



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

절리성 암반매질에 대한
연속체 유체유동 모델의 적용 가능성 분석



2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

에 너 지 자 원 공 학 과

이 다 혜

공 학 석 사 학 위 논 문

절리성 암반매질에 대한
연속체 유체유동 모델의 적용 가능성 분석

지도교수 엄 정 기

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

에너지자원공학과

이 다 혜

이다혜의 공학석사 학위논문을 인준함.

2018년 2월

The logo of Pukyong National University is a circular emblem. It features a central stylized 'P' and 'N' intertwined, with a blue and grey color scheme. The text 'PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY' is written in a light blue arc around the top, and '부경대학교' is written in a light blue arc around the bottom.

위 원 장 공학박사 최 요 순 (인) 

위 원 공학박사 왕 수 균 (인) 

위 원 공학박사 엄 정 기 (인) 

목 차

목 차	i
List of Figures	ii
List of Tables	v
Abstract	vi
1. 서 론	1
2. 절리성 암반에서의 유체유동 모델	3
2.1 DFN 유동모델	3
2.2 DFN 시스템에 대한 연속체 유동모델	5
3. 등가연속체 유동모델의 적용성 평가	7
3.1 연구방법	7
3.2 DFN의 기하학적 특성에 따른 적용성	10
3.3 DFN의 수리간극 변화에 따른 적용성	13
4. 지중 공동 모의 수치실험	19
5. 절리 길이분포의 하한절삭이 DFN 유동해석 결과에 미치는 영향	28
6. 균열텐서를 이용한 업스케일링	42
7. 결 론	51
참고문헌	53
요 약	57

List of Figures

Fig. 1	The scheme of the numerical analysis to determine the flow quantity (Q_C) at the lower head boundary (after Lee and Um, 2017)	9
Fig. 2	Flow quantities obtained from DFN (Q_D) and continuum (Q_C) flow model; (a) for all DFN blocks in Table 1 and (b) for $20m \times 20m$ DFN blocks	11
Fig. 3	Flow quantities obtained from DFN (Q_D) and continuum (Q_C) flow model for all DFN blocks in Table 3 and Table 4	16
Fig. 4	Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) and theoretical directional conductivity, $\overline{k^{(p)}}$, (m/s) in different flow directions for the selected DFN systems of Table 3; (a) aperture ratio=1, (b) aperture ratio=2 and (c) aperture ratio=5 (after Han and Um, 2016)	20
Fig. 5	Examples of the numerical analysis to estimate tunnel inflow for DFN1–D1; (a) DFN fluid flow model and (b) continuum fluid flow model	22
Fig. 6	Tunnel inflow obtained from DFN (Q_{TD}) and continuum (Q_{TC}) flow model for DFN1–3, DFN2–3 and DFN3–3	23
Fig. 7	Tunnel inflow obtained from DFN (Q_{TD}) and continuum (Q_{TC}) flow model for DFN blocks in Table 3; (a) aperture ratio=1, (b) aperture ratio=2 and (c) aperture ratio=5	25
Fig. 8	Tunnel inflow obtained from DFN (Q_{TD}) and continuum (Q_{TC}) flow model using the geometric mean of the principal hydraulic	

	conductivities for DFN blocks in Table 3; (a) aperture ratio=1, (b) aperture ratio=2 and (c) aperture ratio=5	26
Fig. 9	Cumulative probability of fracture size distribution for the DFN1-0	29
Fig. 10	Generated fracture traces of a square window of size 20m of DFN1-0; (a) cutoff 0%, (b) cutoff 30% and (c) cutoff 50% ..	32
Fig. 11	Generated fracture traces of a square window of size 20m of DFN2-0; (a) cutoff 0%, (b) cutoff 30% and (c) cutoff 50% ..	33
Fig. 12	Generated fracture traces of a square window of size 20m of DFN3-0; (a) cutoff 0%, (b) cutoff 30% and (c) cutoff 50% ..	34
Fig. 13	Normalized block conductivity, K_{0C}/K_0 for all DFN blocks in Table 6	36
Fig. 14	Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-0 with cutoff of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%	37
Fig. 15	Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-3 with cutoff of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%	38
Fig. 16	Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-6 with cutoff of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%	39
Fig. 17	Anisotropy, K_{11}/K_{22} of all DFN blocks in Table 6 with respect to cutoff value	40
Fig. 18	Average block conductivity obtained from DFN before correction (K_0) and after correction (K_{0F}) for all DFN blocks	

in Table 8	46
Fig. 19 Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-3 with F_0 correction	47
Fig. 20 Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-4 with F_0 correction	48
Fig. 21 Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-5 with F_0 correction	49



List of Tables

Table 1	Summary of fracture geometry parameters and ER values for the generated DFN systems (after Han and Um, 2015)	8
Table 2	The linear regression models according to ER ranges for DFN blocks in Table 1	12
Table 3	Summary of fracture geometry parameters, ER values and anisotropy for the generated DFN systems of the CASE 1 (after Han and Um, 2016)	15
Table 4	Summary of fracture geometry parameters, ER values and anisotropy for the generated DFN systems of the CASE 2 (after Han and Um, 2016)	15
Table 5	The linear regression models according to ER ranges for DFN blocks in Table 3 and Table 4	17
Table 6	Summary of fracture geometry parameters for the generated DFN systems to investigate cutoff effect	31
Table 7	Summary of fracture density and length for the DFN systems before and after F_0 correction	44
Table 8	Summary of block conductivity parameters for the DFN systems before and after F_0 correction	45

Analysis of applicability of continuum fluid flow model in fractured media

Da Hye Lee

Department of Energy Resources Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Studies on fluid flow characteristics in fractured media are important in many fields such as hydrogeology, rock engineering, and petroleum engineering. The fluid flow of a single joint has been studied by a conventional continuum analysis method. In the field scale of the complex fractured rock masses, the analysis using the discrete fracture network (DFN) flow model is more appropriate, but there are limitations in time, cost, and computer system. So, if a continuum model considering the characteristics of the jointed rock mass is applicable, it can be an effective tool to replace the DFN flow model. The correlation analysis between the results obtained from DFN flow model and equivalent continuum flow model were conducted on a total of 72 DFN blocks having various fracture geometry and domain size. A strong linear relation seems to exist between the two approaches under the condition that the normalized relative error for continuum behavior (ER) is less than 0.2, and the results from both methods are found to be almost identical. To explore the field applicability of the equivalent continuum flow model in DFN media, a total of 48 numerical schemes related to the inflow of underground circular openings were implemented under various DFN configurations. The equivalent continuum flow model in DFN media with a constant hydraulic aperture was evaluated as valid. However, as the anisotropy increases due to the variation of the hydraulic aperture, the results are likely to be overestimated compared to the DFN flow model. It is considered that the DFN system which is not suitable to apply the continuum flow model can effectively perform the analysis through the cut-off of the lower limit of the joint size distribution. Also, this study addresses the applicability of upscaling using the fabric tensor parameters for DFN fluid flow analysis in field scale.

1. 서론

다양한 규모의 절리성 암반 매질에서 유체의 흐름 특성에 관한 연구는 지하수공학, 석유공학 및 암반공학 등 다양한 분야의 주요 연구과제 중 하나이다. 현재까지 개발된 균열암반에 대한 유체유동모델은 연속체유체유동모델(Hsieh and Neuman, 1985, Neuman and Depner, 1988, Carrera et al., 1990), DFN 유체유동모델(Long et al., 1982, Schwartz et al., 1983, 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 알려져 있다(Han and Um, 2015).

단일 절리와 같은 절리 규모에서 유체의 흐름은 전통적인 연속체 유동모델을 적용하여 모델을 수립하고 해석을 수행하는 것이 보편적이다. 다수의 절리가 분포하는 경우가 대부분인 현장 규모의 조건에서는 DFN(discrete fracture network) 유동모델을 이용한 해석이 더욱 합리적인 결과를 도출할 가능성이 높지만 이에선 고도의 전산 시스템이 뒷받침되어야 한다. 더불어 효율적인 측면에서 절리성 암반에 대하여 등가의 수리상수를 사용한 연속체 모델이 적용 가능하다면 이는 DFN 유동모델을 대체할 수 있는 가장 적합한 수단이 될 수 있다(Han, 2016).

