30m×30m×30m의 영역 내에 절리를 발생시켰다. 각 절리군에 20개의 절리를 발생시켜 본 결과는 다음의 Fig. 1과 같다.

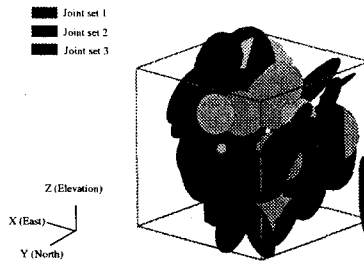


Fig. 1. Generation of three-dimensional joints in a volume of 30m×30m×30m.

3. 절리의 연결성 조사

절리 모델에서 지하수 유동을 분석하기 위해서는 발생된 절리들간의 연결성을 파악한 후 절리망을 만들어야 한다. 불연속성 암반에서의 지하수 유동은 투수성이 낮은 기질에서의 유동보다는 투수성이 큰 절리면을 따라서 주로 이루어지기 때문이다. 따라서 각각의 절리들 사이의 연결성을 찾는 일은 매우 중요하다. 절리들의 연결성을 조사하는 방법은 각각의 절리를 포함하는 평면의 방정식을 구하고 이 두 평면의 교선의 방정식을 구한다. 그리고 각각의 절리의 중심에서 교선까지의 수직거리가 절리의 반경보다 같거나 작다면 절리가 교차할 가능성을 가지게 되고 절리의 중심에서 교선까지의 수선 사이의 거리가 각각의 절리의 반경의 합보다 작게 되면 두 개의 절리는 교차하게 된다. 외곽 경계면과 절리와의 교점을 구하는 방법도 절리와 절리의 교점을 구하는 방법과 같다.

지금까지 구한 절리의 연결은 단지 2개의 절리가 교차하는지의 여부이다. 실제로 절리면을 따라 유체가 이동하기 위해서는 2개 이상의 절리가 연결되어야 하고 그 중 하나 이상의 절리는 경계면과도 연결되어야 한다. 따라서 2개 이상의 절리가 연결되고 경계면과의 연결성을 파악하는 일이 필요하다. 먼저 2개의 연결성을 가지는 절리에 대하여 행렬을 구성하고, 구성된 행렬로부터 2개 이상 연결된 절리를 선별하여 연결성이 없는 절리는 분석에서 제외시킨다. 그리고 경계와 만나지 않는 절리들도 제거한다.(고태영, 2000)

4. 3차원 절리 암반에서의 지하수 유동

(1) 절리망에서의 유체 유동

거친 절리면에서의 유체유동은 절리 간극의 변화에 의해 유동이 우세한 경로 즉, 채널(channel)을 따라 발생하게 된다. 다수의 절리가 분포하는 공간 속에서 이러한 유동 경로를 모두 직접 모델링하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 절리의 중심과 교차하는 2개의 절리의 교선의 중심을 연결하는 채널을 설정하여 하나의 절리로부터 연결된 인접절리로의 유동 경로를 대신토록 하였다. 각 채널이 연결되는 점을 노드(node)로 정의하고 노드와 노드사이를 요소(element)로 정의하여 절리망을 구성하였다

단일 절리에서의 유동과는 다르게 절리망에서의 유동은 각 채널이 연결되는 노드에서의 수두분포를 구해야 한다. 수두는 절리의 중심과 절리와 절리의 교선의 중점에서 발생하며 한 절리 내에서의 유입량과 유출량의 합은 0이 되어야 하는 조건으로부터 연결방정식을 구성하여 수두를 계산한다.

(2) 3차원 절리 암반의 수리전도도

절리 암반에서의 수리전도도는 절리의 기하학적인 분포 특성에 의해 불균질성 및 이방성을 갖게 된다. 본 전산 실험에서는 Table 1의 절리 자료를 이용하여 30m×30m×30m의 영역에 절리망을 발생시키고 이 절리 암반의 수리전도도를 구하였다. 절리 수의 증가에 따른 수리전도도의 변화 양상을 보기 위하여 절리를 30개, 60개, 90개로 증가시켜 발생시켰다.

