

## 절리간극의 변화가 이차원 DFN 시스템의 수리적 특성에 미치는 영향 한지수, 엄정기\*

### Effect of Joint Aperture Variation on Hydraulic Behavior of the 2-D DFN System

Jisu Han, Jeong-Gi Um\*

**Abstract** A computer program code was developed to estimate hydraulic behavior of the 2-D connected pipe network system, and implemented to evaluate the effect of joint aperture on hydraulic parameters of fractured rock masses through numerical experiments. A total of 216 stochastic 2-D DFN(discrete fracture network) blocks of 20 m×20 m were prepared using two joint sets with fixed input parameters of joint orientation, frequency and size distribution. Two different cases of joint aperture variation are considered in this study. The hydraulic parameters were estimated for generated 2-D DFN blocks. The hydraulic anisotropy and the chance for equivalent continuum behavior of the DFN system were found to depend on the variability of joint aperture.

**Key words** Fractured rock mass, Hydraulic aperture, Discrete fracture network, Block hydraulic conductivity, Numerical experiments

**초 록** 본 연구는 절리의 수리간극의 변화가 절리암반의 수리상수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 등가유로관 연결구조에 기반을 둔 이차원 DFN(discrete fracture network) 유체유동 해석 프로그램 코드를 개발하고 수리간극 변화를 고려한 수치실험을 수행하였다. 수치실험에 사용된 이차원 DFN 시스템은 두 절리군을 사용하여 절리의 방향성, 빈도 및 길이분포를 고정하고 절리의 수리간극을 절리군별로 서로 다른 일정한 값을 갖는 경우와 수리간극이 확률분포 특성을 갖는 경우를 고려하였다. 추계론적으로 생성한 총 216개의 20 m×20 m DFN 블록에 대하여 블록수리상수가 산정되었다. 수리간극의 변동성은 이차원 DFN 시스템의 이방성 및 등가연속체 취급 가능성에 유의미한 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

**핵심어** 절리암반, 수리간극, 불연속절리망, 블록수리전도도, 수치실험

## 1. 서 론

절리암반에서 매질의 특성에 따른 유체의 거동 양상을 파악할 수 있는 효과적인 방법 및 절차를 수립하는 것은 암반공학 분야의 주요 과제 중 하나이다. 현재까지 절리암반의 유체유동 특성을 평가함에 있어서 연속체 해석기

법의 적용이 주를 이루고 있다. 최근 들어 이중공극(dual porosity) 및 불연속절리망(DFN; discrete fracture network) 해석기법이 도입되었으나 현장 적용 시 해석 규모와 관련된 여러 가지 문제점은 극복하기 어려운 부분으로 인식되고 있다(Han and Um, 2016). 이와 같은 해석기법들은 사업 초기 단계의 계획 수립에 유용하게 사용될 수 있으나, 실제 현장의 유체유동 특성과 관련된 평가 및 예측에 적용하기에는 불합리한 점도 많이 존재한다. 최근 들어 국내에서도 절리암반의 기하학적 특성을 고려하여 유체유동에 관한 연구(Bang et al., 2003, Park et al., 2007, Yoon, 2010, Bang et al., 2012)를 수행하고 해당 분야에 학술적 담론을 이끌었지만 터널과 지하공간 건설, 이산화탄소 및 방사성폐기물 지중처분, 비전통 에너지자원 개발, 안정적인 수자원 확보 등 당면한 국

**Received:** Jul. 28, 2016

**Revised:** Aug. 16, 2016

**Accepted:** Aug. 22, 2016

\***Corresponding Author:** Jeong-Gi Um

Tel) +82516296559, Fax) +82516296553

E-Mail) jum@pknu.ac.kr

Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, South Korea

가적 과업의 효과적인 입안 및 성공적인 수행을 위한 기초 및 응용 연구가 더욱 많이 수행되어야 한다.

기존에 국내외의 수리지질학 분야에서 수행된 유체유동에 관한 연구는 주로 흙 매질을 대상으로 하였다. 이와 같은 연구는 흙 매질에서의 유체유동 기작을 이해하는 데 큰 역할을 담당하였다. 최근 들어 국내외적으로 절리암반 매질에서의 유체유동 특성에 대한 요소이론 개발에 관한 연구가 활발하게 수행되고 있지만 현장 스케일의 암반에 대한 적용 및 해석을 위해서는 최신의 이론 및 기술로도 어려움이 많은 실정이다. Han and Um(2015)은 확정적인 방향과 밀도 그리고 확률분포를 갖는 길이로 구성된 다양한 이차원 DFN에 대하여 블록 크기 및 절리의 기하학적 속성이 수리상수에 미치는 영향을 평가하고 절리의 방향, 빈도, 크기 등이 복합적으로 DFN 시스템의 대표요소체적(REV; representative elementary volume)과 수리적 이방성 및 등가연속체 특성에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다. 또한, Han and Um(2016)은 확률분포를 갖는 절리군의 방향성이 DFN의 수리적 특성에 미치는 영향을 분석하여 절리의 연결성 및 블록수리전도 특성이 절리의 방향 변동성에 종속된다는 결론을 개진하였는데, 이와 같은 선행 연구는 모든 절리의 수리간극(hydraulic aperture)이 동일하다는 가정 하에 수행되었다.

개별 절리의 수리전도도는 절리의 거칠기, 충전물, 현장응력 조건에 영향을 받는 역학적 간극(mechanical aperture)과 밀접한 연관이 있지만 현장에서 개별 절리의 역학적 간극을 정밀하게 측정하는 것은 거의 불가능하다. 기존의 연구자들(Tsang and Tsang, 1977, Raven et al., 1988, Silliman, 1989)은 현장 수리시험 및 추적자시험을 기반으로 개별절리의 수리간극 추정을 시도하였지만 절리암반에서 절리마다 수리간극이 다르며 개별 절리에서도 수리간극은 공간적 변화를 나타내므로 시험 결과에 대한 해석은 불확실성을 내포한다. Snow(1980)는 실내실험을 통하여 수리간극이 확률분포를 따른다는 결론을 제시한 바 있다. 본 연구는 절리의 수리간극이 절리암반의 수리적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 등가유로관 연결구조에 기반을 둔 이차원 DFN 유체유동 해석 프로그램 코드를 개발하고 다양한 수리간극 변화를 고려한 수치실험을 수행하였다.

