

블록크기 및 균열의 기하학적 속성에 따른 2-D DFN 시스템의 블록수리전도도 특성 한지수, 엄정기*

Characteristics of Block Hydraulic Conductivity of 2-D DFN System According to Block Size and Fracture Geometry

Jisu Han, Jeong-Gi Um*

Abstract Extensive numerical experiments have been carried out to investigate effect of block size and fracture geometry on hydraulic characteristics of fractured rock masses based on connected pipe flow in DFN systems. Using two fracture sets, a total of 72 2-D fracture configurations were generated with different combinations of fracture size distribution and deterministic fracture density. The directional block conductivity including the theoretical block conductivity, principal conductivity tensor and average block conductivity for each generated fracture network system were calculated using the 2-D equivalent pipe network method. There exist significant effects of block size, orientation, density and size of fractures in a fractured rock mass on its hydraulic behavior. We have been further verified that it is more difficult to reach the REV size for the fluid flow network with decreasing intersection angle of two fracture sets, fracture plane density and fracture size distribution.

Key words Fractured rock mass, Discrete fracture network, Block hydraulic conductivity, Representative elementary volume

초 록 본 연구는 블록크기 및 균열의 기하학적 속성이 균열암반의 수리적 특성에 미치는 효과를 파악하기 위해 이차원 등가파이프 연결구조에 기반을 둔 DFN 유체유동 해석기법을 적용하여 수치실험을 수행하였다. 두 개의 균열군을 사용하여 균열의 기하학적 속성 변화를 반영할 수 있도록 방향, 면적빈도, 길이분포를 달리하며 이차원 영역에 체계론적으로 생성한 총 72개의 DFN 블록에 대하여 방향에 따른 블록수리전도도가 산정되었다. 또한, 각각의 DFN 블록에서 이론적 블록수리전도도, 주 수리전도도텐서 및 평균블록수리전도도를 추정하여 비교분석한 결과, 블록크기 및 균열의 기하학적 속성은 균열성 암반의 수리적 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 균열군의 교차각이 작을수록, 면적빈도가 낮고 길이분포가 짧을수록 DFN 시스템은 유체유동에 대한 REV를 정의하기 어려우며 방향에 따른 블록수리전도도의 변동성이 강하게 나타났다. 일반적으로 블록크기가 커질수록 DFN 시스템에 대한 등가연속체 취급 가능성은 높아진다.

핵심어 절리암반, 불연속균열망, 블록수리전도도, 대표요소체적

1. 서 론

다양한 규모의 균열(fracture)이 분포하는 매질에서의 유체유동(fluid flow)에 대한 확고한 이해는 균열저류층(fractured reservoirs) 개발, 유정 설계, 핵폐기물 저장공동의 적합성 평가, 지열 개발, 지하 유류저장, 지하수 오염평가, 암반구조물의 안정성 해석, 광산배수 연구 등 균열암반(fractured rock masses)과 관련된 다양한 과업의 성공적인 수행에 있어서 매우 중요하다. 이와 같은 과업

Received: Oct. 5, 2015

Revised: Oct. 19, 2015

Accepted: Oct. 22, 2015

***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 608-737, Korea

을 수행함에 있어서 유체의 광역적 유입·유출 또는 평균적인 흐름이 주된 관점인 경우도 있지만, 대부분의 경우 현장스케일의 유체유동 특성을 파악하는 것이 주안점이다. 일반적으로 현장시험으로부터 결정된 균열압반의 수리상수는 실험실에서 측정된 결과와 비교할 때 큰 차이를 보이는데, 이는 주로 압반에 발달한 단층 또는 절리 등의 대·소규모 균열에 기인한다. 균열압반을 매질로 하는 유체의 흐름특성은 개별 균열의 수리적 특성 및 불연속균열망(DFN; discrete fracture network)의 패턴에 영향을 받는다. 특히, 화성암, 변성암과 같이 매우 낮은 수리전도도를 갖는 결정질 암석으로 이루어진 암반인 경우, 유체유동은 불연속균열망의 기하학적 속성에 크게 좌우될 수 있다.

현재까지 개발된 균열압반에 대한 유체유동모델은 연속체유체유동모델(Hsieh and Neuman, 1985, Neuman and Depner, 1988, Carrera et al., 1990), DFN 유체유동모델(Long et al., 1982, Schwartz et al., Oda, 1985, Shapiro and Andersson, 1985, Rouleau and Gale, 1987, Sudicky and McLaren, 1992, Song et al., 1994) 및 등가연속체와 DFN을 결합한 하이브리드모델(Andersson and Dverstorp, 1987, Cacas et al., 1990a,b) 등 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 이들 중 DFN 유체유동모델은 균열압반에 대한 유체유동을 해석하는 데에 가장 많이 사용되는 모델이며(Dershowitz and Einstein, 1987, Long et al., 1985, Park et al., 2007), 특히 등가수리상수를 추정하기 어려운 지질매질에 대한 유체유동 해석에 유용하다(Bear et al., 1993, Zimmerman and Bodvarsson, 1995). DFN 기반의 유체유동을 모사하기 위한 수치해석기법으로는 유한요소법(FEM; finite element method) (Herbert, 1996, Wilcock, 1996), 경계요소법(BEM; boundary element method) (Elsworth, 1986a,b), 등가파이프모델(EPM; equivalent pipe model) (Cacas et al., 1990a,b, Bang et al., 2003) 및 BEM/FEM, BEM/DEM, DEM/ FEM 등과 같은 결합법(Dershowitz and Fidelibus, 1999, Jing and Hudson, 2002)이 제안되었다. 이들 중 2-D 및 3-D 영역에서 균열을 등가파이프(equivalent pipe)로 가정하는 DFN 기반의 등가파이프모델은 여타 수치해석모델과 달리 요소화할 필요 없이 정확성을 유지하면서 매우 효율적으로 지하 심부 및 천부에 대한 2-D 및 3-D 유체유동 해석을 수행할 수 있는 장점이 있다(Long et al., 1982, Cacas et al., 1990a,b). DFN은 조사선조사, 조사창조사, 시추공로깅 등의 현장자료를 사용하여 균열의 방향, 간격, 길이 등의 확률밀도함수를 정의하기 위한 통계분석을 통하여 추계론적으로 생성될 수 있으나 균열의 수가 많거나 모델이 복잡해질수록 자료취득은 어려워지며, 또한 연산 수행의 부담도 상당히 증가하게 된다(Diodato, 1994). 따

라서 DFN 유체유동모델의 현장적용에 대한 기존의 연구는 대부분 단순한 형태의 불연속균열망을 바탕으로 수행되었다(Rouleau and Gale, 1987, Dverstorp and Andersson, 1989). 추계론적 DFN 유체유동모델에 의한 연구결과가 의의를 갖기 위해서는 충분한 수리지질학적 자료가 필요하지만 실제 현장에서는 사용 가능한 자료가 제한적일 수밖에 없다. 더욱이 통계적 수리상수를 사용한 추계론적 DFN 유체유동모델은 수리상수의 분산이 크거나 공간적 변동성이 큰 경우 해석결과와 불확실성은 증대된다(Dverstorp and Andersson, 1989). 또한, 컴퓨터 리소스의 제약으로 인하여 해석영역은 수십 미터 이내의 규모로 제한된다(Park et al., 2001). 이는 제한된 가용 정보에 의존하는 균열압반에 대한 유체유동 모델링 및 연구에 있어서 현장문제 해결을 위해 새로운 방법의 개발 또는 체계적인 해석 절차의 수립이 필수불가결한 도전임을 시사한다. 즉, 모델의 개발 및 적용에 있어서 신뢰성, 예측에 있어서 모델 오류의 수용성, 모델에 대한 이해성 등의 모델링 기초를 유지하면서 유체유동 모델링을 수행하는 것은 매우 중요하다.

