

## 불연속면의 기하학적 특성과 절리암반의 수리-역학적 거동에 관한 연구

이승도<sup>1)</sup>, 이영숙<sup>2)</sup>, 문현구<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Imperial College, <sup>2)</sup>한양대학교

### 1. 서론

암반공학의 많은 주제들은 절리암반을 대상으로 하며, 특히 공학적 프로젝트의 주요 관심이 지하수 유동에 관련되어 있을 때에는 불연속면의 특성과 수리적 거동을 이해하는 것이 매우 중요하다(Lee, 2002). 이러한 과제들은 새로운 것이 아니지만, 일반적인 해석 방법이 존재하지 않는 것도 사실이다. 실제로 이 두 주제에 관한 국제적인 연구와 더불어 많은 서적, 연구 논문 등이 발표되고 있어(Cook, 1992), 국내의 지하구조물 설계에 수반되는 수리학적 문제를 파악하고 해결하기 위해서는 불연속면 특성의 정량화와 이를 바탕으로 한 절리의 수리-역학적 거동을 이해하여 공학적 설계에 적용할 수 있는 방향에 대한 연구가 필요하다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 절리암반을 '절리면들에 의해 절단된 암반으로써 신선하고 불투성 암석의 다각형 블록의 집합체'로 정의하였다. 실제로 암반은 수많은 절리를 포함하고 있으며 다양한 방향성을 가지기 때문에 그림 1과 같이 서로 교차하여 복잡한 기하학적 구조를 나타낸다. 이 때 절리암반이 포함할 수 있는 암반블록의 수는 불규칙적이며, 다양한 기하학적 구조가 적절히 다루어지면 불연속면의 특성과 모델링 구현에 도움이 될 수 있다. 또한 상기된 정의에서 신선한 암석은 그 내부에 절리를 포함하지 않는 단일 블록으로 정의되어 불투성 암반은 단일 블록 내부에 유체의 유동이나 저장이 가능하지 않다고 간주하였다. 이러한 정의에 입각하여, 본 연구는 불연속면을 절리암반의 유체유동의 경로로 가정하고 역학적 거동을 결합한 단일 절리와 절리망 모델을 개발하여 수리-역학적 전산실험을 수행, 그 결과를 분석하였다.



그림 1. 절리암반의 예

## 2. 절리암반의 특성 및 유동거동의 주요 인자

### 2.1 절리암반의 정량적 특성

단일 절리는 두 개의 평탄하지 않은 면과 그 사이의 공간으로 구성되며, 각각 절리면의 거칠기와 간극분포로 특징지을 수 있다. 이를 측정하기 위하여 다양한 실험적 방법이 시도되었으나 현재까지는 양질의 자료를 제공하지 못하고 있다. 그러나, 이러한 시도를 통해 절리 자체의 정량적 특성에 대한 이해가 향상되었으며 거칠기(높이) 분포는 정규분포를 따르고 간극 분포는 정규분포 또는 로그정규분포를 따른다는 점이 본질적으로 중요한 단일 절리의 정량적 특성이다. 또한, 거칠기(높이) 및 간극 분포는 공간적으로 상관관계가 있어 단일 절리의 특성을 파악하기 위해 통계적 함수가 사용될 수 있음을 제시되기도 하였다. 이러한 시도들은 직접적으로 측정된 절리와 등가인 인공 절리를 통계적으로 발생시키는 데 적용될 수 있어 단일 절리의 수리-역학적 모델의 기본적인 요소가 된다(Lee, 2002). 인공 절리를 발생시키기 위하여 본 연구에 사용된 방법은 다음과 같다.

- (1) 공간적으로 독립적인 uniform distribution의 무작위 변수를 발생시킨다.
- (2) 발생된 변수를 원하는 분포형태(정규, 로그정규 등)로 변환한다.
- (3) 상관관계 함수를 사용하여 공간적으로 상관관계를 부여한다.

통계적 방법에 의한 단일 절리의 발생과 유사한 과정을 통하면 특정한 확률분포들을 가정한 절리도를 발생시킬 수 있다. 이는 암반에 존재하는 절리의 기하학적 성질들을 다양한 통계적 분포들에 연결시키려는 연구를 통한 것으로 이러한 방법은 적합한 확률분포를 가정할 경우 자료의 대표값으로 전체의 경향을 단순화하는 결정적 모델에 비하여 현장 조건을 보다 충실하게 반영할 수 있을 것이다(송명규 등, 1994). 따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 전체와 가정 하에 절리도를 발생시켰다(이근채, 1992).