절리성 암반에서 유체의 흐름을 연구할 때 고려해야하는 여러 가지 중요한 요소 중 하나는 절리로 이루어진 DFN 시스템이 전통적인 수리수문학에서의 다공성 매질과 유사하게 취급될 수 있는지 여부이다(Lee and Um, 2017). 즉, DFN 시스템에 대하여 등가 수리상수를 사용한 연속체 모델을 수립하고 초기 및 경계 조건에 따른 유체유동 해석을 수행할 수 있는지에 대한 연구는 그동안 관련 분야에서 지속적으로 논의되었다.

Snow(1965)는 절리 시스템에 대한 연구를 수행하여 고정 좌표계에서 임의의 방향성과 간극을 갖는 무한 길이의 단일 절리에 대한 수리전도도텐서를 수학적으로 표현하였으며 절리연결망에 대한 수리전도도텐서는 개별 절리로부터 얻은 수리전도도텐서 성분의 합으로 결정하였다. 실제 현장의 절리는 유한의 연장성을 갖으며 주위의 다른 절리와 연결되어야만 유체의 유동 통로로 작용할 수 있으므로 절리연결망의 수리전도도텐서를 단순히 개별 절리의 수리전도도 성분의 합으로 정의하기에는 무리가 있다(Lee and Um, 2017). Rocha and Franciss(1977)는 Snow(1965)의 해석 기법을 보정하는 경험적인 현장 기법을 제안하였지만 절리의 기하학적 속성을 고려하지 못하였다. Long et al.(1982)은 불연속 절리 시스템에서 절리의 빈도가 증가할수록, 수리간극의 변화가 작을수록, 방향성의 변화가 클수록, 해석영역이 커질수록 절리성 암반을 등가의 다공질 매질로 취급할 수 있는 가능성이 높다고 보고하였다. Han and Um(2015, 2016a, 2016b)는 해석영역의 크기 및 절리의 방향, 빈도, 길이, 수리간극 등의 기하학적 속성 변화가 이차원 DFN의 수리적 특성에 미치는 영향을 평가하고 DFN의 이방성 및 등가연속체 취급 가능성을 논의하였지만 현장 적용을 위해서는 정량적인 기준을 마련하기 위한 후속 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 다음과 같은 연구 목적 및 연구범위를 설정하였다.

i) DFN 블록에 대한 연속체 해석 조건 및 방법의 가이드라인을 마련하기 위하여 DFN 유동모델과 등가의 수리상수를 사용한 연속체 모델 간의 상관성을 평가한다. ii) 현장 적용성을 파악하기 위하여 지중 공동에 대한 모의 수치실험을 수행하고 절리의 기하학적 조건에 따른 연속체 해석 결과를 고찰한다. iii) 연속체 유동모델이 부적합하다고 판단된 절리의 기하학적 속성 조건에서 DFN 유동모델의 효과적인 적용 방안을 도출한다. iv) 균열텐서 파라미터를 도입하여 새로운 업스케일링 기법을 모색한다.

2. 절리성 암반에서의 유체유동 모델

2.1 DFN 유동모델

치밀한 결정질의 절리성 암반 매질에서 유체의 흐름이 절리(불연속면)를 통해서만 이루어진다고 가정할 때 유체유동 모델은 수학적으로 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{ij} = C_{ij}(H_i - H_j) \quad (1)$$

여기서, H_i 는 절리 교점 i 에서의 전수두이며 Q_{ij} 와 C_{ij} 는 교점 j 와 주변의 교점 i 를 연결하는 등가유로관의 유량 및 컨덕턴스이다(Priest, 1993). 2-D 해석 시 등가유로관의 유효수리간극과 길이를 이용하여 개별 등가유로관의 컨덕턴스가 결정될 수 있다(Priest, 1993). 등가유로관 주위의 매질이 불투수성 및 비압축성이며 유체는 등가유로관을 통해서만 흐른다고 가정하면 절리연결망 교점에서 유체의 순이득 및 순손실이 없으므로 $\sum Q_{ij}=0$ 이며 등가유로관 연결구조에서 교점 j 의 전수두를 산정하는 식은 다음과 같이 유도할 수 있다(Han and Um, 2016b).

$$H_j = \frac{\sum_{i=1}^4 C_{ij} H_i}{\sum_{i=1}^4 C_{ij}} \quad (2)$$

유로관의 연결점(노드)의 수가 많지 않은 단순한 DFN의 경우 대수적 소거

법을 사용하여 해석영역 내부 노드의 전수두를 산정할 수 있지만 노드의 수가 많은 일반적인 DFN의 경우에는 가우스 소거법 또는 SOR(successive over-relaxation)법 등의 수치해석 기법을 적용하는 것이 적합하다(Han and Um, 2015).

DFN 시스템에 대한 임의의 p 방향으로 블록수리전도도 $k^{(p)}$ 는 식(3)을 이용하여 산정할 수 있다. 또한, DFN 시스템을 등가연속체로 가정한 이론적 블록수리전도도 $\overline{k^{(p)}}$ 와 블록수리전도도 텐서 $\overline{K_{ij}}$ 는 각각 식(4) 및 식(5)로 표현할 수 있다(Oda, 1982).

$$k^{(p)} = \frac{Q_{out}}{\Pi L} \quad (3)$$

$$\overline{k^{(p)}} = \overline{K_{ij}} p_i p_j \quad (4)$$

$$\overline{K_{ij}} = (4/N) \left\{ \sum k^{(p)} p_i p_j - (1/4) \delta_{ij} \sum k^{(p)} \right\} \quad (5)$$

여기서, p_i 와 p_j 는 각각 수두경사에 평행한 단위벡터 p 의 서로 수직인 i 와 j 방향으로의 성분, δ_{ij} 는 크로네커 델타, N 은 블록수리전도도 산정을 위해 사용한 방향의 총 개수이다(Han and Um, 2016b). DFN 블록에 대한 등가연속체 취급 가능성을 평가하기 위한 $\overline{k^{(p)}}$ 와 $k^{(p)}$ 간의 상대오차 ER은 다음의 식(6)으로 정의할 수 있다.

$$ER = \left\{ (1/N) \sum (k^{(p)} - \overline{k^{(p)}})^2 \right\}^{1/2} / \left\{ (1/N) \sum k^{(p)} \right\} \quad (6)$$

DFN 시스템의 모든 방향에서 $k^{(p)} = \overline{k^{(p)}}$ 인 경우 식(6)에서 ER은 0이며, 이때 DFN 블록은 완전한 의미의 등가연속체로 취급될 수 있다(Han and Um, 2016b).

DFN 시스템의 최대 주 수리전도도 K_{11} 및 최소 주 수리전도도 K_{22} 의 크기와 방향은 $\overline{K_{ij}}$ 로부터 결정할 수 있으며 평균 블록수리전도도 K_0 는 K_{11} 및 K_{22} 의 산술평균으로 결정할 수 있다(Han and Um, 2016a, 2016b). 이와 같은 DFN 시스템에 대한 다양한 블록수리 상수 추정에 관한 세부적인 내용은 참고문헌(Han and Um, 2016a, 2016b)에 상세하게 기술되어 있다.

2.2 DFN 시스템에 대한 연속체 유동모델

불균질(heterogeneous), 이방(anisotropic) 매질에서 Darcy의 법칙을 따르는 이차원 유체유동을 설명하는 지배방정식은 x-y 직교좌표계에서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (7)$$

여기서, S_s 는 저류계수, H 는 전수두, K 는 수리전도도텐서, Q 는 함양 또는 배출량, t 는 시간이다. 수두의 시간적 변화가 없는 정상류(steady-state flow) 조건에서

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

이며 K의 최대 및 최소 주성분 방향이 x-y 좌표계와 일치할 경우 식(7)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (8)$$

식(8)와 같은 미분방정식의 해를 구하기 위해서는 대부분의 경우 수치해석 방법을 이용하며 이는 경계에서 수두가 정의되는 Dirichlet 또는 흐름량(또는 수리경사)이 주어지는 Neumann 경계조건이 필요하다. 본 연구에서는 Galerkin 방법으로 유한요소해석을 수행하는 SEEP/W 상용 소프트웨어를 이용하여 DFN 블록에 대한 연속체 유동해석을 수행하였다.