유체유동과 관련하여 다공성 지질매질과 균열성 지질매질 사이의 주요 차이점은 등가연속체(equivalent continuum)의 적용 가능성 여부를 파악하기 위한 대표요소체적(REV; representative elementary volume)에 관한 것이다. 유체유동 특성과 관계된 균열압반의 REV는 수리전도도텐서의 변동성이 거의 없는 해석영역의 최소 크기로 정의할 수 있다. 유체는 지질매질에서 공극 또는 균열 등의 빈 공간을 통해 유동하는데, 이들 공간 사이에는 큰 차이가 있다. 첫째, 공극은 삼차원적으로 연결되는 반면 균열은 이차원적이다. 둘째, 공극의 연결에 의한 유효공극의 크기는 일반적인 과업현장의 규모에 비해 매우 작다. 더구나 공극 자체의 크기범위 또한 매우 작다. 반면에 균열은 연구지역 전체까지 연장될 수도 있고 그 범위는 수 cm에서 수천 m까지 다양할 수 있다. 비록 다공성 지질매질이 완전한 의미의 연속체로 취급될 수 없지만 REV 개념을 다공성 매질에 적용하는 데에는 큰 무리가 없으며 실제 현장에 대한 유체유동 모델링을 수행함에 있어서 연속체 해석법이 유용하게 사용되고 있다. 이는 다공성 매질의 경우 해석영역의 규모에 따른 수리상수의 변화가 크지 않기 때문이다. 반면에 균열성 지질매질은 비교적 균질한 균열압반의 경우에도 균열의 연장성으로 인하여 유체유동 특성이 해석영역의 규모에 따라 상당한 변화를 보이는 경우가 대부분이다. 또한, 균열압반의 유체유동 특성은 균열의 연장성 외에 방향성, 밀도, 간극, 연결성 등에 크게 좌우된다. 현장스케일의 균열압반에 대한 유체유동 해석에 적합

한 등가연속체모델의 핵심은 무결암과 균열 분포특성이 결합된 효과를 대표할 수 있는 등가수리전도도텐서 (equivalent hydraulic conductivity tensor)를 결정하는 것이다. 등가수리전도도텐서는 상대적으로 소규모 균열이 분포하는 균열암반에서 REV 이상의 해석영역인 경우 유효할 수 있지만, 대규모 균열을 포함하는 균열암반은 REV 크기를 결정하는 것조차 불가능할 수 있다. REV 크기는 모든 균열암반에서 동일하게 정의할 수 없으며 심지어 존재하지 않을 수도 있는데, 이는 일부 균열암반의 경우 스케일에 무관하게 등가연속체 특성을 보이지 않는 경우도 있기 때문이다. 따라서 균열암반의 유형에 따른 REV 특성에 대한 고찰은 매우 필요하며, 균열의 기하학적 속성의 조합 및 조건과 관련하여 균열암반을 등가연속체로 가정한 유체유동해석이 가능한지 여부에 대한 판단기준의 정립 또한 매우 중요하다. 본 연구는 수치실험을 통하여 통계적 특성을 갖는 균열의 기하학적 속성이 균열암반의 REV 및 수리상수에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치실험

본 연구는 블록크기 및 균열의 기하학적 속성의 변화에 따른 균열암반의 수리적 특성을 파악하기 위하여 이차원 등가파이프 연결구조에 기반을 둔 DFN 유체유동해석기법을 적용하여 수치실험을 수행하였다. 수치실험 절차는 Fig. 1에 나타나 있다. 수치실험에 사용된 DFN

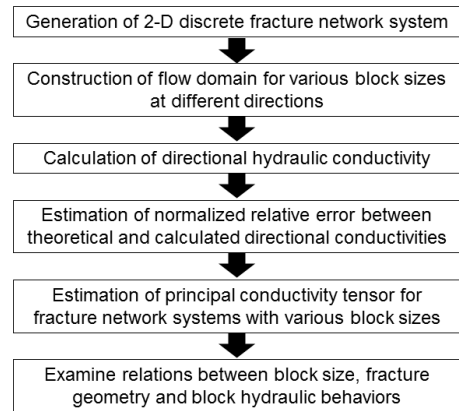


Fig. 1. A procedure of numerical experiments to examine REV and hydraulic characteristics of discrete fracture network system

시스템은 균열의 기하학적 속성 변화를 반영할 수 있도록 방향, 면적빈도, 길이분포를 달리하며 $32\text{ m} \times 32\text{ m}$ 크기의 이차원 영역에 추계론적으로 생성되었다. 생성된 DFN에서 균열의 길이와 위치는 각각 감마분포와 포아송분포를 따르며, 두 개의 확정적 방향성을 갖는 균열군이 사용되었다. 또한, 각각의 균열군에 대하여 같은 수의 확정적 면적빈도가 부여되었는데, 면적빈도는 단위면적당 균열 트레이스 중점의 개수이다. 균열의 방향과 면적빈도 및 길이분포를 달리하는 총 18개의 DFN 시스템에 대한 입력변수가 Table 1에 수록되어 있다.

Table 1. Summary of fracture geometry parameter values for the generated discrete fracture network systems in this study

| DFN ID | Orientation (degrees) | Density (#/m ² /set) | Gamma distributed trace length (m) | | |
|---------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------|------|
| | | | Mean | Variance | Cov. |
| SET 1-1 | 45 and 135 | 2 | 0.8 | 1.6 | 1.58 |
| SET 1-2 | 45 and 135 | 2 | 1.5 | 2.0 | 0.94 |
| SET 1-3 | 45 and 135 | 2 | 2.0 | 1.5 | 0.61 |
| SET 1-4 | 45 and 135 | 4 | 0.8 | 1.6 | 1.58 |
| SET 1-5 | 45 and 135 | 4 | 1.5 | 2.0 | 0.94 |
| SET 1-6 | 45 and 135 | 4 | 2.0 | 1.5 | 0.61 |
| SET 2-1 | 60 and 120 | 2 | 0.8 | 1.6 | 1.58 |
| SET 2-2 | 60 and 120 | 2 | 1.5 | 2.0 | 0.94 |
| SET 2-3 | 60 and 120 | 2 | 2.0 | 1.5 | 0.61 |
| SET 2-4 | 60 and 120 | 4 | 0.8 | 1.6 | 1.58 |
| SET 2-5 | 60 and 120 | 4 | 1.5 | 2.0 | 0.94 |
| SET 2-6 | 60 and 120 | 4 | 2.0 | 1.5 | 0.61 |
| SET 3-1 | 75 and 105 | 2 | 0.8 | 1.6 | 1.58 |
| SET 3-2 | 75 and 105 | 2 | 1.5 | 2.0 | 0.94 |
| SET 3-3 | 75 and 105 | 2 | 2.0 | 1.5 | 0.61 |
| SET 3-4 | 75 and 105 | 4 | 0.8 | 1.6 | 1.58 |
| SET 3-5 | 75 and 105 | 4 | 1.5 | 2.0 | 0.94 |
| SET 3-6 | 75 and 105 | 4 | 2.0 | 1.5 | 0.61 |