## 2. 이차원 DFN 유체유동 해석 코드 개발

본 연구에서는 이차원 DFN 블록 내에서 개별 절리의 수리간극을 고려한 수두 분포와 블록을 통과하는 유체의 유량, 블록수리전도도, 주 수리전도도텐서 등을 결정

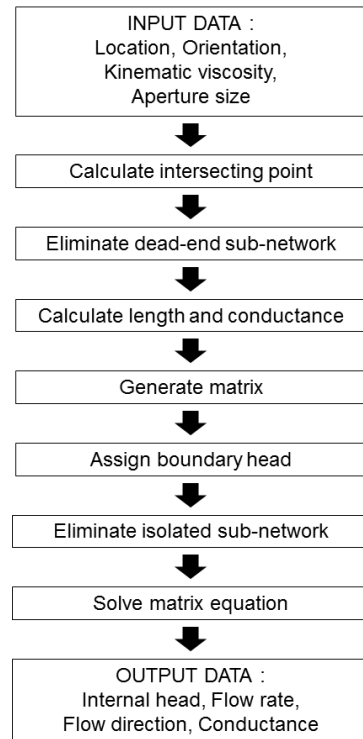


Fig. 1. Work flow of the developed program code in this study

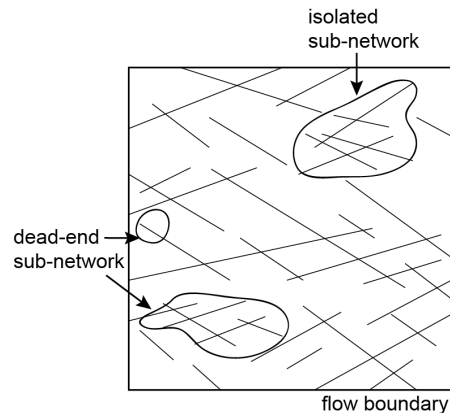


Fig. 2. An example of isolated and dead-end sub-networks in the 2-D DFN (after Priest, 1993).

하기 위하여 해석 프로그램 코드를 개발하였다. 개발된 해석 코드의 절차 및 기능이 Fig. 1에 나타나 있다. 결정질 암반을 추계론적으로 묘사한 DFN은 선형의 등가유로망(equivalent pipe network)이 복잡하게 연결되어 있는 구조로 가정할 수 있는데, Fig. 2에서와 같이 한 유

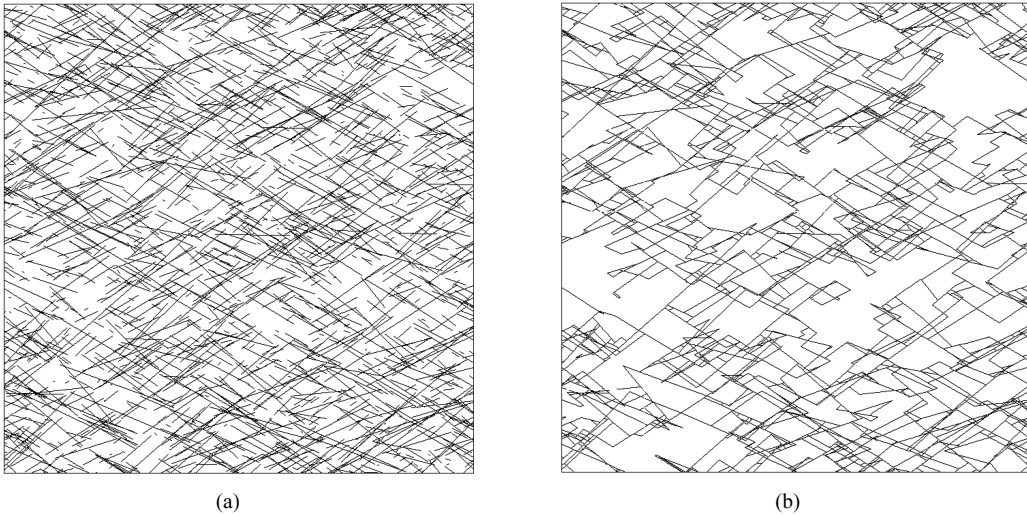


Fig. 3. The 2-D DFN showing (a) generated and (b) connected flow network

동경계(flow boundary)에서 다른 유동경계 까지 유체의 유동통로로 작용할 수 있는 연결망으로부터 고립된 개별 또는 그룹의 유로관으로 형성된 부연결망(isolated sub-network)과 연결망에서 연결성이 결여되어 유체 흐름이 차단된 부연결망(dead-end sub-network)이 존재하는 경우가 대부분이다. 완전히 또는 부분적으로 고립된 절리는 DFN 시스템을 통한 전체적인 유체 흐름에 기여하지 못하며 수치연산의 부담을 가중시키고 때로는 수치적 불안정을 유발하여 해를 제공하지 못하는 경우를 발생시킨다. 이와 같은 유로관으로 가정된 절리의 구분 및 제거는 유체 흐름과 관련된 연결성을 분석하는 해석 루틴을 통하여 가능할 수 있다. 본 연구에서는 연산 수행에 불필요한 절리를 구분하고 제거하기 위하여 절리연결망에 대한 기하학적 및 대수학적 해석 루틴을 개발하였다.