본 연구는 DFN에 대하여 등가의 수리상수를 사용한 연속체 해석을 수행하고 ER 값을 기준으로 DFN 유동모델에 의한 기존연구(Han and Um, 2015)의 결과와 비교·분석하였다. ER은 DFN에 대하여 방향에 따른 이론적 블록수리전도도와 DFN 유동모델로 산정한 블록수리전도도 사이의 상대오차이다. 여기서 이론적 블록수리전도도는 매질을 다공질, 이방 연속체로 가정하고 대수학적으로 산정한 수리상수이다(Oda, 1985). 따라서 ER은 0에서 1까지의 범위이며 0에 가까울수록 DFN 블록이 등가의 연속체 특성을 가질 가능성이 높지만 DFN에 대한 연속체 해석을 수행하기 위한 ER 값의 기준은 아직 명확하게 제시되지 못한 실정이다.

3. 등가연속체 유동모델의 적용성 평가

3.1 연구방법

본 연구는 이차원 DFN 블록을 통과하는 유체의 흐름을 평가하기 위해서 절리의 기하학적 속성 변화에 따른 이방적 등가수리상수를 사용하여 연속체 유동모델에 의한 수치실험을 수행하였다. 수치실험에서 사용한 DFN의 기하학적 속성은 기존연구(Han and Um, 2015)의 조건과 동일하다. 절리군의 방향 조합은 이차원에서 두 절리군 트레이스 선주향 사이의 교차각이 90° , 60° , 30° 등을 이루도록 세 그룹으로 구분하고 각각의 방향 그룹에서 빈도는 2개/ m^2 /set 또는 4개/ m^2 /set, 길이는 평균(0.8–2m) 및 변동계수(0.61–1.58)에 따른 감마분포, 수리간극은 0.1mm 이다(Han and Um, 2015). Table 1은 두 개의 절리군을 사용하여 절리군의 빈도와 길이분포를 달리하는 총 18개 DFN 시스템을 요약하였으며 DFN 유동모델로 추정된 ER 값도 수록하였다(Han and Um, 2015).

본 연구의 연속체 유동해석을 위한 DFN 블록의 크기는 Table 1에 나타난 18개의 DFN 시스템에서 각각 $5m \times 5m$, $10m \times 10m$, $15m \times 15m$, $20m \times 20m$ 4개를 설정하였으며 총 72개(18×4)의 DFN 블록을 대상으로 연속체 유동해석이 수행되었다. Fig. 1은 해석영역의 경계조건을 나타낸 모식도이다. DFN 블록의 좌우경계는 정수두($H_1=10m$ 및 $H_2=5m$)이며 상하경계는 H_1 에서 H_2 까지 선형으로 감소한다(Lee and Um, 2017). 매질의 물성치로 사용한 이방의 수리전도도는 기존연구(Han and Um, 2015)의 DFN 유동해석으로 산정한 블록수리전도도 텐서로부터 결정된 최대(K_{11}) 및 최소(K_{22}) 주 수리전도도의 크기와 방향이다.

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

DFN ID	Orientation (degrees)	d	L		ER			
			μ	σ	5m × 5m	10m × 10m	15m × 15m	20m × 20m
DFN1-1	45 and 135	2	0.8	1.6	0.2185	0.3042	0.2060	0.1579
DFN1-2	45 and 135	2	1.5	2.0	0.0971	0.0829	0.0509	0.0168
DFN1-3	45 and 135	2	2.0	1.5	0.0773	0.0910	0.0517	0.0383
DFN1-4	45 and 135	4	0.8	1.6	0.0765	0.0368	0.0937	0.0790
DFN1-5	45 and 135	4	1.5	2.0	0.0475	0.0448	0.0634	0.0169
DFN1-6	45 and 135	4	2.0	1.5	0.0545	0.0561	0.0546	0.0215
DFN2-1	60 and 120	2	0.8	1.6	0.3160	0.1671	0.2294	0.1840
DFN2-2	60 and 120	2	1.5	2.0	0.1137	0.0631	0.0184	0.0141
DFN2-3	60 and 120	2	2.0	1.5	0.1413	0.0463	0.0365	0.0242
DFN2-4	60 and 120	4	0.8	1.6	0.1654	0.0586	0.1577	0.0686
DFN2-5	60 and 120	4	1.5	2.0	0.0727	0.0224	0.0506	0.0273
DFN2-6	60 and 120	4	2.0	1.5	0.0963	0.0344	0.0329	0.0356
DFN3-1	75 and 105	2	0.8	1.6	0.2690	0.1865	0.8414	0.3651
DFN3-2	75 and 105	2	1.5	2.0	0.1178	0.1437	0.0864	0.0868
DFN3-3	75 and 105	2	2.0	1.5	0.0678	0.1599	0.1210	0.0711
DFN3-4	75 and 105	4	0.8	1.6	0.1413	0.2324	0.3712	0.1108
DFN3-5	75 and 105	4	1.5	2.0	0.0903	0.0795	0.0383	0.0627
DFN3-6	75 and 105	4	2.0	1.5	0.0793	0.0771	0.0460	0.0732

note: d=joint density(no. of joint/m²/set), L=gamma distributed trace length (m), μ =mean, σ =standard deviation, ER=normalized relative error for continuum behavior

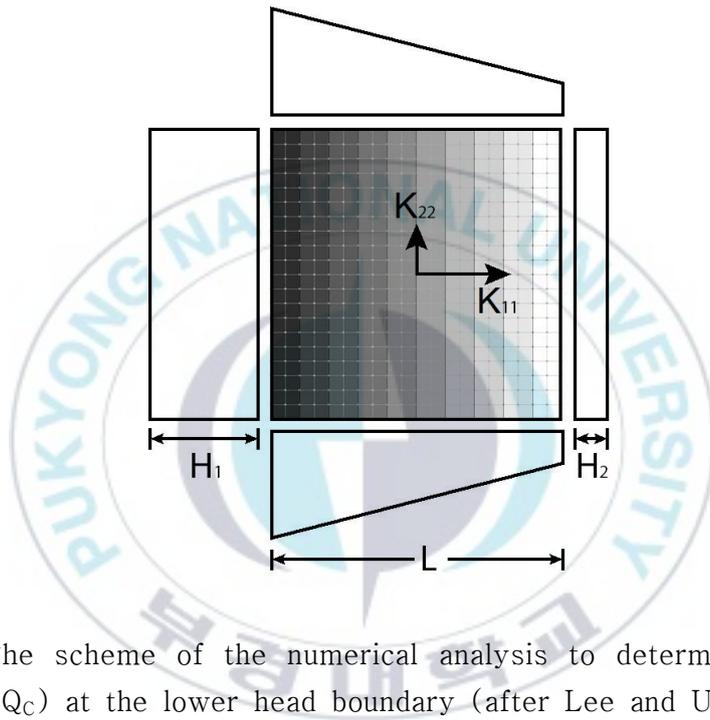
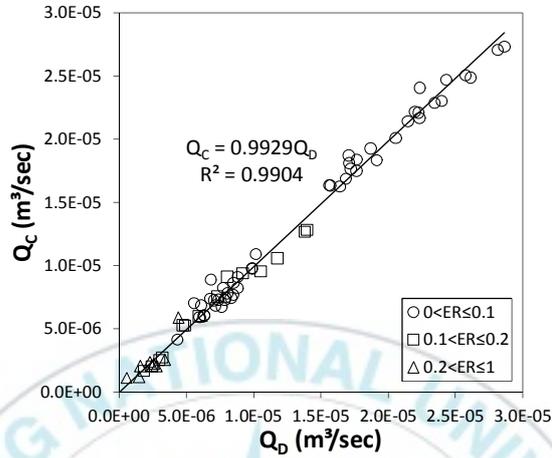


Fig. 1. The scheme of the numerical analysis to determine the flow quantity (Q_c) at the lower head boundary (after Lee and Um, 2017)