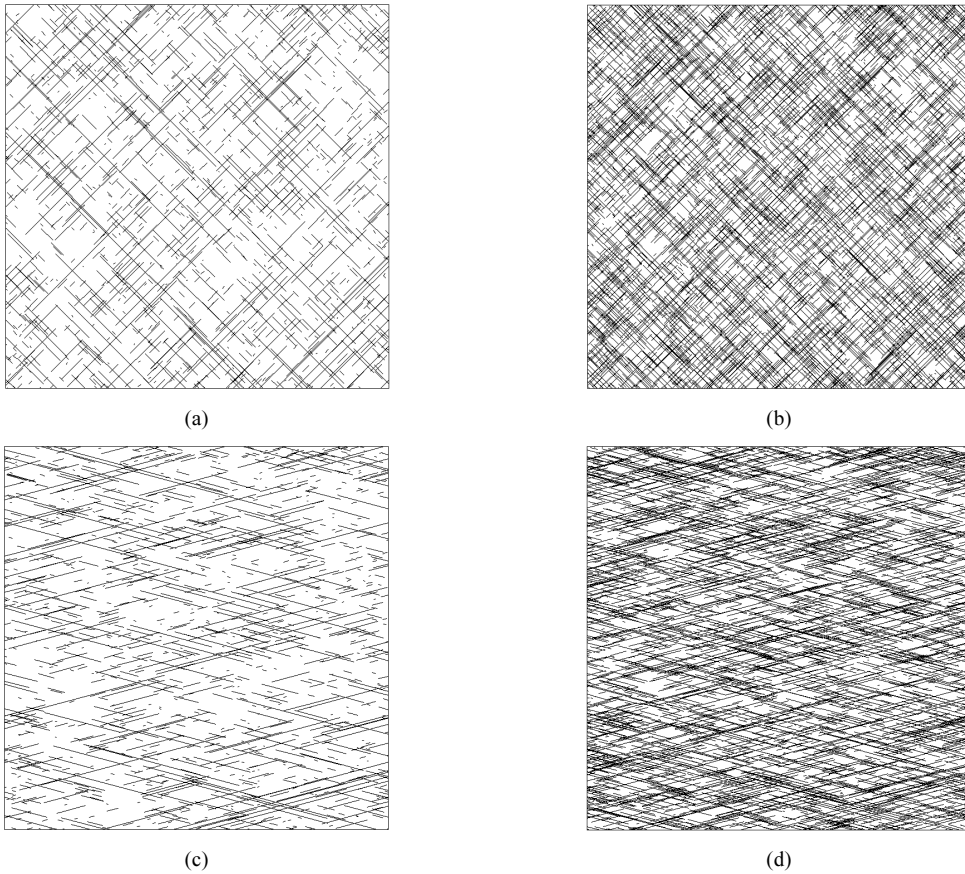


Fig. 2. Selected examples of generated fracture traces on a square window of size 20 m: (a) SET 1-1, (b) SET 1-6, (c) SET 3-1, (d) SET 3-6

균열군의 방향 조합은 이차원에서 두 균열군 트레이스 선주향 사이의 교차각이 90°, 60°, 30° 등을 이루도록 세 그룹으로 구분하여 균열 트레이스의 교차각에 따른 REV 및 수리적 특성을 파악할 수 있도록 설정하였다. 각각의 방향 그룹에서 면적빈도는 균열군당 2개/m² 또는 4개/m² 이며, 길이는 평균(0.8-2 m) 및 변동계수(0.61-1.58)의 변화에 따른 감마분포이다. Fig. 2는 이 연구에서 사용한 18개의 DFN 중 대표적인 시스템을 도시한 것으로, 방향성, 면적빈도 및 길이분포에 따른 균열 연결성의 변화를 육안으로도 쉽게 인지할 수 있다. 여기서 블록의 크기는 경계효과(Bang et al., 2003)를 고려하여 32 m × 32 m 영역에 생성한 DFN의 중앙에 위치한 20 m × 20 m 이다.

수치실험을 위한 해석영역의 좌우경계는 정수두(Φ_1 및 Φ_2) 조건이 부여되었는데, Fig. 3에 나타난 바와 같이 Φ_1 이 Φ_2 보다 크다. 해석영역의 상하경계는 Φ_1 에서 Φ_2

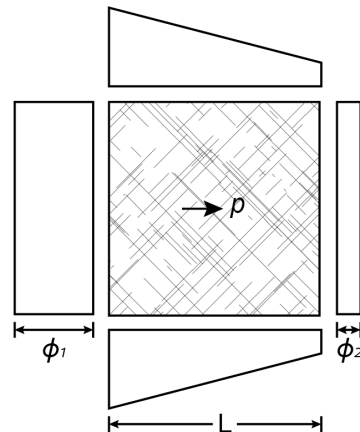


Fig. 3. 2-D square flow region with two constant head boundaries($\Phi_1 > \Phi_2$) and two boundaries with a linear variation in head from Φ_1 to Φ_2 (after Oda, 1985)

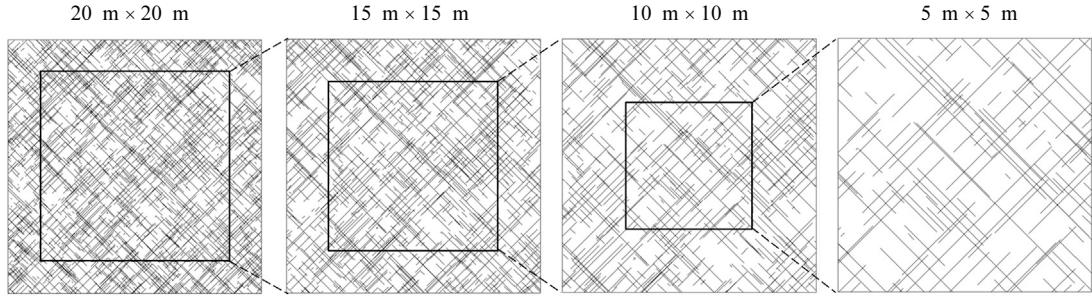


Fig. 4. Example DFN blocks of sizes 5 m × 5 m, 10 m × 10 m and 15 m × 15 m from center of the 20 m × 20 m

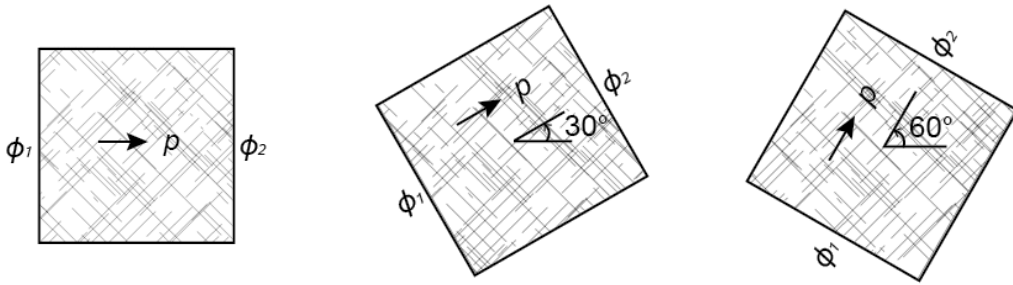


Fig. 5. Construction of the analysis domain by rotating the boundary as well as the hydraulic gradient at every 30 degrees