연결성이 결여되어 유체 흐름이 차단된 부연결망은 기하학적 해석방법을 통하여 제거할 수 있다. 본 연구에서는 DFN에서 경계를 포함한 모든 절리선의 교차점(노드)을 찾아 정렬하고 다른 절리와 연결되지 않는 선분의 끝점을 제거하는 방법을 사용하였다. 고립된 부연결망을 제거하기 위해서는 해석 영역의 경계를 절리로 취급하고 모든 노드에서 수두 행렬식을 구성한 후 각각의 내부노드가 경계노드에 영향을 받는지 여부를 평가하여 경계수두에 영향을 받지 않는 노드를 제거하는 방법이 고안되었다. Fig. 3은 본 연구에서 개발한 해석 루틴을 적용하여 DFN의 연결성 분석을 수행한 결과인데, 유체의 흐름에 기여하지 못하는 절리가 적절히 제거되

었음을 알 수 있다. 해석영역에서 각 노드의 전수두는 노드의 개수가 많지 않은 단순한 연결망의 경우 대수적 소거법을 사용하여 산정할 수 있지만 노드의 수가 많은 일반적인 경우에는 수치해석 기법을 적용하는 것이 적합하다(Han and Um, 2015). 본 연구에서는 DFN의 연결성을 분석한 후 SOR(successive over-relaxation)법을 이용하여 다양한 수리간극을 갖는 유로관으로 연결된 각각의 노드에서 전수두를 산정하고 각 유로관의 컨덕턴스(conductance) 및 해석영역의 블록수리전도도를 결정하였다.

### 3. 수치실험

절리의 수리간극은 DFN 시스템의 유체유동 특성을 평가함에 있어서 중요한 파라미터로 작용한다(Stratford et al., 1990, Yoon, 2010). 개별 절리에서의 유체유동은 수리간극의 삼승에 영향을 받는다. 따라서 수리간극의 변화가 DFN 시스템의 수리적 특성에 미치는 영향에 대한 평가는 절리암반 매질에서의 유체흐름에 대한 연구에 있어서 중요한 의의를 가질 수 있다. 절리군의 수리간극은 확정적인(deterministic) 값을 사용할 수 있지만 기존의 많은 실험연구 및 현장 사례연구에서 대수정규분포(logarithmic normal distribution)가 수리간극의 확률분포로 채택된 바 있다(Snow, 1970, Moreno et al., 1985, Shapiro and Nicholas, 1989, Hakami and Larsson, 1996). 본 수치실험에서는 두 절리군을 사용하여 방향성, 면적분도, 길이분포를 같은 값으로 고정하였으며 수

**Table 1.** Summary of fracture parameter values for the generated discrete fracture network systems of the CASE 1

DFN ID	Orientation (degrees)	Aperture ratio (SET1/SET2)	Density (#/m <sup>2</sup> /set)	Trace length (m) (gamma distribution)	
				Mean	Std.
DFN1-D1	45 and 135	1	2	1.5	2.0
DFN1-D2	45 and 135	2	2	1.5	2.0
DFN1-D5	45 and 135	5	2	1.5	2.0
DFN2-D1	60 and 120	1	2	1.5	2.0
DFN2-D2	60 and 120	2	2	1.5	2.0
DFN2-D5	60 and 120	5	2	1.5	2.0
DFN3-D1	75 and 105	1	2	1.5	2.0
DFN3-D2	75 and 105	2	2	1.5	2.0
DFN3-D5	75 and 105	5	2	1.5	2.0

Note: # = No. of fracture

**Table 2.** Summary of fracture parameter values for the generated discrete fracture network systems of the CASE 2

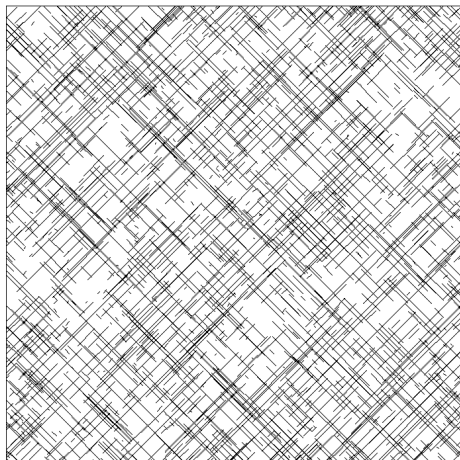
DFN ID	Orientation (degrees)	Density (#/m <sup>2</sup> /set)	Trace length (m) (gamma distribution)		Aperture (mm) (log-normal distribution)	
			Mean	Std.	Mean	Std.
DFN1-LN1	45 and 135	2	1.5	2.0	0.1	0.00
DFN1-LN2	45 and 135	2	1.5	2.0	0.1	0.05
DFN1-LN3	45 and 135	2	1.5	2.0	0.1	0.10
DFN2-LN1	60 and 120	2	1.5	2.0	0.1	0.00
DFN2-LN2	60 and 120	2	1.5	2.0	0.1	0.05
DFN2-LN3	60 and 120	2	1.5	2.0	0.1	0.10
DFN3-LN1	75 and 105	2	1.5	2.0	0.1	0.00
DFN3-LN2	75 and 105	2	1.5	2.0	0.1	0.05
DFN3-LN3	75 and 105	2	1.5	2.0	0.1	0.10

리간극이 절리군별로 서로 다른 일정한 값을 갖는 경우 (CASE 1)와 확률분포 특성을 갖는 경우(CASE 2)로 대분하여 수리간극의 변화가 DFN 시스템의 블록수리 전도 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