- (1) 주어진 2차원 영역 내에서 각 절리의 중심점은 균등하게 분포하며, 그 분포는 포아송 분포 함수를 따른다. 이때 절리의 간격은 음지수분포를 따른다.
- (2) 절리의 길이는 주어진 평균과 표준편차에 대하여 로그정상분포를 따른다.
- (3) 절리의 방향성은 평균 절리 방향을 수직 방향으로 놓았을 때, 이 방향에 대한 각 절리의 사잇각의 코사인 값과 1의 차이가 정상분포를 한다. 경사 방향은  $[0^\circ, 360^\circ]$  범위에서 균등하게 분포한다.
- (4) 절리의 길이와 간격은 절리의 방향성에 대해 독립적이다.
- (5) 각 절리의 발생은 상호 독립적이다.

### 2.2 절리암반의 유동거동

서론에서 논의된 절리암반의 정의로부터 절리를 통한 유체유동이 절리암반의 수리학적 거동을 지배하는 중요한 요소임을 알 수 있다. 따라서, 유동거동을 지배하는 절리와 환경적 특성을 파악하는 것이 타당할 것이다. 그림 1의 예에서와 같이 복잡한 절리의 기하구조로 인해 외부로부터의 유량이 충분할 경우 유체유동은 연결된 여러 개의 (단일) 절리를 통해 발생한다. 본 연구에서는 발생된 절리도에서 연결되지 않은 절리를 제거한 것을 절리망이라 하였고, 그 연결도(connectivity)는 다음과 같은 절리 자체의 특성에 의해 영향을 받는다.

- (1) 절리의 수: 절리의 수가 증가하면 절리의 교차 확률이 증가
- (2) 절리의 길이: 절리의 길이가 길수록 절리의 교차 확률이 증가
- (3) 절리의 방향성: 불규칙한 방향성의 절리들이 평행한 절리들보다 교차 확률이 큼
- (4) 절리의 간극: 절리의 간극이 증가할수록 유체유동이 증가

앞의 세 가지 요소는 절리망의 기하학적 특성에 의존하며 절리의 간극은 유체의 유동 관계식에 직접적인 관련이 있다. 이러한 절리의 특성에 더불어 절리망과 독립적으로 볼 수 있는 외부의 환경적 요소는 다음과 같다.

- (1) 초기 응력상태: 수직응력 증가로 간극이 감소하여 유체유동 감소;  
전단변형이 발생하면 간극 증가
- (2) 수리구배: 수두의 차이로 인해 유체의 유동이 발생
- (3) 지하수 공급: 절리망 내로 지속적인 유체의 유입이 없으면 배수로 인해 유동 중단

### 3. 절리암반의 수리-역학적 모델

#### 3.1 단일 절리의 수리-역학적 모델

단일 절리의 수리-역학적 모델을 개발하기 위해서는 인공절리의 모사가 필요하며, Lee (2002)는 공간적으로 상관관계가 있는 단일 절리를 자동 상관관계 함수를 사용하여 정규분포의 거칠기(높이) 분포와 로그 정규분포의 간극 분포를 그림 2와 같이 발생시켰다. 발생된 절리 모델에서의 수리학적 해석을 위해서는 유한차분법을 사용하여 압력구배로 인한 간극 내 유체의 흐름 및 압력분포를 계산할 수 있다. 이 때, 삼승근 법칙(cubic law)이 국부적으로 타당하다고 가정하면(Zimmerman & Bodvarsson, 1996) 각각의 유한차분 요소에서의 유체 흐름에 대한 저항을 결정한 뒤 반복법을 통해 계산할 수 있다.

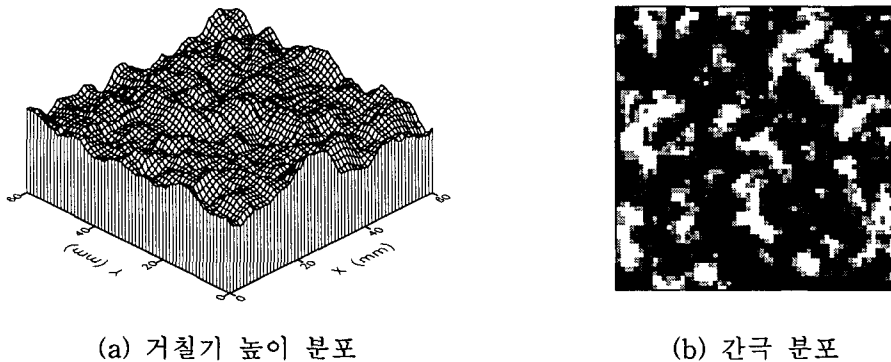


그림 2. 단일 절리의 발생

수직응력이 작용하는 절리의 수직변형 거동을 모사하기 위하여 절리 표면의 변형을 동일 반경의 원기둥의 압축과 반공간(half-space)의 탄성 변형의 중첩으로 결정하였다(이승도, 2002a). 이를 도시화하면, 그림 3a와 같이 간단한 절리 모델에서 접촉지점과 거칠기(높이)의