까지 선형으로 감소한다. 한 변의 길이가 L 인 정사각형의 해석영역에서 최대수두경사(I)의 방향(\mathbf{p})은 Φ_1 경계로부터 Φ_2 경계로 향하며, I 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I = \frac{(\Phi_1 - \Phi_2)}{L} \quad (1)$$

이때 \mathbf{p} 방향으로의 블록수리전도도 $k^{(p)}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k^{(p)} = \frac{Q_{out}}{IL} \quad (2)$$

여기서, Q_{out} 은 수두경사 방향으로 단위시간당 총 유출량이다. DFN 시스템에서 방향에 따른 $k^{(p)}$ 는 해석영역의 경계와 수두경사를 회전함으로써 산정할 수 있다. 해석영역은 블록의 크기가 DFN의 수리적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 1의 18개 DFN에 대하여 각각의 32 m × 32 m 영역 중심에서 최소 5 m × 5 m 에서 최대 20 m × 20 m 까지 한 변이 5m씩 증가하는 정사각형의 DFN 블록이다(Fig. 4). 이와 같이 구성된 총 72개(18 × 4)의 DFN 블록에 대하여 x축을 기준

으로 Fig. 5에서와 같이 반시계 방향으로 매 30° 간격으로 회전하면서 12 방향(0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330°)으로 구현한 총 864개 DFN 블록에서 $k^{(p)}$ 가 산정되었다. DFN을 구성하는 모든 균열 트레이스는 0.1 mm의 수리간극을 갖는 선형의 등가파이프로 취급하였다. 무결암의 수리전도도는 균열암에 비해 상대적으로 매우 낮아 그 효과가 나타나지 않는 것으로 가정하였는데, 이는 치밀한 결정질 암에서만 유효하다.

본 연구에서는 각각의 DFN 블록에서 Q_{out} 을 산정하기 위하여 2-D 등가파이프모델을 적용하여 유체유동 해석을 수행하였다. Fig. 6은 등가파이프와 이들의 연결 교점(node)으로 이루어진 등가파이프 연결구조의 전형적인 예를 보여준다. 교점 m 과 n 을 연결하는 등가파이프를 통한 유체유동은 수두손실($H_m - H_n$)을 야기하며, 2-D 층류(laminar flow) 조건에서 개별 등가파이프의 유량(Q_{mn})은 수두손실에 직접적으로 비례한다고 가정하고 비례상수(conductance) C_{mn} 를 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{mn} = \left(\frac{g b c_n^3}{12 \mu l} \right)_{mn} (H_m - H_n) = C_{mn} (H_m - H_n) \quad (3)$$

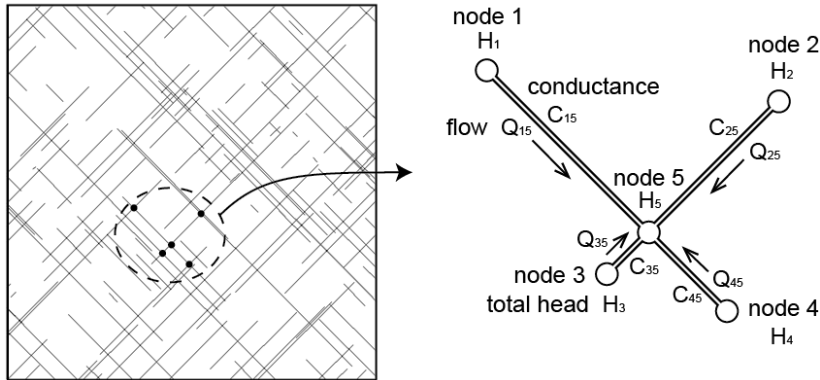


Fig. 6. Two dimensional equivalent linear pipe discrete fracture fluid flow model (after Priest, 1993)

여기서, g , e_h , b , v , l 는 각각 중력가속도, 유효수리간극, 2-D 단면의 수직 방향으로의 단위 두께(2-D 해석 시 $b=1$), 동점성도, 등가파이프의 길이이다. 개별 등가파이프의 컨덕턴스 C_{mn} 은 유효수리간극과 등가파이프 길이를 이용하여 결정할 수 있다. 등가파이프 주위의 매질이 불투수성 및 비압축성이며 유체는 등가파이프를 통해서만 흐른다고 가정하면 연결망 교점에서 유체의 순이득 및 순손실이 없으므로 $\sum Q_{mn}=0$ 이다. 따라서 해석영역 경계에 위치한 교점의 전수두 값이 주어지면 등가파이프 연결구조 내부 교점의 전수두는 Eq. (3)을 이용하여 산정될 수 있다. 교점의 수가 많지 않은 단순한 연결망의 경우 대수적 소거법을 사용하여 해석영역 내부 교점의 전수두를 산정할 수 있지만 교점의 수가 많은 일반적인 경우에는 수치해석을 적용하는 것이 적합하다. 이 연구에서는 SOR(successive over-relaxation) 방법을 사용하여 블록 내부의 모든 교점에서 전수두를 구하고 DFN 블록에 대한 Q_{out} 을 산정하였다.

3. 블록크기 및 기하학적 속성에 따른 $k^{(p)}$ 의 변화

균열성 암반의 수리전도도는 블록크기에 영향을 받으며 일반적으로 블록크기가 실험실 스케일에서 현장 스케일로 확대됨에 따라 평균 수리전도도는 증가하는 것으로 알려져 있다(Kulatilake and Panda, 2000). Fig. 7은 본 연구의 수치실험을 통하여 DFN의 블록크기 및 기하학적 속성의 변화에 따라 매 30° 방향으로 산정한 $k^{(p)}$ 중 두 균열군 트레이스의 교차각이 90°, 60°, 30°를 이룰 때 각각에 대하여 균열의 최소 면적빈도 및 최소 평균길이를 갖는 DFN 시스템(SET 1-1, SET 2-1, SET 3-1)과 최대 면적빈도 및 최대 평균길이를 갖는 DFN 시스템(SET 1-6, SET 2-6, SET 3-6)에 대한 결과를 그

래프에 도시한 것이다. 여기서 방향에 따른 블록수리전도도는 블록크기의 증가에 따라 단조적으로 증가하는 변화를 나타내지 않는다. 가장 작은 블록크기(5 m × 5 m)에서의 방향에 따른 블록수리전도도가 이보다 큰 블록크기에서의 블록수리전도도보다 크게 나타난 경우가 대부분임을 알 수 있다. 이는 DFN의 입력변수인 길이 분포를 감안할 때 가장 작은 블록의 경우 유체유동 영역 전체를 가로지르는 등가파이프로 인하여 수두 차 방향으로 유동통로의 연결성이 양호해질 가능성이 높기 때문이며, 결과적으로 블록수리전도도가 높게 산정된 것으로 판단된다.

