

# FLAC3D를 이용한 3차원 불연속균열망(DFN)모델에서의 수리해석

박정찬<sup>1\*</sup>, 김진섭<sup>2</sup>, 이창수<sup>2</sup>, 김건영<sup>2</sup>, 권상기<sup>1</sup>

<sup>1</sup>인하대학교, 인천광역시 남구 인하로 100

<sup>2</sup>한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*parkjungchan@hotmail.com

## 1. 서론

암반 내의 지하수의 유동은 암반블럭 자체를 투과하기 보다는 대다수 암반의 불연속면을 통해서 이동한다. 따라서 불연속면의 특성은 암반의 수리적인 거동에 큰 영향을 미친다. 암반의 수리적인 특성은 방사성폐기물처분장이나 터널과 같은 지하 구조물의 거동과 안정성에 큰 영향을 미친다. 따라서 지하 구조물의 안정성 평가 및 장기간의 거동파악을 위해서는 모델링을 통한 예측 및 해석과정이 필요하다.

실제 암반은 절리(joint), 층리(bedding), 단층(fault) 등과 같은 다양한 불연속면이 존재하므로, 불연속암반을 실제와 근접하게 모사하기 위해서는 불연속체 해석이 요구된다. 본 연구에서는 FLAC 3D 코드를 통해서 암반의 3차원 불연속균열망의 모사 및 수리해석의 과정을 간략히 설명하고자 한다.

## 2. 본론

FLAC3D는 ITASCA<sup>TM</sup>에서 개발된 유한차분법(FDM)을 이용한 해석 프로그램이다. 토목, 광산 등의 분야에서 지반 및 암반의 거동 해석에 널리 사용되고 있으며, 역학 계산을 비롯하여 동적, 열적 및 유체해석이 가능한 코드이다.

### 2.1 FLAC3D 코드에서 3차원 DFN망 구성

불연속균열망(Discrete Fracture Network, DFN)은 불연속면의 방향, 밀도, 크기 등의 통계적인 자료를 이용하여 불연속암반을 모사하는 추계학적인 모델링 기법이다. 따라서 실제 불연속암반을 모사하는데 가장 적합하다고 보고되고 있다. FLAC3D Version 5.0에서는 DFN모듈을 통해서 3차원의 DFN망 구성이 가능하다. FLAC3D에서 DFN망을 구성하는 과정은 Fig. 1에서와 같이 불연속면의 방향성, 크기, 밀도에 관한 통계적인 분포 모델을 설정하게 되면 원판형태(disc)의 절리들이

생성되게 된다. 그 이후 생성된 절리들의 위치에 해당되는 요소(element)가 선택되어, 각 요소에 원하고자 하는 절리의 물성을 각각 입력할 수 있다.

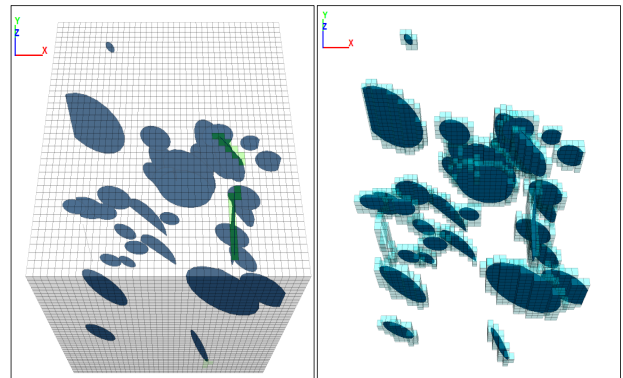


Fig. 1. 3D DFN model in FLAC3D.

### 2.2 DEM코드와 유입유량 비교

FLAC3D 자체는 3차원 연속체 해석코드이므로, DFN모듈을 통한 해석의 결과가 얼마만큼 신뢰도를 보이는지 확인할 필요성이 있다. 따라서 불연속체 해석에 널리 사용되고, 암석블록 및 절리의 역학적인 거동을 모사하는데 강점을 가지는 개별요소법(DEM)코드인 3DEC코드와의 결과를 비교하였다.

#### 2.2.1 모델 형상 및 경계조건

해석영역은  $20 \times 20 \times 20$  m로서 절리의 방향이  $90^\circ$ 와  $180^\circ$ 로 교차된 절리를 생성하였고, 실제 방사성폐기물 처분장의 조건을 고려하여 직경 2 m, 길이 8 m인 시추공이 지하 500 m에 위치한다고 가정하였다. 모델의 경계는 고정하였고, 모델의 경계부의 공극수압은 정수압구배(hydro-static pressure gradient)를 고려하여 선형적으로 해당심도의 격자에 각각 부여하였다. 즉 모델 상단에는 4.9 MPa과 모델 하단에는 5.1 MPa의 공극수압이 설정되었다. Fig. 2와 같이 FLAC3D와 3DEC에서 동일한 형상과 경계조건을 부여하여, 시추공으로 유입되는 유입유량을 비교하였다.