위치에 따라 변형의 양상이 달라짐을 알 수 있다. 그림 3b는 간단한 절리면이 전단거동에 의해 개별 돌출부가 변형을 일으키고 추가 접촉부가 발생하여 한계 평형 조건을 만족시키는 것을 도시화 한 것으로 절리의 변형을 탄성이라 가정하면 수직변형과 전단변형의 중첩이 가능하다(이승도, 2002b).

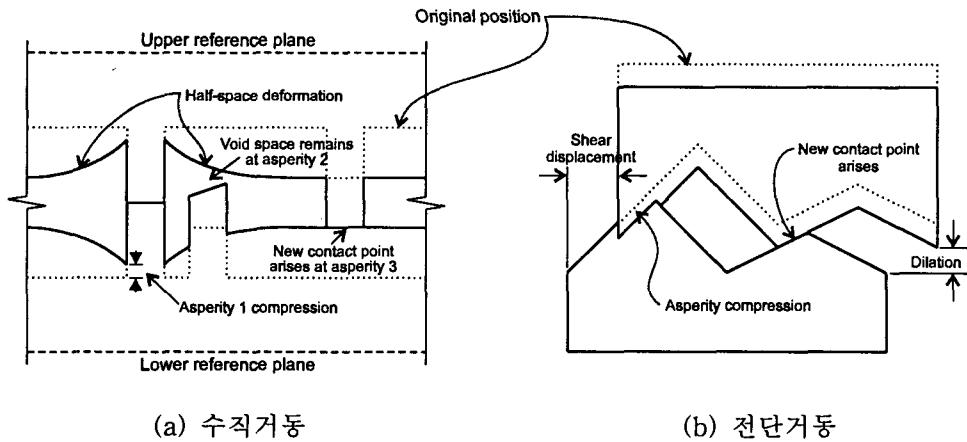
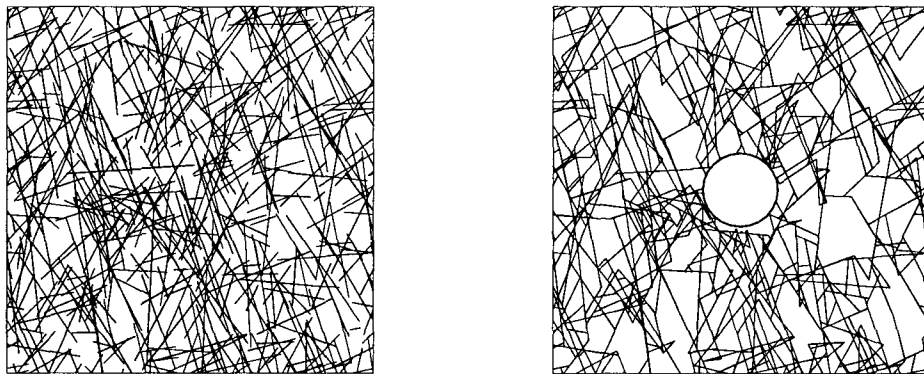


그림 3. 단일 절리의 수직·전단 거동

### 3.2 수리-역학적 절리망 모델

절리암반에서 유체의 흐름은 서로 연결된 절리를 주된 경로로 하기 때문에 발생한 절리도(그림 4a)로부터 서로의 연결성을 분석해야 한다. 또한 지하 구조물 건설에 의한 내부 유입량을 계산할 때에는 절리망에서 굴착될 공동부분의 절리를 제거하고 절리와 공동벽면의 교차여부를 판단하여야 한다(그림 4b).