가장 작은 크기의 DFN 블록을 제외하면 균열의 면적빈도 및 평균길이가 가장 우세한 DFN(SET 1-6, SET 2-6, SET 3-6) 그룹의 경우 블록크기에 따른 블록수리전도도의 유의미한 변화가 관찰되지 않았지만 전반적으로 가장 큰 블록크기(20 m × 20 m)에서 블록수리전도도가 가장 높게 산정되었다. 반면에 균열의 면적빈도가 가장 낮고 및 평균길이가 가장 짧은 DFN(SET 1-1, SET 2-1, SET 3-1) 그룹의 경우에는 블록크기에 따른 수리전도도의 변화에 대한 경향을 찾기 어렵고 불규칙한 이방적 특성이 강하게 나타남을 알 수 있다. 이는 유동통로의 연결성이 결여되어 연결구조의 형태가 블록크기에 따라 상당한 차이를 가질 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 상기와 같은 결과는 균열의 면적빈도 및 길이분포가 블록크기에 따른 유동통로의 연결성에 영향을 미칠 수 있다는 점을 지시한다.

두 균열군의 교차각이 90°(SET 1)에서 30°(SET 3)로 작아질수록 블록수리전도도의 이방적 특성이 더욱 뚜렷해짐을 관찰할 수 있는데, 면적빈도 및 평균길이가 가장 우세한 DFN(SET 1-6, SET 2-6, SET 3-6) 그룹은 트레이스 선주향의 평균인 90°(E) - 270°(W)방향으로

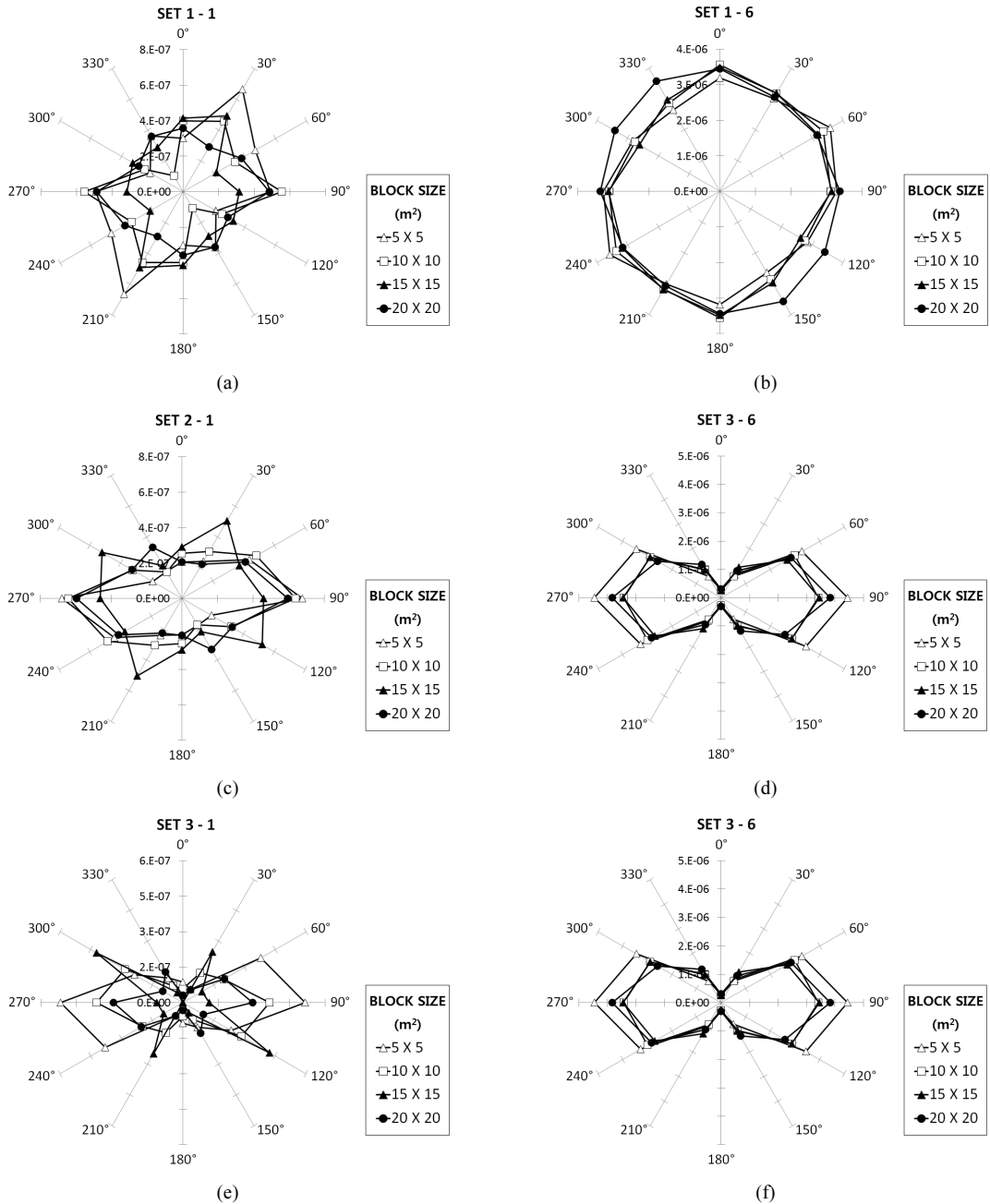


Fig. 7. Directional hydraulic conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for various block sizes of selected DFN systems

수리전도도가 높아지고 이에 직교하는 0°(N) - 180°(S) 방향으로 수리전도도가 낮아짐을 확인할 수 있다. 특히, 두 균열군의 트레이스가 직교하는 SET 1-6의 경우 (Fig. 7(b)) 20 m × 20 m 블록크기에서 수리전도도는

방향에 따른 값의 변화가 거의 없는 등방연속체 특성을 보임을 알 수 있다. 반면에 SET 3-6의 경우(Fig. 7(f)) 0° 방향으로의 수리전도도는 90° 방향과 비교하여 상대적으로 매우 낮게 산정되었다. 균열의 면적비가 낮고

평균길이가 짧은 경우(Fig. 7(a), (c), (e))에도 20 m × 20 m 블록크기에서 수리전도도는 교차각이 작아짐에 따라 E - W 방향으로 이방성이 증대됨을 인지할 수 있다.

4. 대표요소체적 및 등가연속체 특성

REV 크기 이하의 암반에서 유체의 거동은 연속체 보다 개별체 특성을 갖는 경우가 대부분이다. DFN 시스템에 대한 REV가 정의될 수 있는 조건은 블록의 크기에 따른 $k^{(p)}$ 의 유의미한 변화가 없어야하며, 또한, 블록매질을 등가연속체로 취급한 경우의 방향에 따른 이론적 블록수리전도도($\overline{k^{(p)}}$)와 $k^{(p)}$ 의 편차가 작아야한다(Kulatilake and Panda, 2000). 첫 번째 조건은 블록크기에 따른 $k^{(p)}$ 의 변화를 분석하여 비교적 쉽게 파악할 수 있다. 두 번째 조건은 이차원 블록에 대하여 등가연속체 성질에 근접 여부를 평가하는 척도로서 제안된 $\overline{k^{(p)}}$ 와 $k^{(p)}$ 간의 상대오차(ER)를 도입하여 평가할 수 있으며 ER은 다음과 같이 표현된다(Kantani, 1984, Oda, 1985).

$$ER = \left\{ (1/N) \sum (k^{(p)} - \overline{k^{(p)}})^2 \right\}^{1/2} / \left\{ (1/N) \sum k^{(p)} \right\} \quad (4)$$

여기서, N은 방향수리전도도 산정을 위해 사용한 방향의 개수이며 본 연구에서 N=12 이다. $\overline{k^{(p)}}$ 는 이차원 해석영역에서 다음 Eq. (5) - (6)을 통하여 추정할 수 있다(Kantani, 1984).