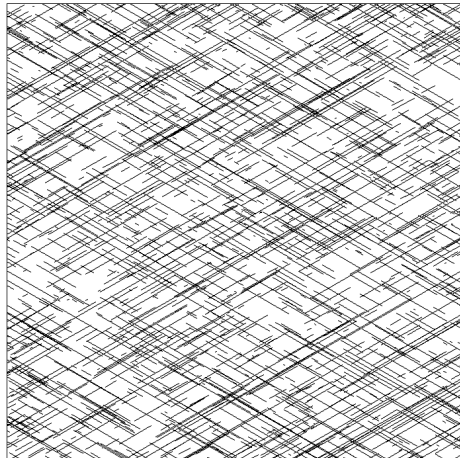
CASE 1의 DFN 시스템은 수리간극을 0.1 mm로 동일하게 부여한 절리군 2(SET 2)에 비해 절리군 1(SET 1)의 수리간극이 1배(0.1 mm), 2배(0.2 mm), 5배(0.5 mm)를 갖는 확정적인 경우이다. 두 절리군의 교차각은 90°, 60°, 30°을 이루도록 확정적 방향성을 부여하고 각각에 대하여 면적빈도는 2 개/m<sup>2</sup>/set의 확정적 값을, 길이분포는 평균 = 1.5 m, 표준편차 = 2.0 m인 감마분포를 사용하였는데, 이와 같은 기하학적 속성을 갖는 DFN 설정은 모든 절리의 수리간극이 0.1 mm일 때 20 m × 20 m 블록크기를 대표요소체적으로 취급할 수 있

는 조건이며 등가연속체 특성을 갖는다(Han and Um, 2015). Table 1은 CASE 1의 수치실험에 사용된 9개 DFN 시스템에 대한 입력변수이다. Fig. 4는 CASE 1의 DFN 시스템 중 두 절리군의 수리간극 값이 같은 경우 (SET1/SET2 = 1)의 DFN 시스템을 도시한 것인데, 두 절리군의 방향성 변화에 따른 DFN 시스템의 변화를 인지할 수 있다.

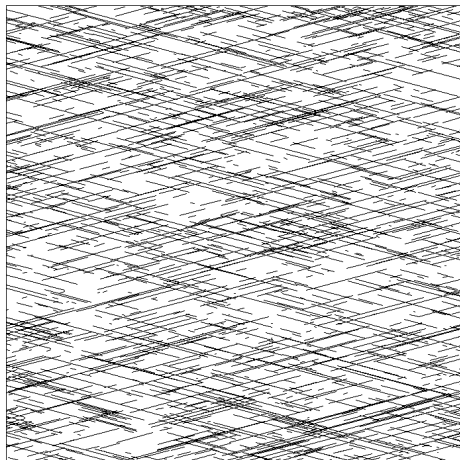
절리의 수리간극이 확률분포 특성을 갖는 CASE 2의 9개 DFN 시스템은 절리의 방향성, 면적빈도, 길이분포 등의 기하학적 속성을 CASE 1과 동일하게 유지하고 두 절리군의 수리간극을 평균 = 0.1 mm, 표준편차 = 0.0~0.1 mm의 대수정규분포로 동일하게 설정하였다. 수치실험에 사용된 CASE2의 DFN 시스템에 대한 입력 변수는 Table 2에 수록되어 있다. Fig. 5는 추계론적으



(a)

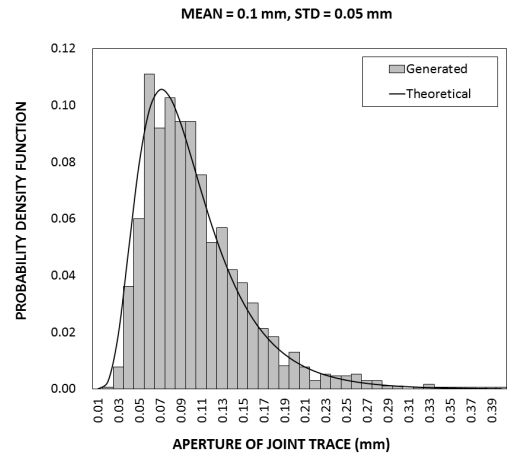


(b)

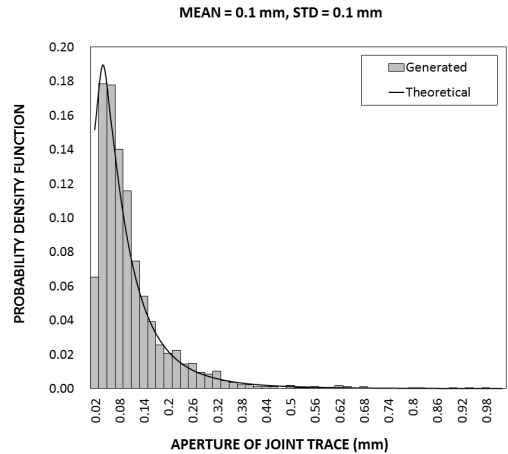


(c)

**Fig. 4.** Generated fracture traces on a square window of size 20 m: (a) DFN1-D1, (b) DFN2-D1 and (c) DFN3-D1



(a)



(b)

**Fig. 5.** Probability density functions of hydraulic aperture for the CASE 2 DFN systems having mean = 0.1 mm and different standard deviation: (a) STD = 0.05 mm and (b) STD = 0.1 mm

로 생성된 DFN 시스템의 평균 수리간극이 0.1 mm일 때 표준편차의 변화에 따른 대수정규분포의 확률밀도 함수를 보여주는데, 표준편차가 0.05 mm(Fig. 5.(a))에서 0.10 mm(Fig. 5.(b))로 증가함에 따라 수리간극의 크기 범위가 확장되어 상대적으로 큰 수리간극이 발견되었음을 확인할 수 있다.

