

# 절리성 암반의 이차원 균열텐서 파라미터와 수리적 특성 간의 상관성 분석에 관한 연구

엄정기\*, 한지수

## Analysis of Relationship between 2-D Fabric Tensor Parameters and Hydraulic Properties of Fractured Rock Mass

Jeong-Gi Um\*, Jisu Han

**Abstract** As a measure of the combined effect of fracture geometry, the fabric tensor parameters could quantify the status of the connected fluid flow paths in discrete fracture network (DFN). The correlation analysis between fabric tensor parameters and hydraulic properties of the 2-D DFN was performed in this study. It is found that there exists a strong nonlinear relationship between the directional conductivity and the fabric tensor component estimated in the direction normal to the direction of hydraulic conductivity. The circular radial plots without significant variation of the first invariant ( $F_0$ ) of fabric tensor for different sized 2-D DFN block are a necessary condition for treating representative element volume (REV) of a fractured rock mass. The relative error (ER) between the numerically calculated directional hydraulic conductivity and the theoretical directional hydraulic conductivity decreases with the increase in  $F_0$ . A strong functional relation seems to exist between the  $F_0$  and the average block hydraulic conductivity.

**Key words** Fractured rock mass, Fabric tensor, Discrete fracture network, Hydraulic properties, Numerical experiments

**초 록** 균열텐서 파라미터는 절리의 기하학적 속성이 결합된 효과를 지시하는 척도로 사용할 수 있으며 불연속절리망(DFN)에서 유체 유동통로의 연결 상태를 정량화할 수 있다. 본 연구는 이차원 DFN의 균열텐서 파라미터와 수리적 특성 간의 상관성 분석을 수행하였다. DFN에서 임의 방향으로의 수리전도도는 이에 직교하는 방향으로 산정된 균열텐서 성분과 강한 비선형 관계를 갖는 것으로 평가되었다. 서로 다른 규모의 이차원 DFN 블록에서 방향에 따른 균열텐서의 일차불변량( $F_0$ )을 방사형 도표로 나타내었을 때, 방향에 따른  $F_0$  값의 유의미한 변화가 없는 원형의 플롯은 절리성 암반을 대표요소체적으로 취급하기 위한 필요조건이 될 수 있다. DFN 블록에서 임의 방향으로 개별체 해석기법으로 산정한 수리전도도와 이론적 수리전도도 사이의 상대오차(ER)는  $F_0$ 의 증가에 따라 감소한다.  $F_0$ 는 평균 블록수리전도도와 강한 함수관계를 갖는 것으로 분석되었다.

**핵심어** 절리암반, 균열텐서, 불연속절리망, 수리적 특성, 수치실험

### 1. 서론

낮은 수리전도 특성을 갖는 결정질 암석으로 이루어진 절리성 암반 매질에서의 유체 흐름은 불연속절리망(DFN; discrete fracture network)을 구성하는 절리의 기하학적 속성에 좌우된다. 저자들은 일련의 선행연구를 통하여 절리의 방향성, 빈도, 길이, 수리간극 등의 개별적인 기하학적 속성이 절리성 암반의 수리전도 특성에 미치는 효과에 대하여 논의하였다(Han and Um, 2015,

Received: Apr. 11, 2017

Revised: Apr. 20, 2017

Accepted: Apr. 20, 2017

\*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

2016a, 2016b). 이와 같은 절리의 개별적인 기하학적 속성들을 결합하여 정량화할 수 있는 파라미터의 도입은 절리의 연결구조와 수리적 특성 간의 상관성을 파악하는 데에 매우 유용할 수 있다. Kulatilake et al.(1993, 1994, 1997)은 Oda(1982)가 정립한 균열텐서(fabric tensor) 이론을 바탕으로 절리의 기하학적 속성과 절리성 압박의 강도 및 변형 간의 관계를 논의한 바 있다.

Oda(1982)는 절리의 방향, 빈도, 길이 등의 기하학적 속성을 바탕으로 균열텐서( $F_{ij}$ )를 정의하고 수리전도도 텐서( $K_{ij}$ )와의 관계식을 제안하였다. 절리의 기하학적 속성으로 정의되는 균열텐서에 대한 세부적인 내용은 다음 절에 수록되어있다. Oda(1985)는 등가의 수리전도도텐서와 절리의 기하학적 속성 간에 관계에 대한 이론적 정립을 위하여 개별체 유체유동 해석에 의한 수리전도도와 균열텐서를 통해 추정된 수리전도도를 비교 분석하였는데, DFN을 이루는 절리의 기하학적 속성 변화에 따라 비교치의 상당한 차이가 나타날 수 있음을 보고하였다. Oda(1982)가 제안한 균열텐서와 수리전도도텐서와의 관계식은 해석영역이 등가의 연속공극매질로 취급될 수 있을 정도로 수많은 균열에 의해 연결된 유체유동 통로가 확보 되었다는 가정에 근거한 것이다. 이는 이론적으로 해석영역의 크기가 대표요소체적(REV) 이상으로 큰 경우에 적용 가능성이 높아질 수 있음을 의미하지만 실제 현장의 압박에 이를 적용하기 위해서는 요소 이론에 대한 체계적인 평가를 통한 적용 지침의 확립이 필요하다. 절리성 압박에서 임의 방향으로의 수리전도도는 고려한 방향에 따라 달라지는 절리의 연결성에 영향을 받는다. 절리의 연결성은 절리의 위치, 방향, 빈도, 크기 등의 기하학적 속성이 결합된 효과에 좌우된다. 본 연구에서는 균열텐서 파라미터와 블록수리상수 간의 상관성 분석을 수행하여 균열텐서의 성분 및 일차불변량이 이차원 DFN의 수리상수에 미치는 효과를 평가하였다.