(a) 절리도 (b) 절리망, 원형 공동

그림 4. 절리망 모델의 예

일반적인 절리망 해석의 경우 발생한 절리의 간극을 일정하다고 가정하여 수리해석을 실시하지만, 수리-역학적 관계를 고려한다면 공동의 굴착에 의한 응력의 변화에 영향을 받아

절리의 간극은 열리거나 닫힐 수 있다. 이러한 응력변화에 기초한 간극의 변화는 공동의 형상과 초기 응력조건이 간단할 경우에 있어 응력-변형 관계식을 이용하여 유도할 수 있다. 즉, 2차원 평면에서 원형공동의 굴착에 의한 초기응력의 변화( $[\sigma_K]$ )는 Kirsch 해로 구할 수 있으며, 공동에 인접하여 절리가 존재할 때(그림 5) 절리의 한 지점에 작용하는 응력  $[\sigma^*]$ 은 다음과 같이 결정된다(Priest, 1993).

$$[\sigma^*] = [R][\sigma_K][R]^T = \begin{bmatrix} \sigma_{mm} & \sigma_{mn} \\ \sigma_{mn} & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $[R]$ 은  $m-n$  시스템과  $r-\theta$  시스템과의 회전행렬이다. 이러한 응력의 변화로부터 원형 공동의 굴착에 의한 절리의 수직응력의 변화를 계산할 수 있으며 절리의 수직강성 대 탄성계수의 비( $K_J/E$ )를 0.4 /cm로 가정한다면(Bai 등, 1993) 간극의 변화( $\Delta e$ )는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta e = \frac{\Delta \sigma}{K_J} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta \sigma = \sigma_{nn}^{ini} - \sigma_{nn}$ 이고  $\sigma_{nn}^{ini}$ 은 초기응력에 의해 작용하는 절리면의 수직응력이다. 따라서 원형 공동의 굴착에 의한 최종 간극은  $e = e_{ini} + \Delta e$ 로 결정할 수 있다. 또한 절리의 거칠기를 포함한 실제의 절리를 평행한 평판으로 치환하여 해석을 수행하기 위해 Barton 등(1985)의 실험적 관계식을 통해 절리의 수리적 간극을 계산하였다.

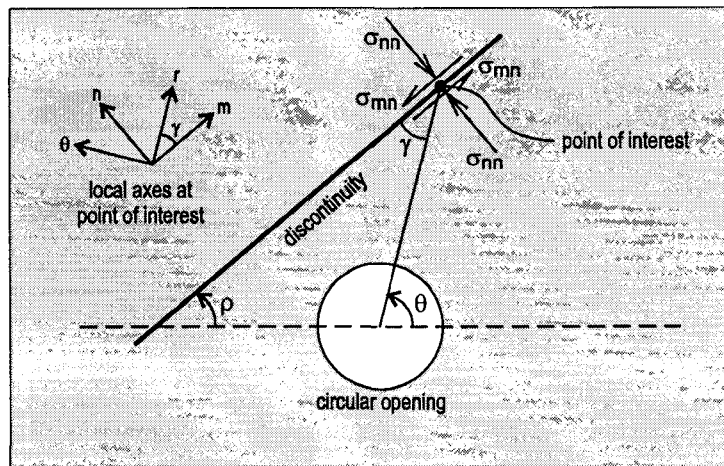


그림 5. 원형 공동에 인접한 단일 절리에 작용하는 응력도

#### 4. 전산실험 및 결과해석

##### 4.1 단일 절리의 수리-역학적 거동

단일 절리의 수리-역학적 거동을 분석하기 위하여 1 mm 간격의 60 mm × 60 mm 정규 격자에 절리를 발생시켰으며 사용된 물성은 화강암으로 가정하여 탄성계수 60 GPa와 포아

송 비 0.25이고 초기 평균 간극과 접촉 면적은 각각  $200 \mu\text{m}$ 와 1 %이다. 수리 경계 조건은 좌측과 우측 경계에는 압력조건, 상·하부에는 no-flow 조건을 적용하였으며 전단거동 시 수직응력이 4 MPa에서 50 MPa로 증가하는 응력 경계 조건을 적용하였다.

그림 6a는 절리의 수리간극과 수직응력의 관계를 보여주는 그래프로써 수직응력 적용시 초기에 수리간극이 빠르게 감소하는 결과를 보여주고 있다. 수치해석 결과, 간극분포의 공간 상관길이 증가함에 따라 수리간극의 변화가 더욱 커져서 매우 높은 수직응력의 조건에서는 간극분포의 공간 상관길이 작은 경우가 반대의 경우보다 절리의 투수도가 상대적으로 커짐을 알 수 있다. 그림 6b는 전단변형에 따른 수리간극을 나타낸 것으로, 작용하는 수직응력이 크지 않을수록 전단변형에 의한 수리간극의 증가가 현저하여 단일 절리의 투수계수는 전단변형에 의한 팽창(dilation)의 영향을 크게 받은 것을 알 수 있다.