수치실험을 위한 경계조건은 선행연구(Han and Um, 2015)와 동일하게 해석영역의 상하좌우 경계에서 정수 두 조건을 설정하였다. CASE 1과 CASE 2에서 각각 9개씩 총 18개의 32 m × 32 m DFN 블록의 중앙에서 12 방향 (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°,

240°, 270°, 300°, 330°)으로 최대수두경사를 설정한 총 216개(18 × 12)의 20 m × 20 m DFN 블록에 대하여 방향에 따른 블록수리전도도  $k^{(p)}$ 가 산정되었다. 산정된  $k^{(p)}$ 로부터 DFN 블록을 등가연속체로 가정한 이론적 블록수리전도도  $\overline{k^{(p)}}$ 와 블록수리전도도텐서  $\overline{K_{ij}}$ 가 결정되었으며 DFN 블록에 대한 등가연속체 취급 가능성을 평가하기 위한  $\overline{k^{(p)}}$ 와  $k^{(p)}$  간의 상대오차 ER이 계산되었다. 또한, 최대 및 최소 주수리전도도(principal hydraulic conductivities)  $K_{11}$  및  $K_{22}$ 의 크기와 방향을 결정하고 평균 블록수리전도도  $K_0$ 를 산정하였다. 이와 같은 다양한 블록수리상수에 대한 세부적인 내용은 선행연구(Han and Um, 2015)에 상세하게 소개되어 있다.

#### 4. 결과 및 토의

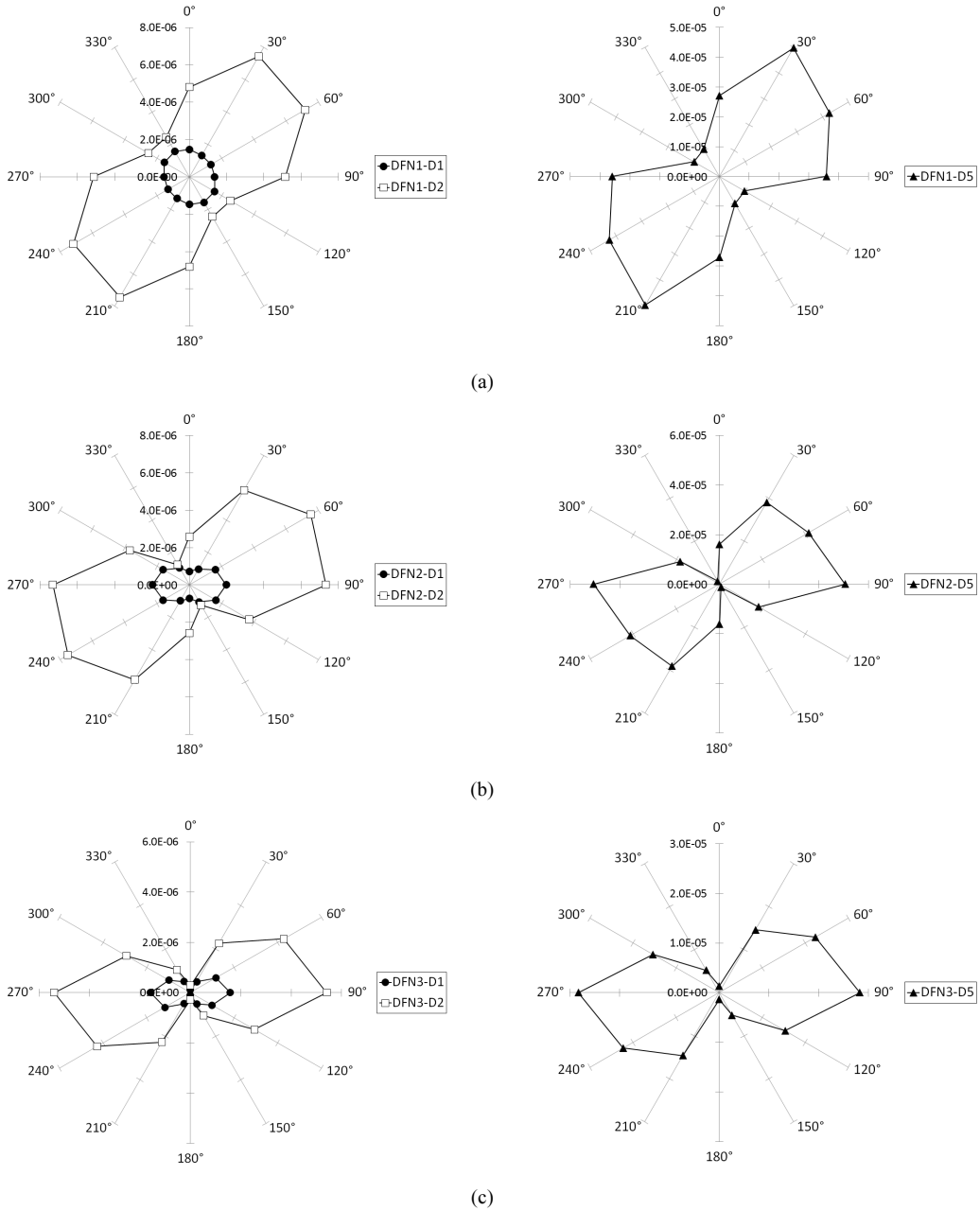
CASE 1은 두 절리군 중 한 절리군의 수리간극을 증가시킨 경우이다. Fig. 6은 Table 1의 기하학적 속성을 갖는 DFN 시스템에 대하여 매 30° 간격으로 산정한 블록수리전도도  $k^{(p)}$ 를 그래프에 도시한 것이다. 두 절리군의 교차각이 90°인 경우(Fig. 6(a)) 선주향 45°의 절리군 1과 선주향 135°의 절리군 2가 0.1 mm의 동일한 수리간극을 가질 때(DFN1-D1) 방향에 따른  $k^{(p)}$ 는 등방적 수리전도 특성을 나타낸다. DFN 시스템에서 절리군 1의 수리간극이 2배(0.2 mm)로 증가하였을 때(DFN1-D2) 고려한 모든 방향에서  $k^{(p)}$ 는 뚜렷하게 증가하였으며, 특히 30°~60° 및 210°~240° 방향으로 가장 큰 증가를 나타냈다. 절리군 1의 수리간극을 5배(0.5 mm)로 증가시킨 경우(DFN1-D3)에는 절리군 1의 선주향 방향으로의 블록수리전도도 증가가 더욱 커져서 개별적으로 그래프에 나타내야 할 정도로 수리적 이방성이 더욱 강해졌음을 알 수 있다.