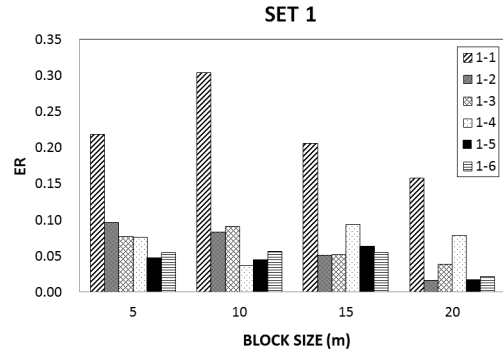
$$\overline{k^{(p)}} = \overline{K_{ij}} p_i p_j \quad (5)$$

$$\overline{K_{ij}} = (4/N) \left\{ \sum k^{(p)} p_i p_j - (1/4) \delta_{ij} \sum k^{(p)} \right\} \quad (6)$$

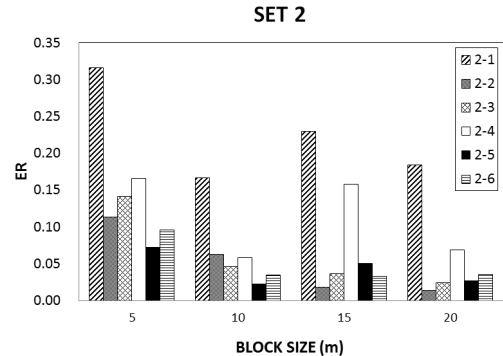
여기서, $\overline{K_{ij}}$ 는 $k^{(p)}$ 에 의해 추정된 이론적 수리전도도 텐서, p_i 와 p_j 는 각각 수두경사에 평행한 단위벡터 \mathbf{p} 의 서로 수직인 i 와 j 방향으로의 성분, δ_{ij} 는 크로네커 델타이다. 모든 방향에서 $k^{(p)} = \overline{k^{(p)}}$ 인 경우 Eq. (4)에서 ER은 0이며, 이때 매질은 완벽한 의미의 등가연속체로 취급될 수 있다. 그러나 기하학적 변동성을 갖는 균열암반 매질이 ER=0의 등가연속체 성질을 나타내는 것은 거의 불가능하며 ER이 0에 가까울수록 등가연속체 성질을 가질 가능성이 높은 것을 인식하는 것이 중요하다. $k^{(p)}$ 와 $\overline{k^{(p)}}$ 사이의 편차가 증가하여 ER이 커지면 $\overline{K_{ij}}$ 는 $k^{(p)}$ 에 대한 타당한 추정을 제공할 수 없으며, 이러한 경우 균열암반은 K_{ij} 의 등가연속체로 취급하기 어렵다.

Kulatilake and Panda(2000)는 DFN 매질에 대한 등가연속체로 취급 가능성을 ER=0.2 이하로 보고한 바 있다.

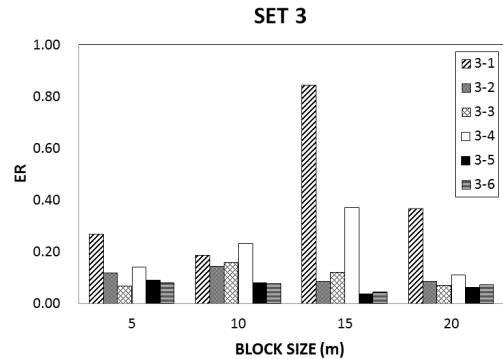
이방성을 갖는 등가연속체 매질에서의 유체유동은 K_{ij} 에 의해 표현될 수 있으며 이차원 매질의 주 수리전도도(principal hydraulic conductivity)는 K_{ij} 를 구성하는 최대 및 최소 방향으로의 수리전도도이다. 이차원 등가연속체 매질에서 K_{11} 및 K_{22} 를 각각 최대 및 최소



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. ER values vs. different block sizes for various DFN systems

Table 2. Anisotropy of hydraulic conductivity for different block sizes

| DFN ID | Size (m) | K_{11}/K_{22} | DFN ID | Size (m) | K_{11}/K_{22} | DFN ID | Size (m) | K_{11}/K_{22} |
|---------|----------|-----------------|---------|----------|-----------------|---------|----------|-----------------|
| SET 1-1 | 5 | 2.254 | SET 2-1 | 5 | 4.921 | SET 3-1 | 5 | 25.685 |
| | 10 | 2.302 | | 10 | 3.515 | | 10 | 7.523 |
| | 15 | 1.580 | | 15 | 1.632 | | 15 | 3.293 |
| | 20 | 1.297 | | 20 | 2.682 | | 20 | 6.482 |
| SET 1-2 | 5 | 1.137 | SET 2-2 | 5 | 4.476 | SET 3-2 | 5 | 52.398 |
| | 10 | 1.274 | | 10 | 3.359 | | 10 | 11.801 |
| | 15 | 1.404 | | 15 | 2.336 | | 15 | 9.481 |
| | 20 | 1.220 | | 20 | 2.730 | | 20 | 12.031 |
| SET 1-3 | 5 | 1.207 | SET 2-3 | 5 | 5.515 | SET 3-3 | 5 | 31.194 |
| | 10 | 1.323 | | 10 | 4.021 | | 10 | 8.301 |
| | 15 | 1.385 | | 15 | 2.087 | | 15 | 6.906 |
| | 20 | 1.345 | | 20 | 2.854 | | 20 | 11.122 |
| SET 1-4 | 5 | 1.262 | SET 2-4 | 5 | 3.871 | SET 3-4 | 5 | 98.412 |
| | 10 | 1.217 | | 10 | 2.950 | | 10 | 7.250 |
| | 15 | 1.051 | | 15 | 2.395 | | 15 | 5.327 |
| | 20 | 1.214 | | 20 | 2.629 | | 20 | 5.266 |
| SET 1-5 | 5 | 1.125 | SET 2-5 | 5 | 3.698 | SET 3-5 | 5 | 143.947 |
| | 10 | 1.159 | | 10 | 2.957 | | 10 | 11.789 |
| | 15 | 1.204 | | 15 | 2.499 | | 15 | 10.586 |
| | 20 | 1.091 | | 20 | 2.796 | | 20 | 11.673 |
| SET 1-6 | 5 | 1.262 | SET 2-6 | 5 | 4.159 | SET 3-6 | 5 | 462.792 |
| | 10 | 1.206 | | 10 | 3.252 | | 10 | 15.207 |
| | 15 | 1.203 | | 15 | 2.550 | | 15 | 10.073 |
| | 20 | 1.144 | | 20 | 2.718 | | 20 | 10.936 |

주 수리전도도라 할 때 평균 블록수리전도도 (K_0)는 다음 Eq. (7)과 같이 정의할 수 있으며 현장 매질의 수리전도도를 간편하게 표현하는 파라미터로 흔히 사용된다.

$$K_0 = (K_{11} + K_{22})/2 \quad (7)$$

여기서, K_{11} 및 K_{22} 의 크기와 방향은 K_{ij} 의 고유값과 고유벡터로부터 산정할 수 있다.