## 2. 균열텐서의 성분 및 일차불변량

삼차원 DFN 시스템에서 m번째의 절리군에 대한 균열텐서는 다음과 같이 정의된다(Oda, 1982).

$$F_{ij}^{(m)} = 2\pi\rho_v \int_0^\infty \iint_{\Omega/2} r^3 n_i n_j f(\mathbf{n}, r) d\Omega dr \quad (1)$$

여기서,  $\rho_v$ 는 단위체적당 절리개수(체적빈도),  $r$ 은 원판형 절리의 반경(절리크기),  $\mathbf{n}$ 은 절리면의 단위 법선벡터,  $n_i$  및  $n_j$ ( $i, j=1,2,3$ )는 각각 서로 직교하는  $i$  및  $j$  방

향으로  $\mathbf{n}$ 의 벡터성분,  $f(\mathbf{n}, r)$ 은  $\mathbf{n}$ 과  $r$ 의 확률밀도함수,  $\Omega/2$ 는 단위반경의 반구표면에 대응하는 입체각이다. 절리의 방향 및 크기분포가 서로 종속되지 않는다면 식 (1)의 균열텐서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{ij}^{(m)} = 2\pi\rho_v \int_0^\infty r^3 f(r) dr \iint_{\Omega/2} n_i n_j f(\mathbf{n}) d\Omega \quad (2)$$

이와 같은 균열텐서  $F_{ij}$ 는 삼차원  $x$ - $y$ - $z$  직교좌표계(Cartesian coordinate)에서 다음과 같은 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$F(F_{ij}) = \begin{bmatrix} F_{xx} & F_{xy} & F_{xz} \\ F_{yx} & F_{yy} & F_{yz} \\ F_{zx} & F_{zy} & F_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $F_{xx}, \dots, F_{zz}$ 는 균열텐서  $F$ 의 성분이다. 균열텐서  $F$ 는  $F_{ij}=F_{ji}$ 의 대칭행렬이므로 서로 직교하는 세 방향으로 균열텐서의 주성분(principal components)을 결정할 수 있으며 이로부터 균열텐서의 일차, 이차 및 삼차 불변량(invariant)을 산정할 수 있다.

삼차원에서 m번째 절리군에 대한 임의의 p 방향으로의 균열텐서 성분은 식 (2)로부터 다음과 같이 정의할 수 있다(Kulatilake et. al., 1994).

$$F_p^{(m)} = 2\pi\rho_v \int_0^\infty r^3 f(r) dr \iint_{\Omega/2} n_p^2 f(\mathbf{n}) d\Omega \quad (4)$$

여기서  $n_p$ ( $n_p=\mathbf{n}\cdot\mathbf{p}$ )는  $\mathbf{p}$ 방향으로 절리 법선벡터의 성분이다. 이차원에서 절리의 방향 및 크기분포가 서로 종속되지 않는다면 균열텐서의 일반식은 식 (2)와 유사하게 다음 식 (5)와 같이 표현할 수 있다(Kulatilake et. al., 1994).

$$F_{ij}^{(m)} = \rho_a \int_0^{r^{max}} r^2 f(r) dr \int_0^\pi n_i n_j f(\theta) d\theta \quad (5)$$

여기서,  $\rho_a$ 는 단위면적당 절리개수(면적빈도),  $r$ 은 절리의 길이,  $\theta$ 는 절리방향과 수평방향 사이의 각도,  $n_i$  및  $n_j$ ( $i, j=1,2$ )는 각각 서로 직교하는  $i$  및  $j$  방향으로  $\mathbf{n}$ 의 벡터성분,  $f(r)$  및  $f(\theta)$ 는 각각  $r$  및  $\theta$ 의 확률밀도함수이다. 따라서 m번째 절리군에 대한 임의의 p방향으로의 이차원 균열텐서 성분은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_p^{(m)} = \rho_a E(r^2) \int_0^\pi n_p^2 f(\theta) d\theta \quad (6)$$

$N$ 개의 절리군으로 구성된 DFN 시스템에 대하여 임의의 방향으로의 균열텐서성분(FTC; fabric tensor component)은 다음 식 (7)을 사용하여 산정할 수 있다(Kulatilake et al., 1994).

$$F_p = \sum_{m=1}^N F_p^{(m)} \quad (7)$$

절리의 빈도가  $\rho$ 이며, 길이( $r$ )가 확률분포를 이루는 이차원 DFN 블록에서 절리의 방향성이  $\theta$ 로 일정할 때 균열텐서의 성분( $F_{xx}$ ,  $F_{yy}$ )은 다음과 같다.