두 절리군의 수리간극이 같은 경우 교차각이 90°에서 60°(DFN2-D1) 및 30°(DFN3-D1)로 감소함에 따라 두 절리군 선주향의 평균인 90°(E) - 270°(W) 방향에 직교하는 0°(N) - 180°(S) 방향에서 블록수리전도도가 더욱 감소하여 수리적 이방성이 증대됨을 알 수 있는데, 이와 같이 수리간극이 동일한 두 절리군의 교차각 변화에 따른 블록수리전도도의 이방적 특성은 선행 연구(Han and Um, 2015)에서도 토의한 바 있다. 두 절리군의 교차각이 60° 및 30°인 경우에도 교차각이 90°인 경우와 유사하게 한 절리군의 상대적 수리간극 증가에 따른 블록수리전도도의 증가를 보이며 이방성 역시 증대됨을 알 수 있다(Fig. 6(b), Fig 6(c)).

Fig. 7은 각각의 DFN 시스템에서 한 절리군의 상대적 수리간극 증가에 따라 산정한 ER 값을 도시한 그래

프인데, 같은 방향그룹의 DFN 시스템에서 절리군 1의 수리간극 증가에 따라 ER 값은 뚜렷이 증가하는 양상을 확인할 수 있다. 이는 절리군 간의 수리간극 차이가 매질의 수리적 이방성 및 ER 값에 유의미한 영향을 미칠 수 있음을 의미하며 절리군 간의 수리간격 크기 비율에 따라 등가연속체 취급 가능성이 결정될 수 있음을 지시한다. 본 수치실험에서 고려한 조건의 DFN은 ER 값 0.1을 기준으로 하였을 때 한 절리군의 수리간극 크기가 다른 절리군의 2배인 경우 이방적 등가연속체로 취급할 수 있으며 절리군 간의 수리간극 차이가 더 큰 경우에는 대표요소체적 크기에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다. Fig. 8는 DFN 시스템에서 절리군 수리간극의 변화에 따라 최대 및 최소 주수리전도도의 산술평균으로 산정된  $K_0$ 의 변화를 나타낸 그래프이다. 세 가지 방향그룹에서 수리간극 조건이 같을 때 교차각이 작을수록  $K_0$ 가 감소하는 양상은 선행연구(Han and Um, 2015)에서 토의한 바 있다. 각각의 방향그룹에서 한 절리군의 수리간극이 상대적으로 증가할 때  $K_0$ 는 지수함수적으로 증가하는 양상을 보이는데, 두 절리군의 교차각이 30°에서 90°로 커질수록  $K_0$  증가가 더욱 강하게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 절리군의 방향성과 더불어 수리간극이 DFN의 블록수리전도를 좌우하는 주요 수리상수임을 시사한다.

CASE 2는 수리간극의 평균을 고정하고 표준편차를 달리한 경우이다. Fig. 9는 Table 2의 기하학적 속성을 갖는 DFN 시스템에 대하여 매 30°간격으로 최대수두경사를 설정하고 산정한  $k^{(p)}$ 를 그래프에 도시한 것인데, 세 가지 방향그룹 모두에서 일부 방향을 제외하고 수리간극의 표준편차가 증가함에 따른 블록수리전도의 증가 양상을 인지 할 수 있다. 두 절리군의 교차각이 90°일 때 수리간극의 평균과 표준편차가 각각 0.1 mm, 0 mm인 DFN1-LN1(Fig. 9(a))은 CASE 1의 DFN1-D1과 동일한 수리간극 조건이며 앞에서 언급하였듯이 방향에 따른 블록수리전도도는 등방적 특성을 나타내는데, 이는 방향에 따른 유로관의 연결성이 유사하기 때문이다. 수리간극의 표준편차가 0.05 mm로 증가할 때(DFN1-LN2)  $k^{(p)}$ 는 본 수치실험에서 고려한 모든 방향에서 증가하여 전반적으로는 등방적 블록수리전도도 특성을 유지하는 것으로 보이지만, 0°-180° 방향과 60°-240°방향 등에서 비교할 수 있듯이 방향에 따라  $k^{(p)}$ 의 증가 폭이 다르게 발견되었음을 알 수 있다. 수리간극의 표준편차가 평균과 같은 0.1 mm로 증가하여 비교적 큰 수리간극도 분포하는 DFN1-LN3의 경우에는 두 절리군의 방향성과 유사한 60°-240°, 120°-300° 방향으로  $k^{(p)}$ 의 증가가 뚜렷해지는데, 이는 DFN 시스템



**Fig. 6.** Directional hydraulic conductivity,  $k^p$ , (m/s) in different flow directions for the DFN systems of the CASE 1: (a) DFN1, (b) DFN2 and (c) DFN3

에서 상대적으로 큰 수리간극을 갖는 절리의 존재가 전체 블록수리전도도 특성에 지대한 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

두 절리군의 교차각이 60° 및 30°인 경우에도(Fig.