Fig. 8은 본 연구의 DFN 시스템에 대하여 블록크기에 따라 산정된 ER을 그래프에 도시한 것이다. 균열군의 교차각이 큰 경우(SET 1=90°, SET 2=60°) 블록크기가 증가함에 따라 ER 값이 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 블록크기가 증가할수록 등가연속체 매질로 취급할 가능성이 높아짐을 의미한다. 블록크기가 작을수록 ER이 높은 경향은 DFN 영역의 크기에 비해 상대적으로 대규모인 균열이 우세해져서 이방적 특성이 더욱 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 균열군의 교차각이 가장 작은 경우(SET 3=30°) ER은 SET 1 및 SET 2의 값과 비교할 때 전반적으로 증가하였으며 가장 큰 블록크기

에서도 높은 값의 ER이 산정되어 매질을 등가연속체로 취급하기 어려운 DFN 시스템(SET 3-1)이 존재함을 알 수 있다.

균열의 면적빈도가 낮고(2/m²/set) 평균길이가 가장 짧은(mean=0.8 m) SET 1-1, SET 2-1, SET 3-1은 균열의 방향성 및 블록크기와 무관하게 비교적 높은 ER 값이 산정되어 등가연속체로 취급할 수 없을 것으로 생각되며, REV 또한 정의하기 어려울 것으로 판단된다. 이들 DFN 시스템을 제외하면 균열의 면적빈도를 두 배(4/m²/set)로 높인 SET 1-4, SET 2-4, SET 3-4의 ER 값이 나머지 DFN에서 산정된 ER보다 다소 높은 경향이 있지만, 세 DFN 시스템 모두 20 m×20 m 블록크기에서 ER은 10% 내로 평가되었음을 알 수 있으며, 이때의 블록크기를 REV로 정하고 등가연속체로 취급하는데에 큰 이견이 없을 것으로 사료된다. 그 외의 모든 DFN 시스템에서도 20 m×20 m에서 10% 이하의 충분히 낮은 ER이 산정되었다.

Table 2는 블록크기에 따른 이방성의 척도로서 K_{11} 과 K_{22} 의 비를 수록한 것인데, 균열 트레이스의 교차각이

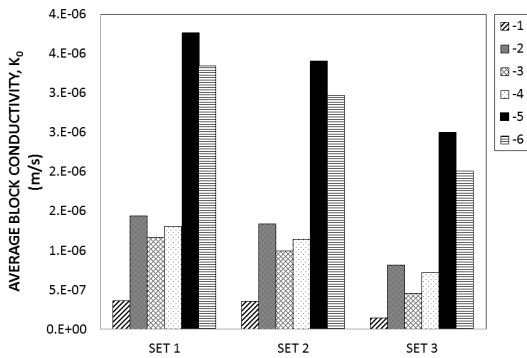


Fig. 9. Average block conductivity vs. fracture network system for block size of 20 m × 20 m

작을수록 DFN 블록의 이방성이 증대되어 K_{11}/K_{22} 의 값이 증가함을 알 수 있다. 교차각 90°인 SET 1에서는 등가연속체로 취급하기 어려운 SET 1-1을 제외하고 블록 크기에 따른 K_{11}/K_{22} 의 유의미한 변화를 볼 수 없으며 등방적 특성을 나타낸다. SET 2 및 SET 3는 블록크기가 증가할수록 K_{11}/K_{22} 가 감소하여 수렴하는 경향을 인지할 수 있다. 이는 앞서서도 언급하였듯이 블록크기가 작을수록 DFN 영역의 크기에 비해 상대적으로 대규모의 균열이 우세해져서 수리전도도의 이방적 특성이 더욱 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 따라서 현장규모를 고려하여 단층 또는 대규모 절리가 발달한 경우 블록수리전도도의 이방적 특성을 고려한 유체유동 해석이 수행되어야 한다.

Fig. 9는 본 수치실험의 REV로 정할 수 있는 20 m × 20 m 블록크기에서 K_0 의 변화를 그래프에 도시한 것이다. SET 1, 2, 3의 방향 그룹에서 균열의 면적빈도가 두 배로 증가하였을 때 K_0 는 두 배 이상(최소 2.6배 ~ 최대 5.1배) 증가하였다. 각각의 방향그룹에서 면적빈도가 같을 때 균열의 길이가 길어지면 K_0 도 증가하였음을 알 수 있다. 균열의 면적빈도가 높고 평균길이가 긴 DFN 시스템(SET 1-5, SET 2-5, SET 3-5, SET 1-6, SET 2-6, SET 3-6)에서 높은 값의 K_0 가 산정되었으며 면적빈도가 낮고 평균길이가 가장 짧은 DFN 시스템(SET 1-1, SET 2-1, SET 3-1)에서 가장 낮은 K_0 를 도출하였다. 균열의 평균길이=1.5, 분산=2.0인 SET 1-5, SET 2-5, SET 3-5가 평균길이=2.0, 분산=1.5인 SET 1-6, SET 2-6, SET 3-6보다 K_0 가 다소 높게 산정된 이유는 평균길이가 작더라도 분산이 높은 경우 블록크기에 비하여 상대적으로 긴 균열이 생성되어 블록 내의 유체흐름을 지배할 가능성이 높기 때문인 것으로 사료된다. 면적빈도 및 길이분포의 값이 고정된 경우에 균

열의 교차각이 작아질수록 K_0 는 뚜렷이 감소한다. 이와 같은 결과는 균열의 방향성, 밀도, 길이 등의 기하학적 속성이 복합적으로 DFN의 블록수리전도도에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. DFN에 대한 등가연속체 해석을 위한 가이드라인 도출을 위해서는 균열의 방향분포, 밀도, 길이분포 등과 더불어 간극분포를 고려한 수치실험 조건을 현장압반에 상응하도록 더욱 체계화, 다양화하여 기하학적 속성 변화에 따른 REV 블록의 수리적 특성에 대한 후속 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구는 블록크기 및 균열의 기하학적 속성이 2-D DFN의 수리상수에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구의 DFN 시스템은 균열의 면적빈도가 낮거나 길이분포가 짧을수록 블록크기에 따른 수리전도도의 변화를 규정하기 어려우며 불규칙한 이방적 특성이 강하게 나타나는 것으로 평가되었다. 이는 유동통로의 취약한 연결성으로 인하여 연결구조의 형태가 블록크기 및 방향에 따라 변할 수 있기 때문인 것으로 사료되며 이와 같은 DFN 시스템에 대한 유체유동 연구를 위해서는 등가의 연속체 접근법보다 개별체 접근법이 추천된다.
2. 균열의 면적빈도가 높고 길이분포가 긴 DFN 시스템은 블록크기가 REV에 도달하였을 때 가장 높은 블록수리전도도 값을 도출하였다. 그러나 블록크기에 비해 상대적으로 긴 균열이 존재하여 해석영역을 가로지르는 경우에는 블록크기에 관계없이 높은 블록수리전도도를 가지며 이방적 특성은 더욱 뚜렷하게 나타난다. 따라서 단층 또는 대규모 절리 등과 같이 상대적으로 긴 연장성의 불연속면이 발달한 경우 현장규모를 고려하여 블록수리전도도의 이방적 특성을 고려한 유체유동 해석이 수행되어야 한다.
3. 본 연구에서 이방적 블록수리전도 특성은 균열사이의 교차각이 작아질수록 더욱 강하게 나타나지만 교차각이 작아도(30°) 면적빈도와 길이분포에 따라 REV가 정의될 수 있다. 교차각이 60° 이상인 경우에는 블록크기가 증가할수록 매질에 대한 등가연속체 취급 가능성이 높아진다. 등가연속체 유체유동 해석을 위한 REV 크기는 ER 값을 고려하여 결정할 수 있다.
4. 균열의 기하학적 속성은 복합적으로 DFN 시스템의 수리적 이방성 및 등가연속체 특성에 영향을 미친다.