$$F_{xx} = \rho E(r^2) \sin^2 \theta \quad (8a)$$

$$F_{yy} = \rho E(r^2) \cos^2 \theta \quad (8b)$$

여기서,  $E(r^2)$ 은 절리군에서 절리 길이 제곱의 기대값,  $x$  및  $y$ 는 각각 수평 및 수직 방향이다. 따라서 이차원 DFN 시스템에서 균열텐서의 일차불변량( $F_0$ )은 다음과 같이 유도할 수 있으며,

$$F_0 = \rho E(r^2) (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = \rho E(r^2) \quad (9)$$

$N$ 개의 절리군으로 구성된 DFN 시스템의  $F_0$ 는 다음 식 (10)을 사용하여 산정할 수 있다.

$$F_0 = \sum_{m=1}^N \rho_m E(r_m^2) \quad (10)$$

여기서,  $\rho_m$ 은 절리군  $m$ 의 빈도,  $E(r_m^2)$ 은 절리군  $m$ 에서 절리 길이 제곱의 기대값이다.

### 3. 방향에 따른 블록수리전도도와 균열텐서성분 간의 관계

저자들은 선행연구를 통하여 DFN 블록의 크기 및 절리의 기하학적 속성이 DFN 시스템의 REV와 수리적 이방성 및 등가연속체 특성에 미치는 효과를 평가하기 위하여 확정적인 절리의 방향성과 빈도 그리고 확률분포를 갖는 길이로 구성된 다양한 규모의 이차원 DFN 블록에서 임의의 방향( $\mathbf{p}$ )으로의 블록수리전도도( $k^{(p)}$ ), DFN 블록을 등가연속체로 가정한 이론적 블록수리전도도( $\overline{k^{(p)}}$ )와  $k^{(p)}$  간의 상대오차(ER), DFN 블록의 평균 블록수리전도도( $K_0$ ) 등의 블록수리상수를 산정하였다(Han and Um, 2015). 이와 같은  $k^{(p)}$ , ER,  $K_0$  등의 블록수리

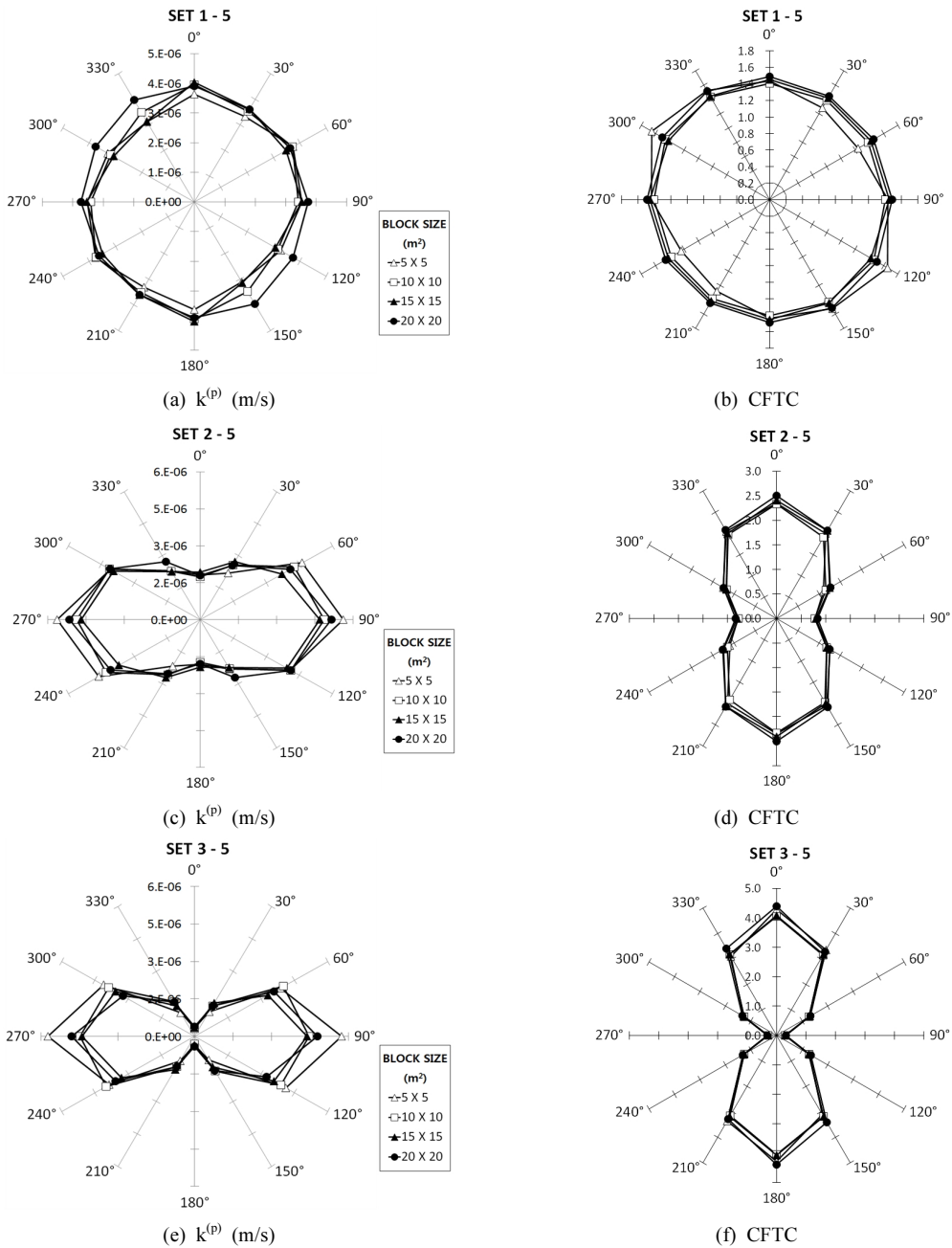
상수에 대한 정의 및 산정 절차는 저자들의 선행연구에 자세히 수록되어 있다(Han and Um, 2015). 여기서 DFN을 구성하는 모든 절리 트레이스는 0.1 mm의 수리간극을 갖는 선형의 등가유로관으로 취급하였으며 해석영역은 절리의 기하학적 속성 설정에 따른 총 18개의 DFN 시스템(Table 1)에 대하여 각각의 32 m × 32 m 영역 중심에서 최소 5 m × 5 m 부터 최대 20 m × 20 m를 이루는 정사각형의 DFN 블록이다(Han and Um, 2015). 본 연구에서는 저자들의 선행연구(Han and Um, 2015)에서 설정한 DFN 시스템에 대하여 매 30° 간격의 방향으로 식 (7)을 사용하여 균열텐서성분을 산정하였다.