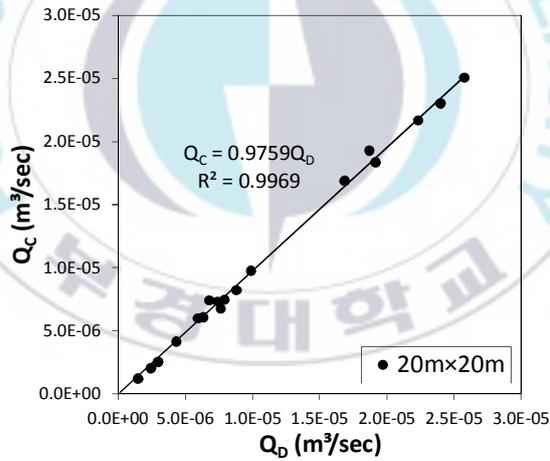
3.2 DFN의 기하학적 특성에 따른 적용성

Fig. 2는 Table 1의 총 72개 DFN 블록에 대하여 연속체 유동해석과 DFN 유동해석을 수행하고 DFN 블록의 오른쪽 경계에서의 유출량을 비교할 수 있도록 각각의 방법에 의한 결과를 도시한 그래프이다. 그래프의 x축은 DFN 유동해석으로 산정한 유량(Q_D)이며 y축은 연속체 유동해석으로 산정한 유량(Q_C)이다. 두 접근법에 의한 결과가 더욱 일치할수록 추세선의 기울기 및 결정계수(R^2)는 더욱 1에 근접하게 된다. Fig. 2(a)는 모든 DFN 블록에서의 결과를 함께 도시한 것인데, 추세선의 기울기 및 R^2 가 각각 0.9929 및 0.9904로 1에 근접하여 두 방법에 의한 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 결과는 총 72개의 비교적 많은 자료 개수에 의한 것이며 ER 값의 범위를 세분하여 결과를 고찰할 필요가 있다.

Fig. 2(a)에서 삼각형으로 나타낸 ER 값이 0.2 이상에서의 결과는 절리의 빈도가 낮고($d=2/m^2/set$) 평균길이가 가장 짧으며($\mu=0.8m$) DFN 블록의 크기가 $15m \times 15m$ 까지의 DFN 블록에 대한 경우가 대부분인데, 이들 DFN 블록을 통한 유출량이 상대적으로 매우 작기 때문에 두 방법에 의한 상대적인 차이를 그래프 상에서 인지하기 어려울 수 있다. Table 2는 DFN 유동해석에서 산정된 ER 값의 범위에 따라 0~0.1, 0.1~0.2, 0.2 이상의 세 그룹으로 구분하여 두 접근법 간의 상관성을 요약하였다. 세 그룹 모두 선형 추세선의 기울기는 1에 근사하지만 ER 범위의 증가에 따라 R^2 가 낮아짐을 확인할 수 있으며 ER 값이 0.2 이상의 그룹에서 0.8428로 상관성이 가장 낮게 나타났다. 이는 DFN 블록의 ER 값이 0.2 이상인 경우 등가수리상수를 사용한 연속체 해석이 적합하지 않을 수 있음을 지시한다. Fig. 2(b)는 DFN 블록의 크기가 $20m \times 20m$ 인 경우 두 방법에 의한 결과를 나타낸 그래프이다. DFN3-1을 제외한 모든 경우에서 ER 값은 0.2 이하이며 추세



(a)



(b)

Fig. 2. Flow quantities obtained from DFN (Q_D) and continuum (Q_C) flow model; (a) for all DFN blocks in Table 1 and (b) for 20m × 20m DFN blocks

Table 2. The linear regression models according to ER ranges for DFN blocks in Table 1

ER	Regression Equation	R ²
0 < ER ≤ 0.1	Q _C = 0.9956Q _D	0.9884
0.1 < ER ≤ 0.2	Q _C = 0.9563Q _D	0.9726
0.2 < ER ≤ 1	Q _C = 1.0036Q _D	0.8428

선의 기울기 및 R^2 는 각각 0.9759 및 0.9969로 1에 매우 근접한 값을 갖는다. 이는 본 연구의 DFN 시스템에서 20m×20m 크기가 REV로 적합할 수 있음을 논의한 기존연구(Han and Um, 2015)의 결과에 부합한다.

3.3 DFN의 수리간극 변화에 따른 적용성

실제 현장의 절리성 암반은 절리의 수리간극이 변동성을 수반하는 경우가 대부분이며 저자는 수리간극의 변동성을 고려한 DFN 유동해석을 통해 유체의 유동해석을 수행하는 것이 더욱 현실적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단하고 있다. 그러나 비용과 시간의 제약을 고려할 때 연속체 해석이 가능한 수리간극의 조건에 대한 연구가 중요한 의의를 가질 수 있다.

기존연구(Han and Um, 2016a)는 절리의 수리간극의 변화가 절리암반의 수리상수 및 수리적 이방성에 미치는 영향을 평가하였으며, 그 결과 두 절리군 중 한 절리군의 수리간극이 다른 절리군의 수리간극에 비해 상대적으로 커질수록 DFN의 평균 블록수리전도도는 증가하는 것으로 보고하였다. 또한, 절리군 간의 수리간극 차이는 DFN의 이방적 블록수리전도 특성 및 등가연속체 취급 가능성에 유의미한 영향을 미치는 것으로 났으며, 두 절리군의 수리간극이 확률분포를 따르는 경우 수리간극의 변동성이 증가할수록 수리적 이방성이 증대되었다(Han and Um, 2016a).

본 연구에서는 기존연구(Han and Um, 2016a)와 동일하게 절리의 수리간극이 절리군에 따라 서로 다른 일정한 값을 갖는 경우(CASE 1)와 확률분포 특성을 갖는 경우(CASE 2)로 구분하여 연속체 유동해석과 DFN 유동해석의 결과를 앞서서와 같은 방식으로 비교하였다. CASE 1은 절리군(SET2)의 수리간극(0.1mm)에 비하여 다른 절리군(SET1)의 수리간극이 1, 2, 5 배로 증가하는 경우이고, CASE 2는 두 절리군의 수리간극이 평균

=0.1mm, 표준편차=0.0~0.1mm 의 대수정규 분포를 갖는 경우이다(Han and Um, 2016a). 본 연구에서는 수리간극의 변화에 따른 유체유동 해석 결과를 비교하기 위하여 DFN 시스템에서 수리간극 외에 절리의 빈도, 길이 등의 기하학적 속성은 모두 동일하게 설정하였다. 본 연구에서 REV로 취급할 수 있는 20m×20m 크기의 블록에서 절리군 교차각은 90°, 60°, 30° 세 그룹으로 구분하고 절리의 빈도는 절리군 당 2개/m², 길이는 평균=1.5m, 표준편차 = 2.0m의 감마분포로 설정하였다. Table 3과 Table 4는 각각 CASE 1과 CASE 2의 DFN 시스템에 대한 입력변수와 더불어 기존연구에서 DFN 유동해석을 통해 산정된 ER 값, 이방등가수리전도도(K_{11} , K_{22})의 크기 및 방향을 수록하였다(Han and Um, 2016a).

Fig. 3은 Table 3과 Table 4의 총 18개 DFN 블록에서 연속체 유동해석에 의한 유출량(Q_C)과 DFN 유동해석에 의한 유출량(Q_D)을 ER 값에 따라 두 그룹으로 구분하여 그래프에 도시한 것이다. 전체 자료에 대한 추세선은 R^2 가 0.9965로 두 방법 간의 상관성이 매우 높게 평가되었지만 기울기가 0.8656으로 Q_C 는 Q_D 의 약 87% 정도로 산정되었음을 알 수 있다. Table 5는 ER 값에 따른 상관관계를 수록한 것인데, ER 값이 비교적 높은 경우에 두 결과 간의 차이가 더욱 증가하였음을 확인할 수 있다. 참고로 앞의 수치 실험 결과로부터 등가수리상수를 사용한 연속체 해석이 적합한 ER 값의 범위는 0.2 이하이지만, 여기서는 추세식을 얻기 위한 자료의 개수를 고려하여 ER 값 0.1을 기준으로 결과를 구분하였다. ER 값이 0.1 이하인 그룹은 추세선 기울기가 0.9599이고 R^2 가 0.9970으로 연속체 해석과 DFN 유동해석의 결과 사이의 상관성이 매우 크다 할 수 있기에 등가수리상수를 사용한 연속체 해석이 가능하다고 판단된다. 그러나 ER 값이 0.1을 넘는 그룹(대부분 0.2 이상)에서 R^2 가 1에 근접한 상관성을 나타내지만 추세선 기울기가 0.8629로 연속체 해석과 DFN 유동해석의 결과 간에 유의미한 차이가