경계조건은 수리전도도를 구하려는 방향에 수직인 면 양단에 각각 40m, 10m의 수두를 주었고 나머지 면에는 선형적으로 변하는 경계조건을 사용하였다.

(3) 3차원 절리 암반 내 터널의 지하수 유입량에 관한 전산 실험

터널 내부로 유입되는 지하수의 유량을 계산하기 위하여 Table 1의 절리 자료를 이용하여 30m×30m×30m의 영역에 절리망을 발생시키고 이 속에 직경 2m에서 10m까지의 원형터널을 정동방향(X축)으로 위치시켰다(Fig.2).

절리의 수와 지하수 유입량과의 관계를 살펴보기 위하여 절리의 수를 30개, 60개, 90개로 증가시켜 보았으며 터널 크기와 지하수 유입량과의 관계를 살펴보기 위하여 터널의 직경은 2m에서 10m까지 1m간격으로 증가시켰다.

Table 1. The geologic data used for joint network

Total number of joints	Joint set number	Number of joints in each set	Mean dip (°)	Mean dip direction (°)	Dispersion	Mean joint size (m)	Standard deviation of joint size (m)	Distribution of joint size
30	1	10	86.0	254.0	16.37	11.74	1.67	Lognormal
	2	10	48.3	15.7	23.72	8.66	5.61	Gamma
	3	10	70.2	329.2	24.01	6.18		Exponential
60	1	20	86.0	254.0	16.37	11.74	1.67	Lognormal
	2	20	48.3	15.7	23.72	8.66	5.61	Gamma
	3	20	70.2	329.2	24.01	6.18		Exponential
90	1	30	86.0	254.0	16.37	11.74	1.67	Lognormal
	2	30	48.3	15.7	23.72	8.66	5.61	Gamma
	3	30	70.2	329.2	24.01	6.18		Exponential

경계조건은 모델의 외부면에서의 수두는 모두 50m로 주었고 터널벽면에서의 수두는 높이에 의한 수두만 주었다.

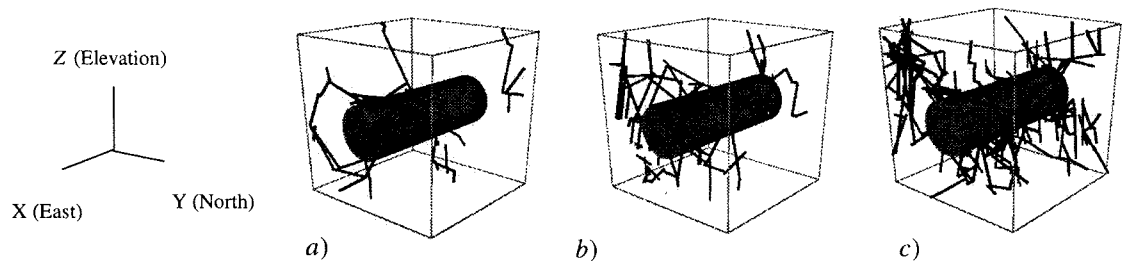


Fig. 2. Circular tunnel in the joint network. a) 30 joints. b) 60 joints. c) 90 joints.

절리의 수와 터널 크기의 증가에 따른 지하수 유입량의 변화는 Fig.3과 같다. 절리의 수가 증가하고 터널의 직경이 증가할수록 지하수 유입량도 증가하는 경향을 보였다. 또한 절리망 해석법에서는 터널 직경의 증가에 따라 터널 내부로 유입되는 지하수의 양이 연속적으로 증가하지 않는데 이는 터널과 교차하는 절리의 수가 연속적이며 선형적으로 증가하지 않기 때문이다.