이차원 균열텐서 및 균열텐서성분의 원리를 감안할 때 DFN 시스템에 대한 균열텐서성분의 크기는 유체의 유동 통로 역할을 하는 절리의 발달 양상을 반영하는 것으로 해석할 수 있다. DFN 시스템에서 해석영역의 유입경계에서 유출경계까지 서로 연결된 절리만이 DFN 시스템을 통한 유체유동에 기여하므로, 본 연구에서는 DFN 블록에서 연결성이 결여된 노드(node)를 제외하고 서로 연결된 절리로 구성된 DFN 블록에 대하여 균

**Table 1.** Summary of fracture geometry parameter values for the generated DFN systems (Han and Um, 2015)

DFN ID	Orientation (degrees)	$d$	$L$	
			$\mu$	$\sigma^2$
SET 1-1	45 & 135	2	0.8	1.6
SET 1-2	45 & 135	2	1.5	2.0
SET 1-3	45 & 135	2	2.0	1.5
SET 1-4	45 & 135	4	0.8	1.6
SET 1-5	45 & 135	4	1.5	2.0
SET 1-6	45 & 135	4	2.0	1.5
SET 2-1	60 & 120	2	0.8	1.6
SET 2-2	60 & 120	2	1.5	2.0
SET 2-3	60 & 120	2	2.0	1.5
SET 2-4	60 & 120	4	0.8	1.6
SET 2-5	60 & 120	4	1.5	2.0
SET 2-6	60 & 120	4	2.0	1.5
SET 3-1	75 & 105	2	0.8	1.6
SET 3-2	75 & 105	2	1.5	2.0
SET 3-3	75 & 105	2	2.0	1.5
SET 3-4	75 & 105	4	0.8	1.6
SET 3-5	75 & 105	4	1.5	2.0
SET 3-6	75 & 105	4	2.0	1.5

note:  $d$ =plane density (#/m<sup>2</sup>/set),  $L$  = gamma distributed trace length (m),  $\mu$ =mean,  $\sigma^2$  = variance



**Fig. 1.** Comparison between directional block conductivity ( $k^{(p)}$ ) and connected fabric tensor component (CFTC) for different block sizes of selected DFN systems

열텐서성분(CFTC; connected fabric tensor component)을 산정하였다. Fig. 1은 Table 1의 총 18개 DFN 시스템 중에서 SET 1-5, SET 2-5, SET 3-5에서 매 30° 방향으로 블록크기의 변화에 따라 산정한  $k^{(p)}$ 와 CFTC를 도시

한 것이다. 두 절리군 사이의 각도가 90°인 SET 1-5에서 산정한  $k^{(p)}$ 와 CFTC는 전반적으로 등방적 특성을 나타내며 최대 블록크기에서 방향에 따른 변화가 작아져서 원에 가까운 모습을 보여준다(Fig. 1(a) & (b)). 두

절리군 사이의 각도가 60°인 SET 2-5에서  $k^{(p)}$ 는 이방성이 증대되어 90°-270° 방향으로 최대값, 0°-180° 방향으로 최소값이 산정되었으며(Fig. 1(c)), CFTC는 0°-180° 방향으로 최대값, 90°-270° 방향으로 최소값이 산정되었음을 알 수 있다(Fig. 1(d)). 이와 같은 양상은 두 절리군 사이의 각도가 30°로 이방성이 더욱 증대된 SET 3-5에서도 유사하게 나타난다(Fig. 1(e) & (f)). Fig. 1(b), (d), (f)에 도시된 CFTC를 90° 회전하면 CFTC의 모양은 각각 Fig. 1(a), (c), (e)에 도시된  $k^{(p)}$ 의 모양과 유사해짐을 알 수 있는데,  $k^{(p)}$ 는 절리선을 따른 유체흐름을 고려하여 결정되는 데에 반하여 CFTC는 절리선의 법선벡터로 산정되었음을 상기할 때, 이는 임의 방향으로의 균열텐서성분이 이에 직교하는 방향으로의 수리전도도와 상관성이 존재함을 지시한다. 따라서 본 연구는 Table 1의 DFN 시스템에 대하여 블록크기를 달리 하며 매 30° 방향으로 산정된 CFTC와 이에 수직 방향으로의  $k^{(p)}$  간의 상관성을 분석하였다.