Table 3. Summary of fracture geometry parameters, ER values and anisotropy for the generated DFN systems of the CASE 1 (after Han and Um, 2016)

DFN ID	Orientation (degrees)	Aperture ratio	d	L		ER	Anisotropy		
				μ	σ		K_{11}	K_{22}	Θ
DFN1-D1	45 and 135	1	2	1.5	2.0	0.0168	1.581E-06	1.296E-06	126.47
DFN1-D2	45 and 135	2	2	1.5	2.0	0.0231	7.711E-06	2.152E-06	45.83
DFN1-D5	45 and 135	5	2	1.5	2.0	0.1179	5.020E-05	8.411E-06	47.24
DFN2-D1	60 and 120	1	2	1.5	2.0	0.0141	1.952E-06	7.149E-07	91.18
DFN2-D2	60 and 120	2	2	1.5	2.0	0.0550	8.035E-06	1.376E-06	66.44
DFN2-D5	60 and 120	5	2	1.5	2.0	0.1964	5.047E-05	4.831E-06	65.35
DFN3-D1	75 and 105	1	2	1.5	2.0	0.0868	1.496E-06	1.244E-07	87.94
DFN3-D2	75 and 105	2	2	1.5	2.0	0.0851	5.172E-06	2.344E-07	81.30
DFN3-D5	75 and 105	5	2	1.5	2.0	0.1107	2.737E-05	1.670E-06	79.23

note: Aperture ratio=SET1/SET2

Table 4. Summary of fracture geometry parameters, ER values and anisotropy for the generated DFN systems of the CASE 2 (after Han and Um, 2016)

DFN ID	Orientation (degrees)	d	L		Aperture		ER	Anisotropy		
			μ	σ	μ	σ		K_{11}	K_{22}	Θ
DFN1-LN1	45 and 135	2	1.5	2.0	0.1	0.0000	0.0168	1.581E-06	1.296E-06	126.47
DFN1-LN2	45 and 135	2	1.5	2.0	0.1	0.0025	0.0965	2.081E-06	1.792E-06	110.91
DFN1-LN3	45 and 135	2	1.5	2.0	0.1	0.0100	0.2653	2.644E-06	2.191E-06	111.27
DFN2-LN1	60 and 120	2	1.5	2.0	0.1	0.0000	0.0141	1.952E-06	7.149E-07	91.18
DFN2-LN2	60 and 120	2	1.5	2.0	0.1	0.0025	0.0585	2.404E-06	8.452E-07	91.56
DFN2-LN3	60 and 120	2	1.5	2.0	0.1	0.0100	0.1816	2.537E-06	1.043E-06	84.94
DFN3-LN1	75 and 105	2	1.5	2.0	0.1	0.0000	0.0868	1.496E-06	1.244E-07	87.94
DFN3-LN2	75 and 105	2	1.5	2.0	0.1	0.0025	0.2587	1.639E-06	2.622E-07	87.46
DFN3-LN3	75 and 105	2	1.5	2.0	0.1	0.0100	0.4632	1.957E-06	2.901E-07	89.51

note: Aperture in mm

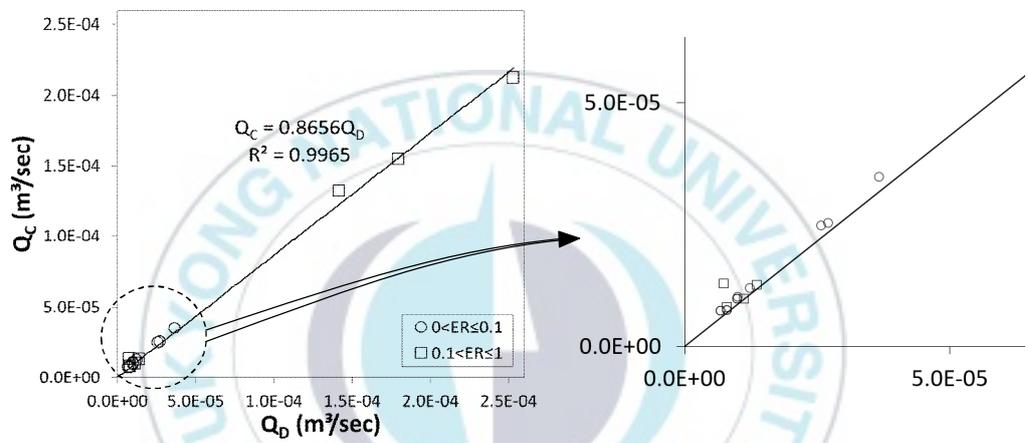


Fig. 3. Flow quantities obtained from DFN (Q_D) and continuum (Q_C) flow model for all DFN blocks in Table 3 and Table 4

Table 5. The linear regression models according to ER ranges for DFN blocks in Table 3 and Table 4

ER	Regression Equation	R ²
0 < ER ≤ 0.1	Q _C = 0.9599Q _D	0.9970
0.1 < ER ≤ 1	Q _C = 0.8629Q _D	0.9959

존재함을 확인할 수 있다. 특히, DFN1-LN3, DFN2-LN3, DFN3-LN3과 같이 수리간극의 표준편차가 상대적으로 높아서 비교적 큰 수리간극의 절리가 분포하며 이에 따라 ER 값이 높게 산정된 DFN 시스템은 연속체 유동해석 결과가 현실적이지 못할 가능성이 크다고 사료된다.

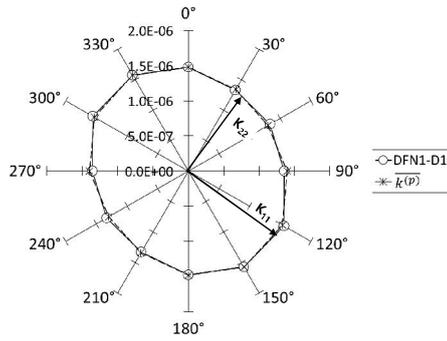


4. 지중 공동 모의 수치실험

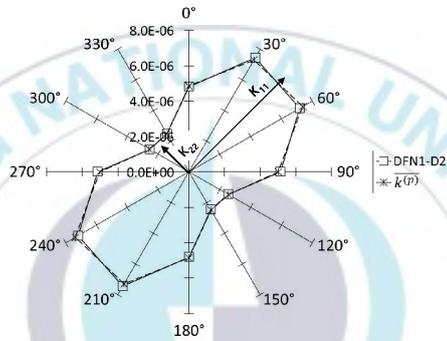
치밀한 결정질의 절리성 암반에 위치한 지중 공동에서 지하수의 유입은 절리를 통해 이루어지는 것으로 가정할 수 있다. 현재 현장의 지중 공동에 대한 지하수의 유입을 평가하기 위하여 연속체 유동해석을 적용하는 경우가 대부분이지만 DFN 유동해석 결과와의 차이에 대해 고찰할 필요가 있다. 본 연구에서는 절리성 암반에 대한 등가수리상수를 사용한 연속체 유동해석의 현장 적용성을 검토하기 위해서 지중 공동에서의 지하수 유입에 대한 모의 수치실험을 수행하였다.

해석영역의 크기는 본 연구의 DFN 시스템에서 REV로 취급할 수 있는 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 블록이다. 다양한 규모의 지중 공동을 고려하기 위해 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 블록 중앙에 직경 1m, 2m, 4m, 6m의 원형공동을 설정하였으며 공동 경계에서 경계조건은 $H=0$, 그리고 해석영역의 경계조건은 앞에서의 수치실험과 동일하게 Fig. 1에서와 같이 부여하였다. 해석에 사용된 DFN 블록은 수리간극이 모두 일정한 경우를 고려한 Table 1의 3개 DFN 블록 (DFN1-3, DFN2-3, DFN3-3)과 절리군 별로 서로 다른 수리간극을 고려한 Table 3의 9개 DFN 블록이다. 이와 같이 총 12개의 DFN 조건에 각각 4 개의 원형공동 크기를 고려한 총 48개의 원형공동에 대하여 공동 내부로의 지하수 유입량이 DFN 유동해석과 등가수리전도도를 사용한 연속체 유동해석에 의하여 산정되었다.