## 2.2.2 각 모델에서의 유입유량계산을 위한 입력값

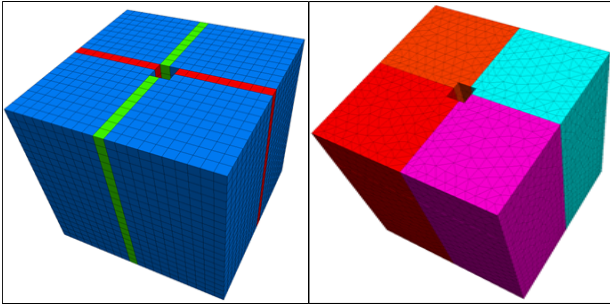


Fig. 2. Comparison between FLAC3D and 3DEC.

3DEC 코드에서는 불연속면의 간극(aperture)이 입력값으로 요구된다. 방향이 90°인 절리는 초기간극이 30  $\mu\text{m}$ 로 방향이 180°인 절리는 초기간극이 50  $\mu\text{m}$ 로 가정하였다. FLAC3D에서는 요소의 투수계수가 입력값이 된다. 그러므로 Navier-Stokes의 식을 통해서 해당 불연속면의 간극의 투수계수를 계산하여 FLAC3D의 투수계수의 입력값으로 사용하였다. 식(1)은 Navier-Stokes의 지배방정식이다.

$$q_i = -\frac{u^3 \rho g}{12\mu} \phi = -k_H \phi \quad (1)$$

여기서  $q_i$ 는 불연속면의 단위길이 당 유량,  $\mu$ 는 유체의 점성도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $u$ 는 불연속면의 간극,  $\phi$ 는 수두,  $k_H$ 는 수리전도도를 의미한다.

식(1)를 통해서 다음의 식(2)의 단일 절리의 투수계수를 계산할 수 있게 된다.

$$\text{permeability of a single fracture} = \frac{u^2}{12} \quad (2)$$

## 2.2.3 Smearred fracture model in FLAC3D

FLAC3D 코드는 연속체모델 기법으로서 요소단위로 물성을 입력하게 된다. 하지만 DFN 모델을 이용하기 위해서는 절리가 존재하는 요소의 투수계수는 암반과 절리의 투수계수 각각에 대한 반영이 요구될 것이다. 따라서 Fig. 3과 같이 한 요소에 절리가 존재한다고 가정하면, 그 요소의 투수계수는 식(3)과 같이 가중평균을 이용하여 해당 요소의 투수계수를 계산하여 이 값을 입력하였다.

$$K_e = \frac{K_f \cdot V_f + K_m \cdot V_m}{V_e} \quad (3)$$

여기서  $K_e$ 는 요소의 투수계수,  $K_f$ 는 불연속면의 투수계수,  $K_m$ 은 암석의 투수계수,  $V_f$ 는 불연속면의 부피,  $V_m$ 은 암석의 부피,  $V_e$ 는 요소전체의 부피를 의미한다.

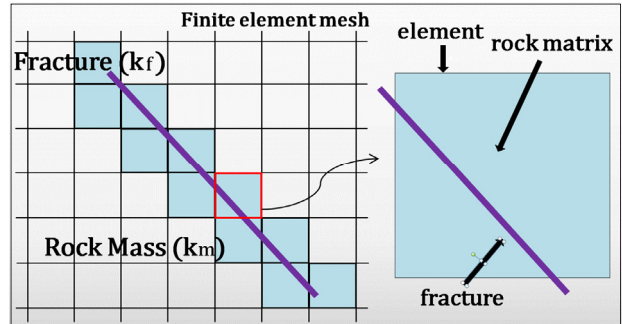


Fig. 3. Smearred fracture model.

해석결과, 3DEC 코드에서의 시추공으로 유입되는 유량은 14.616 Liter/Min이고, FLAC3D에서의 결과는 14.542 Liter/Min으로서 결과가 거의 일치함을 확인하였다.

## 3. 결론

FLAC3D코드에서 불연속암반의 수리해석을 실시하였다. 3차원 DFN모델을 구성하여 시추공으로 유입되는 유입유량 계산을 위한 코드를 개발하였다. 신뢰성 검증을 위해 대표적인 불연속체 해석코드인 3DEC의 결과와 비교한 결과 동일함을 확인하였다.

## 4. 감사의 글

이 논문은 한국원자력연구원의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 5. 참고문헌

- [1] 박정찬, 박승훈, 김하영, 김건영, 권상기, 2015, "암반의 3차원 불연속균열망(DFN)에 관한 민감도분석", 한국암반공학회지, 25(4).
- [2] Ivars, D. M., 2006, Water inflow into excavations in fractured rock-a three-dimensional hydro-mechanical numerical study, international journal of rock mechanics and mining sciences 43(5), 705-725.
- [3] Itasca Consulting Group Inc., 2013, 3DEC Manual.