본 연구는 DFN 블록에서 산정된 무차원 변수 CFTC와  $k^{(p)}$ 의 상관관계를 분석하기 위하여  $k^{(p)}$ 를 개별절리의 수리전도도로 나누어 정규화한 무차원의  $K_N^p$ 를 종속변수로 하여 두 무차원 변수 간에 회귀식과 상관계수를 추정하였다. Fig. 2는 두 절리군의 교차각에 따라 구분한 세 개의 방향그룹에 대하여 DFN 블록의 크기와 절리의 빈도 및 길이분포 변화에 따른 CFTC와  $K_N^p$ 의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 2(a)에 도시된 두 절리군 사이의 각도가 90°인 SET 1은 CFTC와  $K_N^p$  간에 상관계수 0.93의 매우 강한 비선형의 상관관계를 도출하였다. 두 절리군 사이의 각도가 60° 및 30°를 이루는 SET 2 및 SET 3에서도 비선형 회귀식의 상관계수는 0.81 이상으로 두 변수 간에 강한 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 컴퓨터 리소스의 한계로 방대한 연산 시간을 필요로 하는 현장 규모에서 임의 방향으로의 블록수리전도도를 이보다 작은 규모의 해석영역에서 산정된 블록수리전도도에 근거하여 추정할 수 있는 가능성을 지시한다. 그러나 본 연구는 DFN 블록에서 모든 개별절리의 수리전도도를 동일한 값으로 가정하여 단순화하였으며 두 절리군의 제한된 절리조합을 사용한 이차원 해석에 근거한 것이므로, 절리군 개수 및 개별절리에 대한 수리전도도의 다변화와 더불어 삼차원 해석으로의 확장을 통하여 연구 결과의 일반화가 필요하다.

#### 4. 균열텐서의 일차불변량이 등가연속체 특성에 미치는 효과

균열텐서의 일차불변량( $F_0$ )은 본 연구의 DFN 시스템

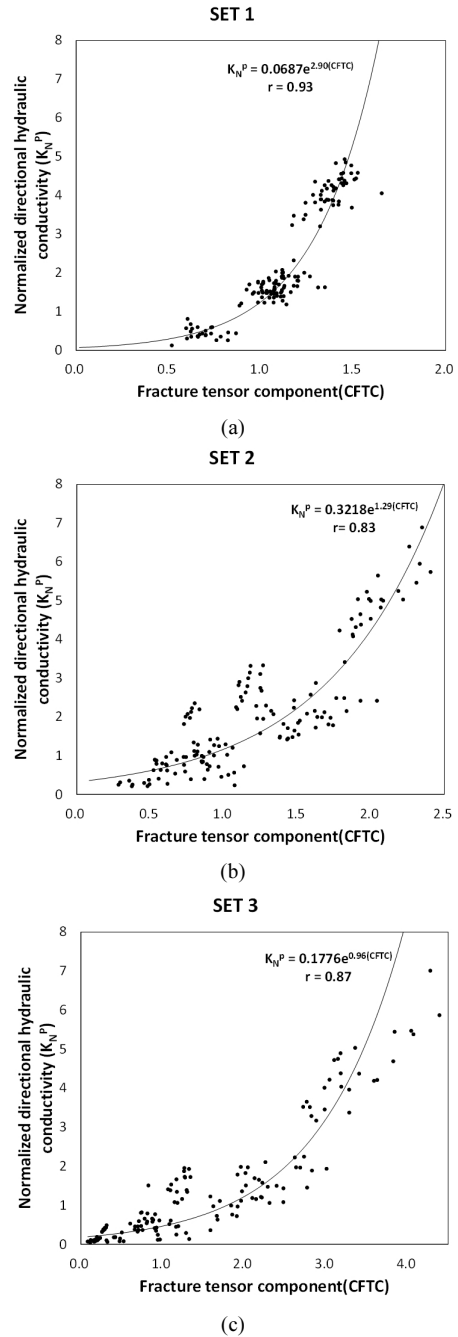


Fig. 2. Relation between connected fabric tensor component (CFTC) and normalized directional hydraulic conductivity ( $K_N^p$ ) for DFN systems

에서 0°에서 360°까지 매 30° 방향으로 좌우에 각각 높은 정수두 경계와 낮은 정수두 경계를 설정한 다양한 크기의 DFN 블록 내에서 연결성을 유지하는 모든 절리