등가연속체 해석을 위한 요소크기 결정 및 현장조건에서의 수리시험 구간 설정 등의 활용성 제고를 위한 가이드라인 도출을 위해서는 균열의 방향분포, 밀도, 길이분포 등과 더불어 간극분포를 고려한 수치실험 조건을 현장압반에 상응하도록 더욱 체계화, 다양화하여 기하학적 속성 변화에 따른 REV 블록의 수리적 특성에 대한 후속 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

References

- Andersson, J. and B. Dverstorp, 1987, Conditional simulations of fluid flow in three dimensional networks of discrete fractures, *Water Resour. Res.* 23.10, 1876-1886.
- Bang, S., S. Jeon and J. Choe, 2003, Determination of equivalent hydraulic conductivity of rock mass using three-dimensional discontinuity network, *J. of Korean Society for Rock Mech.*, 13, 52-3.
- Bear, J., C.F. Tsang and G. de Marsily, 1993, *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, Academic Press, San Diego, 560p.
- Cacas, M.C., E. Ledoux, G. de Marsily, B. Tillie, A. Barbreau, E. Durand, B. Feuga and P. Peaudecerf, 1990a, Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model, *Water Resour. Res.* 26.3, 479-489.
- Cacas, M.C., E. Ledoux, G. de Marsily, A. Barbreau, P. Calmels, B. Gaillard and R. Margritta, 1990b, Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 2. The transport model, *Water Resour. Res.* 26.3, 491-500.
- Carrera J., J. Heredia, S. Vomvoris and P. Hufschmied, 1990, Modeling of flow on a small fractured monzonitic gneiss block, Selected paper in Hydrogeology of low permeability Environments, *Int. Assoc. of hydrogeologists, Hydrogeology.* 2, 115-167.
- Dershowitz, W.S. and H.H. Einstein, 1987, Three-dimensional flow modeling in jointed rock masses. In: Herget, O., Vongpaisal, O. (Eds.), *Proceedings of the Sixth Congress on ISRM*, Montreal, Canada, 87-92.
- Dershowitz, W.S. and C. Fidelibus, 1999, Derivation of equivalent pipe network analogues for three-dimensional discrete fracture networks by the boundary element method, *Water Resour. Res.* 35.9, 2685-2691.
- Diodato, D.M., 1994. A compendium of Fracture Flow Models, 1994, Argonne National Laboratory Report, 88p.
- Dverstorp, B. and J. Andersson, 1989, Application of the discrete fracture network concept with field data: possibilities of model calibration and validation, *Water Resour. Res.* 25.3, 540-550.
- Elsworth, D., 1986a, A hybrid boundary element-finite element analysis procedure for fluid flow simulation in fractured rock masses, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 10.6, 569-584.
- Elsworth, D., 1986b, A model to evaluate the transient hydraulic response of three-dimensional sparsely fractured rock masses, *Water Resour. Res.* 22.13, 1809-1819.
- Herbert, A.W., 1996, Modelling approaches for discrete fracture network flow analysis. In: Stephansson, O., Jing, L., Tang, C.F. (Eds.), *Coupled Thermo-hydro-mechanical Processes of Fractured Media-mathematical and Experiment Studies*, Elsevier, Amsterdam, 213-229.
- Hsieh, P.A. and S.P. Neuman, 1985, Field determination of the three dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media-1. Theory, *Water Resour. Res.* 21.11, 1655-1665.
- Jing, L. and J. Hudson, 2002, Numerical methods in rock mechanics, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39.4, 409-427.
- Kantani, K., 1984, Distribution of directional data and fabric tensors, *Int. J. Engng Sci.* 22.2, 149-164.
- Kulatilake, P.H.S.W. and B.B. Panda, 2000, Effect of block size and joint geometry on jointed rock hydraulics and REV, *J. Eng. Mech.* 126, 850-858.
- Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson and P.A. Witherspoon, 1982, Porous Media Equivalents for networks of Discontinuous fractures, *Water Resour. Res.* 18.3, 645-658.
- Long, J.C.S., P. Gilmour and P.A. Witherspoon, 1985, A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures, *Water Resour. Res.* 21.8, 1105-1115.
- Neuman, S.P. and J.S. Depner, 1988, Use of variable-scale pressure test data to estimate the log hydraulic conductivity covariance and dispersivity of fractured granites near Oracle, Arizona, *J. Hydrol.* 102, 475-501.
- Oda, M., 1985, Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Geotechnique.* 35.4, 483-495.
- Park, B.Y., K.S. Kim, C.S. Kim, D.S. Bae and H.K. Lee, 2001, Analysis of the pathways and travel times for groundwater in volcanic rock using 3D fracture network, *J. of Korean Society for Rock Mech.*, 11, 42-58.
- Park, J.S., D.W. Ryu, C.H. Ryu and C.I. Lee, 2007, Groundwater flow analysis around hydraulic excavation damaged zone, *J. of Korean Society for Rock Mech.*, 17, 109-118.
- Priest, S.D., 1993, *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, London, 473p.
- Rouleau, A. and J.E. Gale, 1987, Stochastic discrete fracture simulation of ground water flow into an underground excavation in granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 24.2, 99-112.
- Schwartz, F.W., W.L. Smith and A.S. Crowe, 1983, A stochastic analysis of microscopic dispersion in fractured media, *Water Resour. Res.* 19.5, 1253-1265.
- Shapiro, A.M. and J. Andersson, 1985, Simulation of

- steady state flow in three dimensional fracture networks using boundary element method, *Advances in Water Resour.* 8.3, 106-110.
28. Song, M.K., K.S. Jue and H.K. Moon, 1994, A theoretical and numerical study on channel flow in rock joints and fracture networks, *J. of Korean Society for Rock Mech.*, 4, 1-16.
29. Sudicky, E.A. and R.G. McLaren, 1992, The Laplace Transform Galerkin technique for large-scale simulation of mass transport in discretely fractured porous formations, *Water Resour. Res.* 28.2, 499-514.
30. Wilcock, P., 1996, The NAPSAC fracture network code. In: Stephansson, O., Jing, L., Tang, C.F. (Eds.), *Coupled Thermo-hydro-mechanical Processes of fractured Media*, Elsevier, Rotterdam, 529-538.
31. Zimmerman, R.W. and G.S. Bodvarsson, 1995, *Effective Transmissivity of Two-dimensional Fracture Networks*, LBL Report, 19p.



한 지 수

2014년 부경대학교 에너지자원공학과
공학사

Tel: 051-629-6559
E-mail: m-a-m@nate.com
현재 부경대학교 에너지자원공학과 석사
과정



엄 정 기

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과
이학사
1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이
학석사
1997년 University of Arizona 자원지질
공학과 공학박사

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