9(b), (c)) 수리간극의 표준편차가 증가함에 따라 수리적 이방성이 강해지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 두 절리군의 선주향이 각각 75° 및 105°이며 수리간극의 표준편차가 0.1 mm인 DFN-LN3의 경우 150°-330° 방

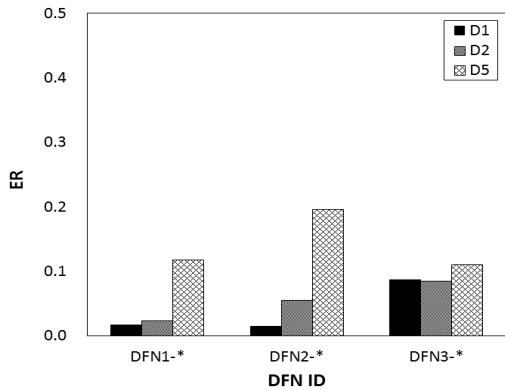


Fig. 7. ER values vs. DFN systems of the CASE 1

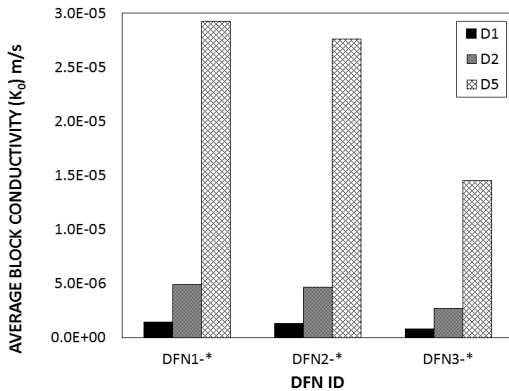
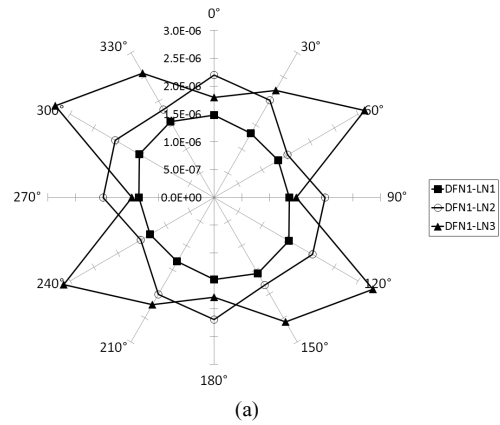


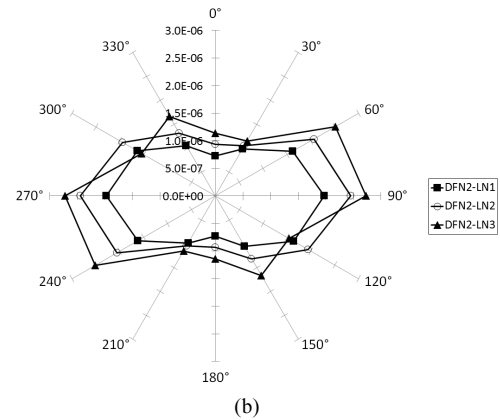
Fig. 8. Average block conductivity vs. DFN systems of the CASE1

향으로도 큰 폭의  $k^{(p)}$  증가를 볼 수 있는데, 이는 DFN 시스템 내에서 비교적 큰 수리간극을 갖는 절리의 존재가 전체 시스템의 수리적 특성에 유의미한 영향을 미칠 수 있는 것으로 해석된다.

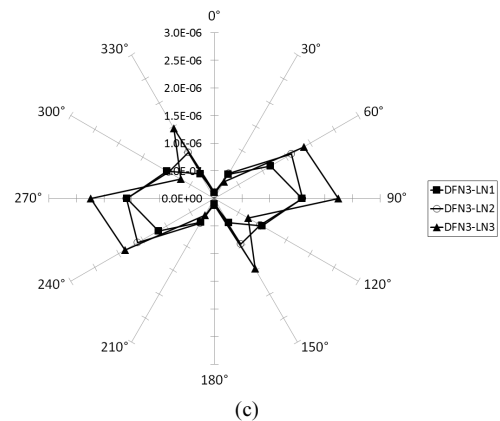
Fig. 10은 CASE 2의 DFN 시스템에서 산정한 ER 값을 그래프로 나타낸 것이다. 두 절리군의 수리간극에 대하여 같은 대수정규분포를 설정하였을 때 수리간극의 표준편차가 증가할수록 ER 값은 뚜렷하게 증가하였는데, 두 절리군의 교차각이 30°인 경우(DFN3) 수리간극의 변동계수(cov)가 0.5인 수준(LN2)에서도 본 연구의 DFN 시스템은 등가연속체로 취급하기 어려움을 알 수 있으며 수리간극의 변동계수가 1인 경우(LN3)에는 고려한 세 가지 방향그룹 모두에서 등가연속체 취급 가능성이 결여됨을 알 수 있다. 또한, 한 절리군 내에서 수리간극의 변동성이 없는 CASE 1의 결과와 비교하여 확률분포 특성을 갖는 CASE 2의 ER이 크게 평가되었



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Directional hydraulic conductivity,  $k^{(p)}$ , (m/s) in different flow directions for the DFN systems of the CASE 2: (a) DFN1, (b) DFN2 and (c) DFN3

음을 고려할 때 수리간극의 변동성이 높은 현상에서는 수리간극 설정의 중요성이 더욱 강조되어야 한다. Fig. 11에 나타난  $K_0$  값의 변화 추이는 절리의 방향성, 빈도, 길이 등의 기하학적 속성과 더불어 수리간극이 절리암



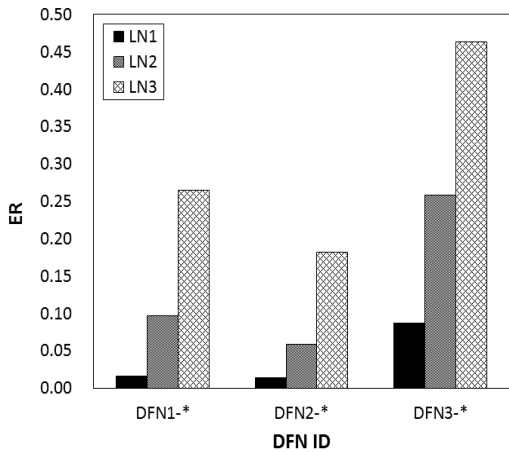


Fig. 10. ER values vs. DFN systems of the CASE 2

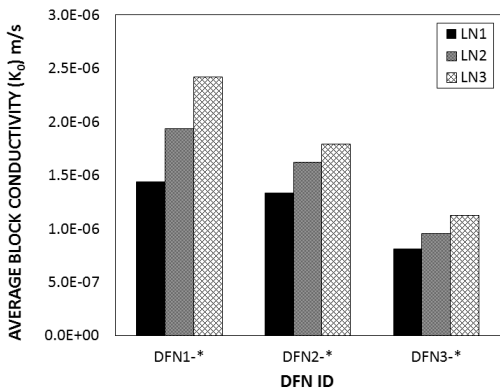


Fig. 11. Average block conductivity vs. DFN systems of the CASE 2

반의 평균 블록수리전도에 큰 영향을 미칠 수 있는 요소임 시사한다.