를 사용하여 산정되었다. Fig. 3은 SET 1-5, SET 2-5, SET 3-5의 DFN 블록에 대하여 매 30° 방향으로 블록 크기에 따른  $F_0$ 의 변화를 앞에서와 같이 방사형 그래프에 도시한 것이다. 두 절리군 사이의 각도가 90°인 SET 1-5에서 산정한  $F_0$ 는 본 연구에서 고려한 최소 크기인 5 m × 5 m DFN 블록에서 방향에 따른 변화가 가장 크게 나타났으며 DFN 블록의 크기가 증가하여 본 연구에서 고려한 최대 크기인 20 m × 20 m에서는 방향에 따른  $F_0$ 의 변화가 거의 없어서 원형에 가까운 모습을 보인다. 이러한 양상은 SET 2-5에서도 유사하며, 두 절리군 사이의 각도가 30°로 셋 중에 수리적 이방성이 가장 강한 SET 3-5의 경우에도 블록크기가 가장 클 때  $F_0$ 의 변화가 가장 작게 나타났다. 또한, 전반적으로 블록의 크기가 증가할수록  $F_0$ 가 증가하는 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 이차원에서 식(9)로 표현되는  $F_0$ 는 절리의 길이와 빈도가 결합된 효과를 반영하며 좌표계와 무관하므로  $F_0$ 는 이론적으로 방향에 따른 변화 없이 같은 값을 가져야한다. 따라서 Fig. 3에 나타난 결과는 방향에 따른  $F_0$ 의 변화가 작을수록 DFN 블록에 대한 REV 크기로 취급할 수 있는 가능성이 높아짐을 지시한다. 즉, 방향에 따른  $F_0$ 의 유의미한 변화가 없는 원형의 방사형 플롯 모양은 절리성 암반 블록을 REV로 취급하기 위한 필요조건이 될 수 있다.

Fig. 4는 총 12 방향으로 산정한  $F_0$ 의 평균값을 DFN을 구성하는 절리군의 기하학적 속성조합 및 블록크기에 따라 그래프에 도시한 것이다. 본연구의 모든 기하학적 속성조합에서 해석영역에 비하여 상대적으로 긴 절리를 포함하는 5 m × 5 m의 블록크기를 제외하면 블록크기의 증가에 따라 평균  $F_0$ 는 증가하는 양상을 나타낸다. 여기서 평균  $F_0$ 의 증가율이 유의미하지 않지만, 이와 같은 결과는  $F_0$ 가 REV 특성에 미치는 효과를 내포한다고 해석할 수 있다.

저자들은 선행연구를 통하여 본 연구와 동일한 절리의 기하학적 속성을 갖는 DFN 블록에 대하여 블록크기의 변화에 따라 DFN 블록을 등가연속체로 가정한 이론적 블록수리전도도( $k^{(p)}$ )와 개별체 해석에 의한  $k^{(p)}$  간의 상대오차 ER을 산정한 바 있다(Han and Um, 2015). Fig. 5는  $F_0$ 가 증가의 수리상수 특성에 미치는 효과를 평가하기 위하여 두 절리군의 교차각에 따라 구분한 세 개의 방향그룹 별로  $F_0$ 와 ER의 관계를 도시한 것이다. DFN 블록에서 산정된 ER이 낮을수록 DFN 블록은 등가연속체 취급 가능성이 높아지는데, Fig. 5의 결과에서 ER은  $F_0$ 가 증가함에 따라 급격히 감소하다  $F_0$ 의 특정 기준값 이상에서 0.1(10% 오차) 이하를 유지하는 것으로 나타났다. 본 연구의 DFN 블록이 수리적 등가연속