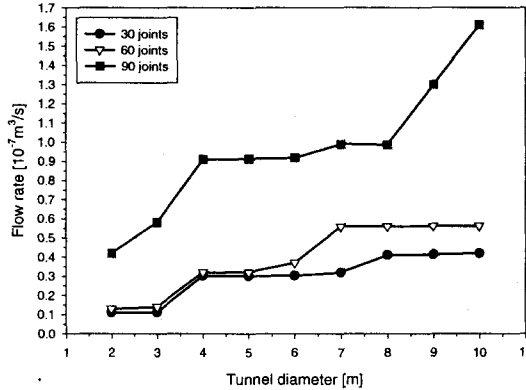


Fig. 3. Variation of flow rate with increasing tunnel diameter.

이상의 절리망 해석에서 얻어진 지하수 유입량을 이론해에 의한 지하수 유입량과 비교하였다. 이론해는 Goodman의 이론식(Zhang and Franklin, 1993)을 사용하였다. Goodman의 이론식은 터널의 단면은 원형이고 해저나 하저에 굴착한 연속등방의 반무한 매질에서 수리전도도가 등방성이라는 가정 하에서 2차원 해석에 사용되는 식으로 다음과 같다.

$$Q = \frac{2K_s \pi H_0}{\ln\left(\frac{4L}{d}\right)} \quad (1)$$

여기서 Q는 단위 길이 당 유입량, K_s는 등가 수리전도도, H₀는 정수압수두, L은 지표면으로부터 터널까지의 깊이, d는 터널의 직경이다. 경계조건으로 H₀=35m, L=15m를 사용하였고, 등가 수리전도도 K_s는 터널을 굴착하기 전의 절리망에서의 수리전도도 K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}의 평균을 사용하였으며 각각의 절리망 모델의 K_s값은 Table 2와 같다.

Table 2. The isotropic hydraulic conductivity K_s used for analytic solution

Total number of joints	K _{xx} [10 ⁻¹¹ m/s]	K _{yy} [10 ⁻¹¹ m/s]	K _{zz} [10 ⁻¹¹ m/s]	K _s [10 ⁻¹¹ m/s]
30	2.5	1.8	2.0	2.1
60	2.9	2.1	5.4	3.7
90	7.5	7.1	10.7	8.4

절리의 수가 30개인 경우 이론해에 의한 지하수 유입량이 절리망 해석에 의한 지하수 유입량보다 최소 1.6배에서 최대 3.72배까지 크게 나타났으며 절리의 수가 60개인 경우 이론해에 의한 지하수 유입량은 최소 1.92배에서 최대 5.22배까지 차이가 났다. 또한 절리의 수가 90개인 경우 이론해에 의한

지하수 유입량이 최소 1.86배에서 최대 3.88배까지 크게 나타났다. 이론해에 의한 방법과 절리망 해석에 의한 차이가 크게 나타났는데 이것은 이론해의 경우 등가 수리전도도를 사용하여 암반 내의 모든 부분에서 똑같은 수리전도도를 가진다고 가정하였기 때문에 터널 크기의 증가에 따라 연속적인 지하수 유입량의 증가를 보였다. 그러나 절리망 해석법은 암반 내의 절리가 터널과 교차할 때만 지하수 유입이 생기고 모든 절리가 터널과 교차하는 것이 아니기 때문에 이론해보다 더 적은 지하수 유입량이 발생한 것으로 해석된다.

따라서 본 연구에서 사용된 Goodman의 이론식을 3차원에서 적용하기 위해서는 등가 수리전도도 값을 보정해야 한다.

보정의 정도를 알아보기 위하여 등가 수리전도도 값을 90%부터 10%까지 감소시켜 이론해에 적용시켰다. 이렇게 해서 구한 이론해의 결과와 절리망 해석에 의한 결과의 차이가 최소가 되는 등가 수리전도도의 보정비율을 찾아 보았다. 즉, 최소 자승 근사법(least squared approximation)에 기초하여 절리망 해석에 의한 지하수 유입량과 이론해에 의한 지하수 유입량의 차의 제곱의 합이 최소가 되는 점을 찾아 보았다. 그 결과 절리의 수가 30개인 모델에서는 등가 수리전도도 값을 50% 감소시켰을 때 이론해와 절리망 해석에 의한 차이가 가장 적었으며 절리의 수가 60개, 90개인 모델에 대해서는 각각 62%, 59% 감소시켰을 때 차이가 가장 적었다. Fig. 4는 보정된 이론해와 절리망 해석에 의한 차이가 최소가 되었을 때의 결과이다. 따라서 Goodman의 이론식을 3차원 문제에 적용할 경우에는 터널 굴착 이전의 절리망에서 구한 등방성 수리전도도를 62%에서 50% 감소하여 사용할 것을 제안한다.