5. 결론

본 연구는 절리의 수리간극의 변화가 절리암반의 수리상수 및 수리적 이방성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 등가유로관 연결구조에 기반을 둔 이차원 DFN 유체유동 해석 프로그램 코드를 개발하고 정수두 경계조건에서 수리간극의 변화를 고려한 수치실험을 수행하였다. 두 절리군 중 한 절리군의 수리간극이 다른 절리군의 수리간극에 비해 상대적으로 커질수록 DFN의 평균 블록수리전도도는 증가하는 것으로 평가되었는데, 이는 큰 수리간극을 갖는 절리군 방향으로 블록수리전

도도의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 절리군 간의 수리간극 차이는 DFN의 이방적 블록수리전도 특성 및 등가연속체 취급 가능성에 유의미한 영향을 미칠 수 있으며 현장 과제에 연속체 해석을 적용할 경우에는 해석 영역을 대표요소체적 이상의 크기로 설정해야 한다. 두 절리군의 수리간극이 확률분포를 따르는 경우 수리간극의 변동성이 증가할수록 수리적 이방성이 증대되며 등가연속체 취급 가능성이 낮아지는 것으로 평가되었는데, 이는 비교적 큰 수리간극을 갖는 소수의 절리군 전체 시스템의 수리적 특성에 지대한 영향을 미칠 수 있기 때문인 것으로 해석된다. 수리간극 변동성이 높은 현장의 수리적 특성을 파악하기 위해서는 연속체 해석보다 개별체 해석기법의 사용이 적합하다고 판단되며 앞으로 단층 및 대규모 인장절리 등 현장 스케일을 고려할 수 있는 방법론 및 해석 절차의 수립이 필요하다. 또한, 현장 절리암반의 수리간극 측정에 관련된 주제에 대한 연구개발이 심도 있게 수행되어야 한다.

사 사

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015 R1D1A1A01058937).

References

1. Bang, S., S. Jeon and J. Choe, 2003, Determination of equivalent hydraulic conductivity of rock mass using three-dimensional discontinuity network, Tunnel & Underground Space (J. of Korean Society for Rock Mech.), 13, 52-63.
2. Bang, S., S. Jeon and S. Kwon, 2012, Modeling the hydraulic characteristics of a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture: application in the underground research tunnel at KAERI, Nuclear Engineering and Technology, 44, 639-652.
3. Han, J. and J. Um, 2015, Characteristics of block hydraulic conductivity of 2-D DFN system according to block size and fracture geometry, Tunnel & Underground Space (J. of Korean Society for Rock Mech.), 25, 450-461.
4. Han, J. and J. Um, 2016, Effect of joint orientation distribution on hydraulic behavior of the 2-D DFN system, Economic and Environmental Geology, 49, 31-41.
5. Hakami, E. and E. Larsson, 1996, Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 33, 395-404.
6. Moreno, L., I. Neretnieks, and T. Eriksen, 1985, Analysis of some laboratory tracer runs in natural fissures, Water Resour. Res. 21, 951-958.
7. Park, J.S., D.W. Ryu, C.H. Ryu and C.I. Lee, 2007,

- Groundwater flow analysis around hydraulic excavation damaged zone, Tunnel & Underground Space (J. of Korean Society for Rock Mech.), 17, 109-118.
8. Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London, 473p.
  9. Raven, K.G., K.S. Norvakowski and P.A. Lapcevic, 1988, Interpretation of field tracer tests on a single fracture using a transient solute storage model, Water Resour. Res., 24, 2019-2032.
  10. Shapiro, A.M. and J.R. Nicholas, 1989, Assessing the validity of the channel model of fracture aperture under field conditions, Water Resour. Res. 25, 817-828.
  11. Silliman, S.E., 1989, An interpretation of the difference between aperture estimates derived from hydraulic and tracer tests in a single fracture, Water Resour. Res., 25 2275-2283.
  12. Snow, D.T., 1970, The frequency and apertures of fractures in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 7, 23-40.
  13. Stratford, R.G., A.W. Herbert and C.P. Jackson, 1990, A parameter study of the influence of aperture variation on fracture flow and the consequences in a fracture network. In: Barton, N., Stephansson, O. (Eds.), Rock Joints. Balkema, Rotterdam, 413-422.
  14. Tsang, Y.W. and C.F. Tsang, 1987, Cannel model of flow through fractured media, Water Resour. Res., 23, 467-480.
  15. Yoon, Y.K., 2010, Effects of GSI and joint orientation on the change of hydraulic conductivity, Tunnel & Underground Space (J. of Korean Society for Rock Mech.), 20, 225-232.



### 한 지수

2014년 부경대학교 에너지자원공학과  
공학사  
2016년 부경대학교 에너지자원공학과  
공학석사

Tel: 051-629-6559  
E-mail: m-a-m@nate.com  
현재 부경대학교 에너지자원연구소 전임  
연구원

---



### 엄 정 기

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과  
이학사  
1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이학  
석사  
1997년 University of Arizona 자원지질  
공학과 공학박사

Tel: 051-629-6559  
E-mail: jum@pknu.ac.kr  
현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수

---