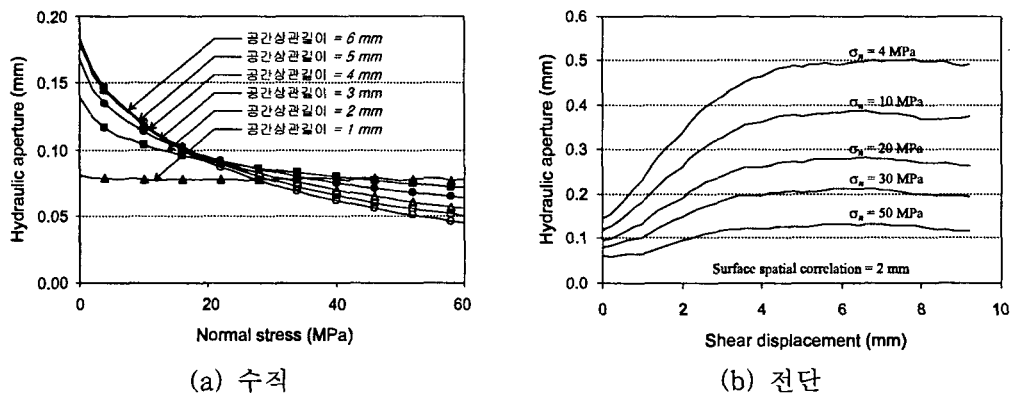
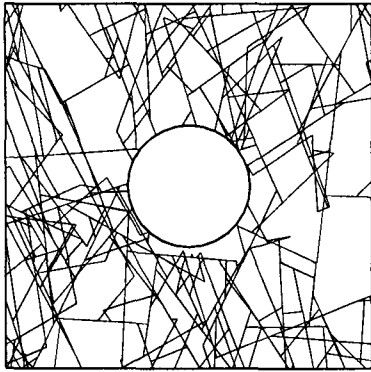


그림 6. 단일 절리의 수직·전단 거동

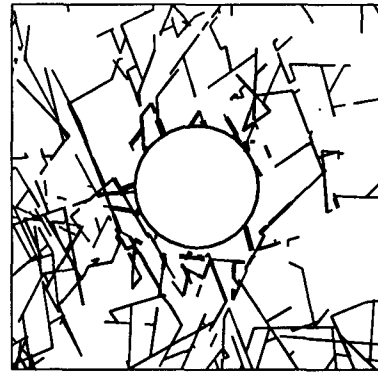
## 4.2 절리망 모델

지하공동 굴착 후 간극의 변화 양상을 조사하고, 단일 간극과 가변 간극일 경우에 공동 내부로 유입되는 유량을 분석하기 위하여 그림 4와 같이  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  크기의 단면에 3개의 절리군을 가지는 절리도를 발생시키고 직경 10 m인 원형 공동이 200 m의 심도에 굴착되었다고 가정하였다. 사용된 물성은 탄성계수와 초기 역학적 간극이 각각 10 GPa과 1 mm 이고, JRC는 Barton 등(1985)이 실험적으로 제시한 식에서 수리적 간극이 역학적 간극보다 작아야 하므로 16과 17을 사용하였으며, 축압계수는 0.25, 0.5, 0.75, 1을 사용하였다.

그림 7a는 절리의 간극이 균일할 때의 절리망이고, 그림 7b는 원형 공동의 굴착에 의한 응력 재분포에 따라 절리 간극이 변화했을 때의 절리망이다. 해석 결과, 간극의 변화가 가장 큰 곳은 원형 공동 주변인 것으로 나타났는데, 이는 변형과 응력변화가 공동 주변에서 가장 크다는 사실과 부합한다. 그리고 축압계수가 0.75이상일 때 가변 간극일 경우의 지하수 유입량이 단일 간극일 경우보다 적었으며 JRC가 클수록 지하수 유입량이 적었다. 총 간극의 부피는 단일 간극에 비해 가변 간극일 경우가 축압계수에 관계없이 증가하였다.