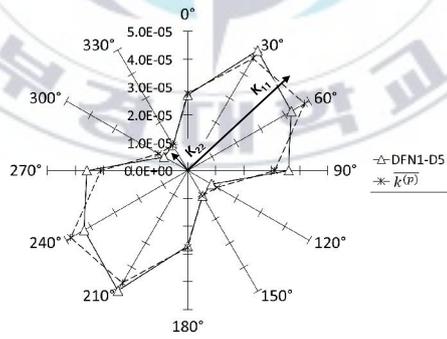
본 지중 공동 모의 수치실험에서의 DFN 블록은 모두 ER 값이 0.2 이하로 등가수리상수에 의한 연속체 유동해석이 가능한 조건이다. Fig. 4는 Table 3의 DFN1 조건에서 D1에서 D5까지 절리군의 수리간극 비가 1, 2, 5로 증가하는 경우 각각의 DFN 시스템에서 30° 간격으로 방향에 따라 산정된 블록수리전도도 $k^{(p)}$ 값과 등가연속체로 가정한 이론적 $\overline{k^{(p)}}$ 값을 그래



(a)



(b)

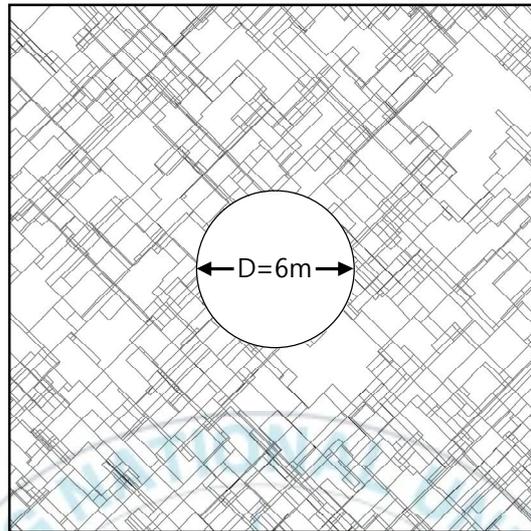


(c)

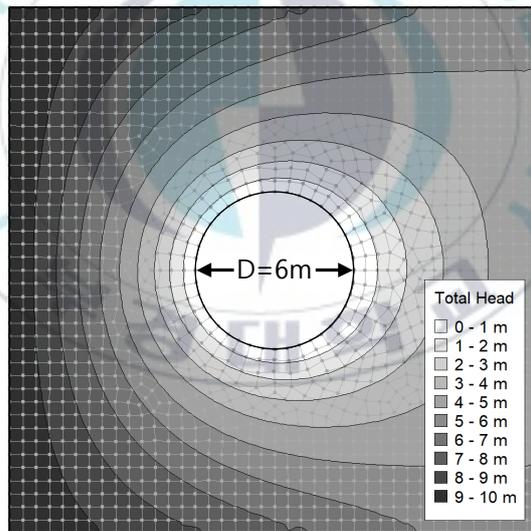
Fig. 4. Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) and theoretical directional conductivity, $\overline{k^{(p)}}$, (m/s) in different flow directions for the selected DFN systems of Table 3; (a) aperture ratio=1, (b) aperture ratio=2 and (c) aperture ratio=5 (after Han and Um, 2016)

프에 도시한 것이다. 또한, 블록수리전도도텐서로부터 결정된 K_{11} 및 K_{22} 의 크기와 방향이 동 그림에 포함되어 있다. 수리간극의 비가 1로 두 절리군의 수리간극이 동일한 경우(Fig. 4(a)) 방향에 따른 $k^{(p)}$ 값과 $\overline{k^{(p)}}$ 값은 거의 일치함을 알 수 있다. 이에 따른 상대오차 ER 값은 0.0168(Table 3)이며 K_{11} 과 K_{22} 의 크기는 거의 같은 등방의 수리전도 특성을 나타낸다. 수리간극의 비가 2인 경우(Fig. 4(b))에도 $k^{(p)}$ 값과 $\overline{k^{(p)}}$ 값은 거의 일치하여 ER 값은 0.0231의 매우 낮은 값을 갖지만 K_{11} 과 K_{22} 의 크기는 이방적 연속체 특성을 보여준다. 수리간극의 비가 5인 경우(Fig. 4(c))에는 $k^{(p)}$ 값과 $\overline{k^{(p)}}$ 값의 차이가 발견되어 ER 값이 0.1179로 증가하였음을 확인할 수 있고 이방성 역시 더욱 증대되었음을 알 수 있다. Fig. 5는 지중 공동 모의 수치실험에 사용된 Table 3의 DFN1-D1에 대한 DFN 유동해석 모델(Fig. 5(a))과 DFN 블록으로부터 산정한 K_{11} 과 K_{22} 의 크기와 방향(Fig. 4(a))을 적용한 연속체 유동해석 모델(Fig. 5(b))의 예시이다.

Fig. 6은 DFN1-3, DFN2-3, DFN3-3 블록에서 각각 4가지 규모의 원형공동을 설정한 총 12회의 DFN 유동해석과 연속체 유동해석 결과를 비교한 그래프이다. 그래프의 x축은 DFN 유동해석으로 산정된 원형공동 내부로의 지하수 유입량(Q_{TD})이며 y축은 등가수리상수에 의한 연속체 유동해석으로 산정된 지하수 유입량(Q_{TC})이다. 두 접근법을 사용한 수치실험 결과를 비교하였을 때 추세선의 기울기는 1.1038, R^2 는 0.9535로 산정되어 Q_{TC} 와 Q_{TD} 사이의 상관성이 매우 높다고 할 수 있지만 연속체 유동해석 결과가 DFN 유동해석 결과에 비하여 10% 정도 높게 평가되었음을 알 수 있다. 이는 지중 공동에서 지하수 유입에 대한 평가 시 ER 값이 0.2 이하인 경우 절리성 암반에 대한 연속체 유동해석이 어느 정도 타당할 수 있음을 의미한다. 본 연구의 공동 규모는 해석 결과에 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 5. Examples of the numerical analysis to estimate tunnel inflow for DFN1–D1; (a) DFN fluid flow model and (b) continuum fluid flow model

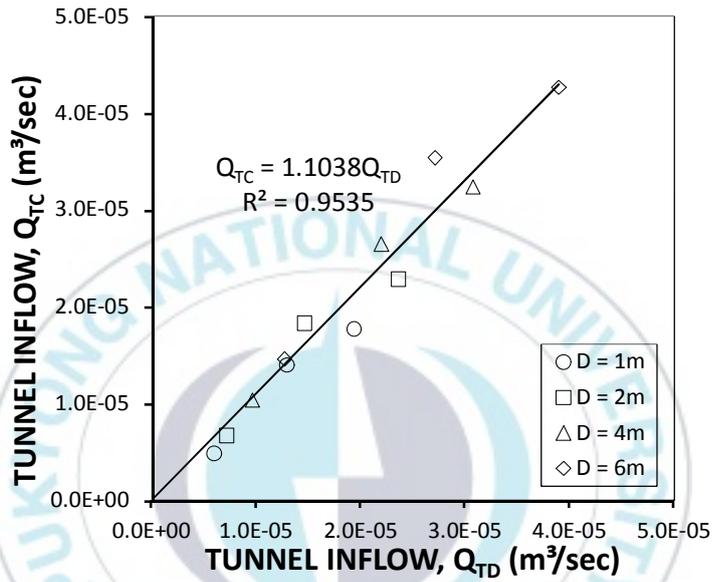
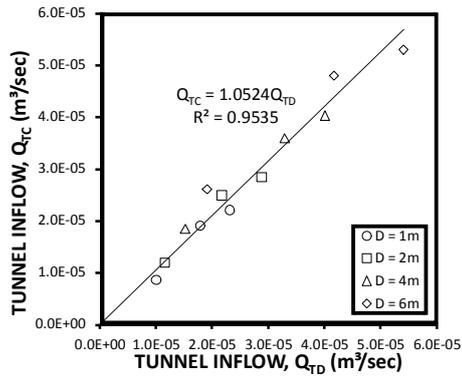