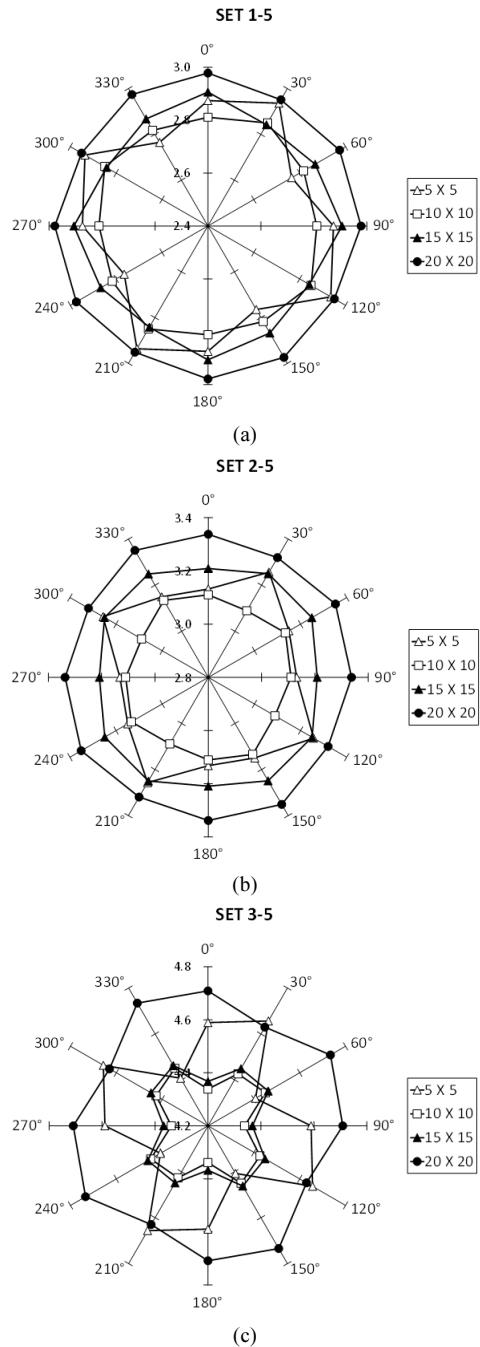


Fig. 3. First invariant ( $F_0$ ) of the connected fabric tensor in various flow directions for different block sizes of selected DFN systems

체 특성을 갖는  $F_0$ 의 기준값은 두 절리군 사이의 각도가 작을수록 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 DFN 블

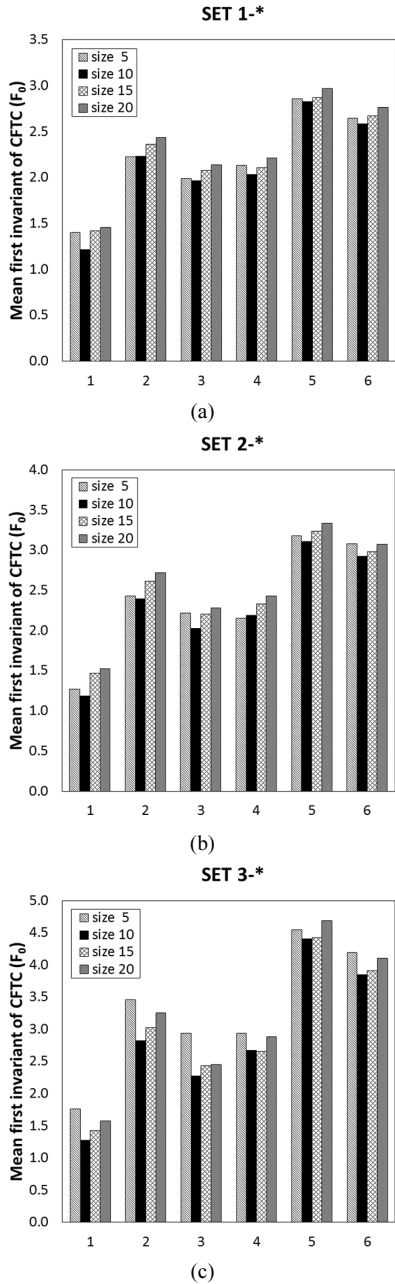


Fig. 4. Mean first invariant of connected fabric tensor component vs. DFN systems (IDs in Table 1) for different block sizes

록에 대한 등가연속체 해석 가능성을 판단하는 데에 균열텐서의 일차불변량을 이용할 수 있음을 시사하며 DFN 블록의  $F_0$ 가 기준값보다 큰 경우 등가연속체로 가정할 유체 유동 모델링이 가능함을 의미한다. 본 연구

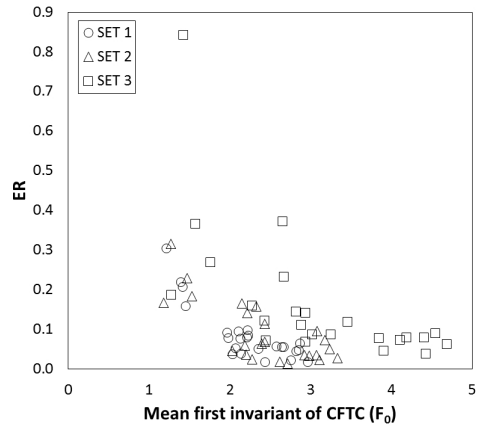


Fig. 5. Effect of mean first invariant of connected fabric tensor component on ER

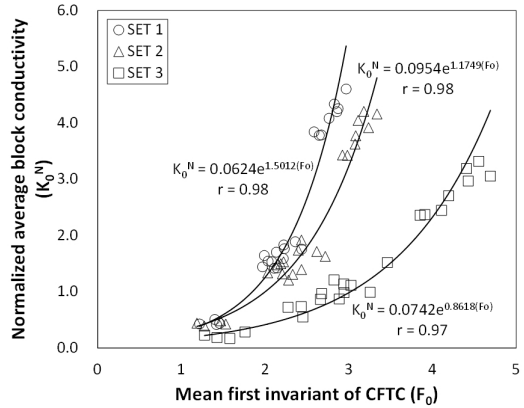


Fig. 6. Relation between normalized average block conductivity and mean first invariant of connected fabric tensor component for DFN systems

에서는  $ER < 0.1$ 을 유지하는  $F_0$ 의 문턱값을 기준값으로 추천하지만 이에 대한 판단은 연구자마다 다를 수 있다.