(a) 수리학적 해석



(b) 수리-역학적 모델

그림 7. 절리망 모델의 수리-역학적 거동

본 연구는 단일 절리와 2차원 절리망 모델을 사용하여 절리암반의 수리-역학적 거동을 분석하고자 시도하였다. 개발된 모델을 기초로 지하구조물 설계에 있어 보다 현실적인 해석을 수행하기 위해서는 앞으로는 그림 8과 같은 3차원 절리망(고태영, 문현구, 2001)의 수리-역학적 거동을 해석하려는 시도가 이루어져야 할 것이다.

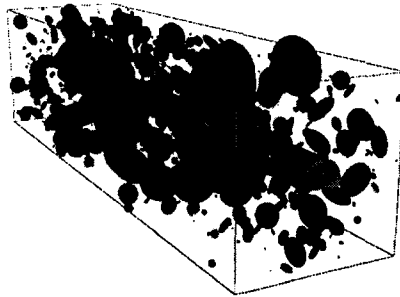


그림 8. 3차원 절리망 모델의 예

## 5. 결론

단일 절리와 절리암반의 수리-역학적 거동을 분석하기 위해 통계적으로 발생된 절리의 수리-역학적 모델을 개발하였다. 절리암반에 작용하는 역학적 경계조건에 의한 수리학적 거동을 분석하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수직응력을 받고 있는 단일 절리의 투수성은 수직응력이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하였으며, 특히 간극의 공간 상관길이가 증가할수록 수리간극의 감소 구배가 증가하는 것으로 나타나 절리의 투수성이 수직응력 및 간극의 지하구조에 의존하는 것으로 나타났다.
- (2) 단일 절리의 투수성은 전단변형에 의해 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 경계조건인 수직응력이 증가함에 따라 절리의 투수성이 증가율이 감소하였다. 이는 응력 경계조건과 절리의 거칠기에 의한 팽창(dilation)과 관련이 있는 것으로 사료된다.

- (3) 수리-역학적 절리망 모델의 경우 원형 공동 굴착 후 절리의 간극이 공동 주변에서 증가하였고 공동과 멀어질수록 간극이 감소하는 경향을 보였다. 특히 간극의 변화가 공동 인접부에서 가장 큰 것으로 나타났으며 간극의 변화(열림과 닫힘)에 의해 새롭게 형성된 열린 간극의 절리망을 통한 유체의 유동이 우세한 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 굴착에 의한 응력의 재분포를 고려한 수리-역학적 절리망 해석 결과, 지하수 유입량은 측압계수에 따라 증가 또는 감소하였다. 이는 측압계수와 절리망의 기하학적 특성에 따라 간극이 열리고 닫히는 정도가 달라졌기 때문으로 사료된다. 또한 본 연구를 통해 측압계수가 절리암반의 수리학적 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 보다 정량적 해석이 필요함을 시사한다.

본 연구를 기초로 절리암반의 3차원 절리망의 수리-역학적 모델 개발이 이루어 질 수 있을 것이다. 이와 더불어 유동방정식의 개선과 굴착교란지역(EDZ), 다양한 기하학적 경계조건 및 굴착조건을 구현을 통해 보다 현실적인 지하구조물의 공학적 설계가 가능할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. 고태영, 문현구, 2000, 3차원 절리망에서의 지하수 유동에 관한 연구, 한국자원공학회지 38.3, 178-187.
2. 송명규, 주광수, 문현구, 1994, 암석절리와 균열망 내에서의 채널흐름에 관한 이론적 수치해석적 연구, 한국암반역학회지 4.1, 1-16.
3. 이근채, 1992, 통계적 절리구조 모델링과 지하공동 안정성 평가에의 적용, 한양대학교 석사학위 논문.
4. 이승도, 2002a, 간극의 기하학적 특성이 절리의 수직변형 및 투수성에 미치는 영향에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 12.4, 304-311.
5. 이승도, 2002b, 거칠기가 절리의 전단거동 및 투수성에 미치는 영향에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 12.4, 312-320.
6. Bai, M., D. Elsworth and J.-C. Roegiers, 1993, Modeling of naturally fractured reservoirs using deformation dependent flow mechanism, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30, 1185-1191.
7. Barton, N., S. Bandis and K. Bakhtar, 1985, Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, 121-140.
8. Cook, N.G.W., 1992, Natural joints in rock: Mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 29, 198-223.
9. Lee, S.D., 2002, A study of the influence of surface and void geometry on the hydro-mechanical behaviour of rock fractures, Ph.D. thesis, Imperial College, London.
10. Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London.
11. Zimmerman, R.W. and G.S. Bodvarsson, 1996, Hydraulic conductivity of rock fractures, Transport in Porous Media, 23, 1-30.