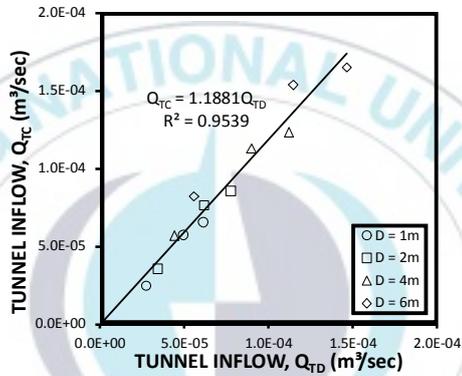
Fig. 6. Tunnel inflow obtained from DFN (Q_{TD}) and continuum (Q_{TC}) flow model for DFN1-3, DFN2-3 and DFN3-3

Fig. 7은 Table 3의 절리 기하학적 속성을 갖는 9개의 DFN 블록에 대하여 각각 4가지 규모의 원형공동을 포함하는 총 36개 블록에서 수행한 수치 실험 결과를 두 절리군의 수리간극 비를 기준으로 분류하여 도시한 것이다. 두 절리군의 수리간극이 같은 경우(Fig. 7(a)) 추세선의 기울기는 1.0524, R^2 는 0.9535로 앞서서와 같이 Q_{TC} 와 Q_{TD} 사이에 강한 상관관계를 나타내며 DFN 유동해석과 연속체 유동해석 간에 유의미한 차이를 보이지 않는다. 한 절리군의 수리간극이 다른 절리군에 2배인 경우, 즉, 수리간극의 비가 2인 경우(Fig. 7(b)) 추세선의 R^2 는 0.9539로 Q_{TC} 와 Q_{TD} 사이에 선형의 강한 상관관계를 보이지만 추세선의 기울기가 1.1881로 Q_{TC} 가 Q_{TD} 보다 약 1.2 배 높게 산정되었다. 또한, 수리간극의 비가 5인 경우(Fig. 7(c))에는 추세선의 기울기가 2.03으로 Q_{TC} 가 Q_{TD} 보다 2배 정도 높게 과대평가되었음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 두 절리군 간의 수리간극 차이로 인한 이방적 수리전도 특성이 DFN 유동해석과 연속체 유동해석 간의 결과에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 이는 DFN 유동해석 시에 공동 형상과 관련하여 서로 다른 수리간극을 갖는 개별 절리와 공동 경계가 교차하는 지점의 노드 (node) 분포가 총 지하수 유입량에 영향을 미치지만 연속체 해석에서는 공동 경계를 이루는 모든 요소에서 주 수리전도도가 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 두 접근법 사이에는 강한 상관관계가 존재하므로 공동 형상에 따라 보정계수를 도입하는 방안에 관한 추가적인 연구가 유효할 수 있다고 사료된다. 또한 이런 경우에 보편적인 방법으로 K_{11} 과 K_{22} 의 기하평균을 사용하여 매질의 수리전도도를 산정하고 연속체 유동해석을 수행할 수 있다.

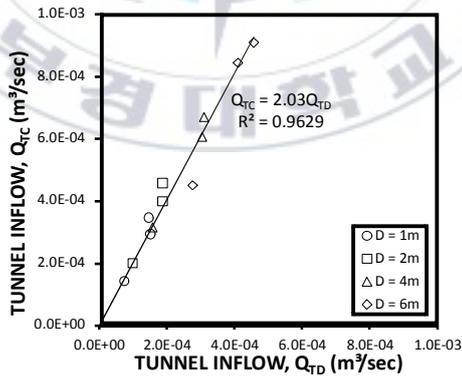
Fig. 8은 최대 및 최소 주 수리전도도의 기하평균을 사용하여 연속체 유동해석을 수행한 수치실험 결과를 두 절리군의 수리간극 비를 기준으로 분류하여 도시한 것이다. 두 절리군의 수리간극이 같은 경우(Fig. 8(a))에는



(a)

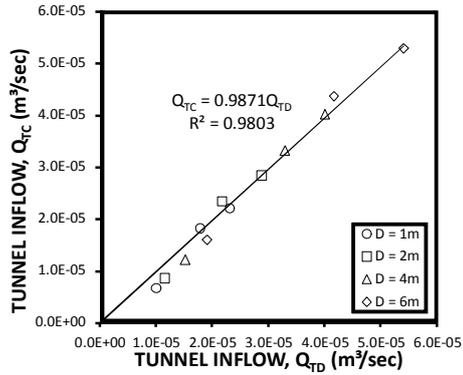


(b)

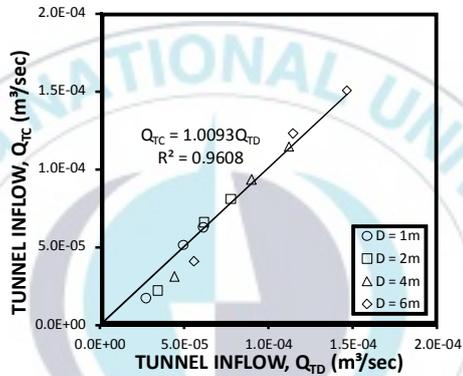


(c)

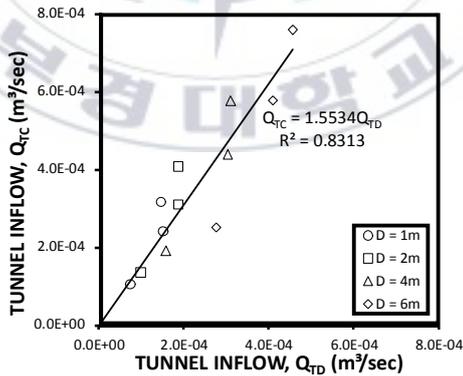
Fig. 7. Tunnel inflow obtained from DFN (Q_{TD}) and continuum (Q_{TC}) flow model for DFN blocks in Table 3; (a) aperture ratio=1, (b) aperture ratio=2 and (c) aperture ratio=5



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Tunnel inflow obtained from DFN (Q_{TD}) and continuum (Q_{TC}) flow model using the geometric mean of the principal hydraulic conductivities for DFN blocks in Table 3; (a) aperture ratio=1, (b) aperture ratio=2 and (c) aperture ratio=5

추세선의 기울기가 0.9871, R^2 가 0.9803로 Q_{TC} 와 Q_{TD} 사이에 매우 강한 상관성을 갖는다. 수리간극의 비가 2인 경우(Fig. 8(b)) 추세선의 R^2 는 0.9608로 K_{11} , K_{22} 의 방향과 크기를 입력한 연속체 해석을 수행한 결과(Fig. 7(b))와 비교했을 때 Q_{TC} 와 Q_{TD} 사이에 더욱 강한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 기울기는 1.0093으로 주 수리전도도의 기하평균을 사용하지 않았을 때(Fig. 7(b))에 비해 1에 더욱 근사한 값으로 산정되어 DFN 유동해석을 통해 산정된 유입량과 연속체 유동해석으로 산정된 유입량이 더욱 유사한 결과를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 수리간극의 비가 5인 경우에는 K_{11} , K_{22} 의 방향과 크기를 사용한 연속체 해석 결과(Fig. 7(c))의 추세선 기울기는 약 2.03로 DFN 유동해석에 의한 결과에 비해 연속체 유동해석에 의한 결과가 약 2배정도 과대평가되었지만 주 수리전도도를 사용한 연속체 해석 결과(Fig. 8(c))에서는 추세선의 기울기가 약 1.55로 감소하였고 이를 통해 연속체 유동해석에 의한 결과가 과대평가되던 폭이 줄었음을 알 수 있다. 따라서 연속체 유동모델에 의한 지하수 유입을 산정하는 경우에 매질의 이방성이 크다면 주 수리전도도(K_{11} , K_{22})의 기하평균을 사용한 연속체 해석을 수행하는 것이 더 적합할 수 있다고 사료된다.