Fig. 6는 저자들의 선행연구(Han and Um, 2015)에서 최대 및 최소 주 수리전도도의 산술평균으로 추정된 평균 블록수리전도도( $K_0$ )와 본 연구에서 산정한  $F_0$ 의 상관관계를 그래프에 나타낸 것이다. 본 연구에서는 앞에서와 같이  $K_0$ 를 개별절리의 수리전도도로 나누어 정규화된 무차원 변수( $K_0^N$ )를 종속변수로 설정하여 이와 무차원의  $F_0$  간에 상관성 분석을 수행하였다. 두 절리군 사이의 각도가  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ 를 이루는 SET 1, SET 2, SET 3의 모든 경우에서  $K_0^N$ 과  $F_0$  사이에 상관계수 0.97 이상의 매우 강한 비선형 관계가 도출되었는데, 이는 DFN 블록에서 절리의 빈도와 길이가 결합된 파라미터로서의  $F_0$ 와 평균 블록수리전도도의 사이에 강한 함

수관계를 지시한다. 또한, DFN 시스템에서 절리의 빈도와 길이분포로 산정된  $F_0$ 가 동일한 경우에도 두 절리군 사이의 각도가 감소할수록 평균 블록수리전도도는 감소한다.

## 5. 결론

절리의 기하학적 속성과 해석영역의 규모가 절리성 암반의 수리적 특성에 미치는 효과에 대한 연구는 이론적 및 실무적으로 매우 중요하다. 이에 관한 연구는 현장의 자료로 구성된 불연속절리망의 기하학적 속성과 불연속절리망을 통한 유체 유동 특성 간에 관계에 대한 통찰을 개념적으로 제공할 수 있다. 예로서 여러 개의 서로 다른 동질영역(homogeneous zone)으로 구성된 현장에서 각각의 영역에 대한 절리의 기하학적 속성이 조사되었다면 현장의 수리상수에 대한 캘리브레이션을 위하여 각각의 동질영역에 적합한 초기 수리상수를 부여하고 연속체해석을 수행하여 불균질의 암반매질에 내재된 모델링 오류와 수치연산의 불안정성을 최소화할 수 있다. 본 연구는 DFN 블록의 크기 및 DFN을 구성하는 절리의 기하학적 속성이 이차원 DFN의 수리상수에 미치는 효과를 평가하기 위하여 균열텐서 파라미터와 블록수리상수 간의 상관성 분석을 수행하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

DFN 시스템에서 임의 방향으로의 수리전도도는 이에 직교하는 방향으로 산정된 균열텐서성분과 강한 비선형 관계를 갖는 것으로 평가되었다. 이는 대규모 현장에서 임의 방향으로의 블록수리전도도를 작은 규모의 해석영역에서 산정된 블록수리전도도의 외삽으로 추정할 수 있는 가능성을 지시한다.

DFN 시스템에 대한 등가연속체 취급 가능성은 균열텐서의 일차불변량으로 판단할 수 있다. DFN 블록에서 산정된 균열텐서의 일차불변량이 특정 기준값을 상회할수록 DFN 블록을 등가연속체로 취급할 가능성이 높아진다. 여기서 일차불변량의 특정 기준값은 일차불변량의 변화에 따른 ER 값의 추이로부터 결정할 수 있는데, 절리군 사이의 각도가 감소할수록 기준값은 증가한다. 또한, 균열텐서의 일차불변량은 DFN 블록의 평균 수리

전도도를 결정하는데 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 모든 개별절리의 수리전도도를 동일하게 가정하고 두 절리군의 제한된 절리조합을 사용한 이차원 해석에 근거한 것이다. 따라서 추후에 절리군 개수 및 개별절리에 대한 수리전도도의 다변화와 더불어 삼차원 해석으로의 확장을 통하여 연구 결과의 일반화가 이루어져야 한다.

## 사 사

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

## References

1. 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.
2. Han, J. and J. Um, 2016a, Effect of joint orientation distribution on hydraulic behavior of the 2-D DFN system, Economic and Environmental Geology, 49, 31-41.
3. Han, J. and J. Um, 2016b, Effect of joint aperture variation on hydraulic behavior of the 2-D DFN system, Tunnel & Underground Space (J. of Korean Society for Rock Mech.), 26, 283-292.
4. Kulatilake, P.H.S.W., S. Wang and O. Stephansson, 1993, Effect of finite size joints on deformability of jointed rock at the three dimensional level, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 30, 479-501.
5. Kulatilake, P.H.S.W., H. Ucpirtti and O. Stephansson, 1994, Effect of finite size joints on the deformability of jointed rock at the two dimensional level, Can. Geotech. J., 31, 364-374.
6. Kulatilake, P.H.S.W., W. He, J. Um and H. Wang, 1997, A physical model study of jointed rock mass strength under uniaxial compressive loading, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 34, 692-693.
7. Oda, M., 1982, Fabric tensor for discontinuous geologic materials, Soils and Foundations, 22, 96-108.
8. Oda, M., 1985, Permeability tensor for discontinuous rock mass, Géotechnique, 35, 483-495





### 엄정기

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



### 한지수

2014년 부경대학교 에너지자원공학과  
공학사  
2016년 부경대학교 에너지자원공학과  
공학석사

Tel: 051-629-6559

E-mail: m-a-m@nate.com

현재 부경대학교 에너지자원연구소 전임  
연구원