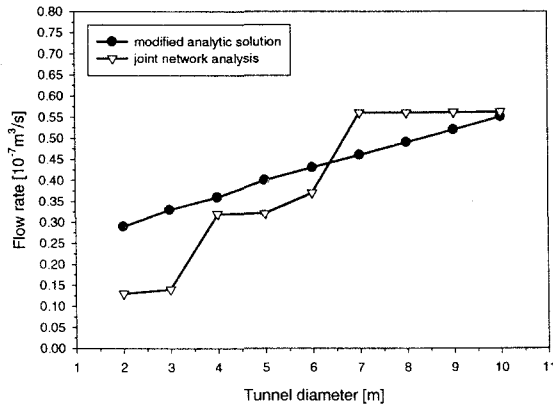


Fig. 4. Variation of flow rate with increasing tunnel diameter in the case of 60 joints by reducing the isotropic hydraulic conductivity by 62%.

5. 결론

본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 절리의 형태, 중심, 방향성, 크기를 통계학적으로 발생시킬 수 있는 3차원 절리 모델 발생 프로그램을 개발하였다.
2. 절리의 연결성 조사를 통하여 상호 연결된 절리들의 교차점을 찾는 방법을 수학적으로 구현하였고 지하수 유동에 필요한 절리만을 선택하는 방법을 제시하였다.
3. 상호 연결된 절리들의 교차점의 중점과 절리의 중점을 연결하는 절리망을 이용하여 절리 암반에서의 수리전도도를 예측하였다.
4. 절리망 해석에 의하여 터널 내로 유입되는 지하수의 양을 예측하였다. 절리망 해석법은 암반 내의

절리가 터널과 교차할 때만 지하수 유입이 생기고 모든 절리가 터널과 교차하는 것이 아니기 때문에 이론해보다 더 적은 지하수 유입량을 나타내었다. Goodman의 이론해를 3차원 문제에 적용할 경우 터널 굴착 이전의 절리망에서 구한 등가 수리전도도 값을 낮추어 사용해야 한다. 등가 수리전도도를 62%에서 50% 감소하여 사용했을 때 이론해에 의한 지하수 유입량과 절리망 해석에 의한 지하수 유입량의 차이를 최소화 시킬 수 있었다.

6. 참고문헌

1. 고태영, 2000, 3차원 절리망에서의 지하수 유동에 관한 연구, 석사학위 논문, 한양대학교, 서울.
2. Dershowitz, W. S. and Einstein, H. H., 1988, "Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 21, pp. 21-51.
3. Villaescusa, E. and Brown, E. T., 1992, "Maximum Likelihood Estimation of Joint Size from Trace Length Measurements," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 25, pp.67-87.
4. Warburton, P. M., 1980, "A Stereological Interpretation of Joint Trace Data," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, pp. 181-190.
5. Zhang, L. and Einstein, H. H., 2000, "Estimating the Intensity of Rock Discontinuities," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 37, pp. 819-837.
6. Zhang, L. and Franklin, J. A., 1993, "Prediction of Water Flow into Rock Tunnels: an Analytical Solution Assuming and Hydraulic Conductivity Gradient," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 1, pp. 37-46.

주요어 : 3차원 절리 모델, 지하수 유동, 절리망 해석, 절리 암반의 수리전도도, 터널 내 지하수 유입량

- 1) 한양대학교 지구환경시스템공학과 석사
- 2) 한양대학교 시스템응용공학부 교수