5. 절리 길이분포의 하한절삭이 DFN 유동해석 결과에 미치는 영향

앞의 수치실험을 통하여 DFN 유동모델에서 산정된 ER 값이 0.2 이상인 경우에는 등가수리상수를 사용한 연속체 해석이 적합하지 못할 수 있다는 것을 논의한 바 있다(3장). 또한, 지중 공동 내부로의 유입량을 산정한 현장적용에서는 ER 값이 0.2 보다 작은 값을 갖더라도 수리간극의 변화에 따른 이방성의 증대에 따라 연속체 유동해석의 결과가 적합하지 않을 수 있다는 결과를 제시하였다(4장). 이러한 조건에서는 연속체 해석보다 DFN 유동모델을 이용한 해석이 더욱 타당할 수 있다. 그러나 처리해야할 자료의 양이 많은 경우에는 시간, 비용, 전산 시스템 등의 다양한 제약 요인으로 인하여 DFN 유동해석을 수행하는데 어려움이 있다. 전산 시스템이 처리할 자료의 양을 줄이고 연산을 수행하여 유사한 결과를 얻을 수 있다면 더욱 큰 규모의 현장이나 복잡한 절리 연결 구조를 갖는 현장에서 DFN 유동해석의 적용이 원활해질 수 있다.

Gong and Rossen(2014)은 2차원 절리 네트워크에서 절리의 간극을 고려하여 상대적으로 유량이 작은 절리들을 우선적으로 제거하여 약 30%의 절리가 제거된 DFN에서 90% 이상의 투과도를 유지하였음을 보고하였다. 본 연구에서는 DFN 유동모델을 해석할 때 절리길이를 고려하여 전체 흐름에 큰 영향을 미치지 않는 절리들을 제거함으로써 입력 자료를 경감하는 방법을 고찰하였다.

Fig. 9는 두 절리군을 사용하여 교차각이 90° 이고 면적빈도 $2\text{개}/\text{m}^2/\text{set}$, 길이 평균 = 1.5m , 표준편차 = 1.5m 인 감마분포를 따르는 DFN 블록을 구성하고 있는 절리길이를 누적분포도로 나타낸 것이다. 이와 같은 DFN 블록의 경우 포함하고 있는 절리분포의 최소길이는 0.05m , 최대길이는 8.09m 이고 길이 1m 이하인 절리들이 약 50% 이상, 4m 이하인 절리들이 약

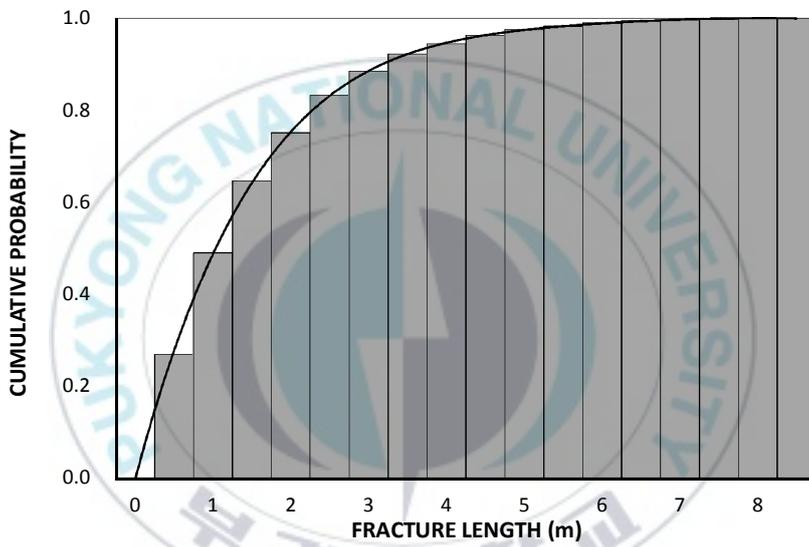


Fig. 9. Cumulative probability of fracture size distribution for the DFN1-0

90% 이상을 차지하고 있다. 이와 같은 길이분포를 갖는 DFN 블록에서 상대적으로 길이가 짧은 절리들은 DFN 블록의 전체 흐름에 큰 영향을 미치지 못할 가능성이 높다. 이때, 길이가 짧은 절리부터 순차적으로 제거하면 연결성에 중요한 역할을 하는 상대적으로 긴 절리들은 유지하면서 입력 자료의 양을 줄일 수 있기 때문에 수치연산을 경감시킬 수 있다. 따라서 본 연구는 DFN 유동해석을 효과적으로 할 수 있는 하한 절삭의 정도를 수치 실험을 통하여 고찰하였다.

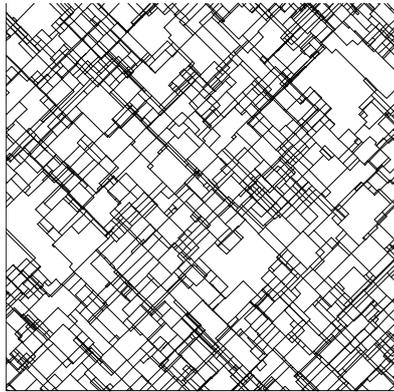
본 연구에서는 절리 네트워크에서 길이가 짧은 절리들을 제거하여도 DFN 블록의 수리전도도가 유지되는 절리 길이분포의 하한절삭이 가능한 범위를 찾기 위한 수치실험을 수행하였다. Table 6은 수치실험에 사용된 DFN 시스템의 입력변수이다. 절리의 방향성은 앞에서와 같이 두 개의 절리 군을 사용하여 절리군 교차각을 90°, 60°, 30° 세 그룹으로 구분하였고 모든 절리의 수리간극은 0.1mm로 일정한 값을 사용하였다. 9개의 DFN 시스템을 사용했는데 앞의 실험에 사용된 Table 1의 6개 DFN 블록(DFN1-3, DFN2-3, DFN3-3, DFN1-6, DFN2-6, DFN3-6)과 절리 길이분포가 다른 DFN 블록에 대해서도 고려하기 위하여 면적빈도 2개/m²/set, 길이의 평균 = 1.5m, 표준편차 = 1.5m 인 감마분포를 따르는 3개의 DFN 블록 (DFN1-0, DFN2-0, DFN3-0)이 추가적으로 사용되었다.

해석영역의 경계조건은 앞에서의 수치실험과 동일하게 부여되었다. 각각의 DFN 블록에서 절리의 길이가 짧은 것부터 제거하여 10% 간격으로 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%의 절리가 제거된 총 90개(9×10)의 DFN 블록에 대하여 수치실험이 수행되었다.

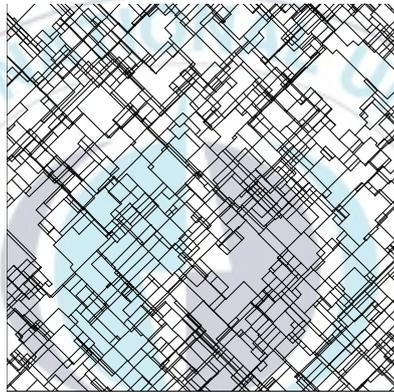
Figs. 10~12는 Table 6의 DFN1-0, DFN2-0, DFN3-0 블록에서 절리 길이분포를 각각 0%, 30%, 50%로 하한절삭한 DFN 블록의 모습이다. 절리를 제거하지 않은 Figs. 10(a)~12(a)와 30%의 절리를 제거한 Figs.

Table 6. Summary of fracture geometry parameters for the generated DFN systems to investigate cutoff effect

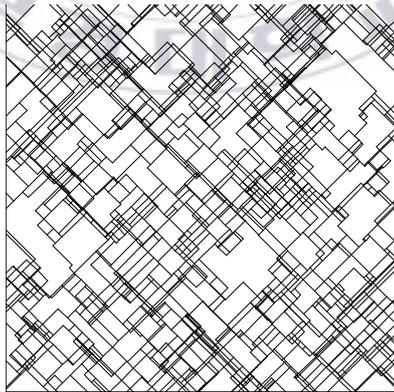
DFN ID	Orientation (degrees)	Density (#/m ² /set)	Gamma distributed trace length (m)	
			Mean	Std.
DFN1-0	45 and 135	2	1.5	1.5
DFN2-0	60 and 120	2	1.5	1.5
DFN3-0	75 and 105	2	1.5	1.5
DFN1-3	45 and 135	2	2	1.5
DFN2-3	60 and 120	2	2	1.5
DFN3-3	75 and 105	2	2	1.5
DFN1-6	45 and 135	4	2	1.5
DFN2-6	60 and 120	4	2	1.5
DFN3-6	75 and 105	4	2	1.5



(a)

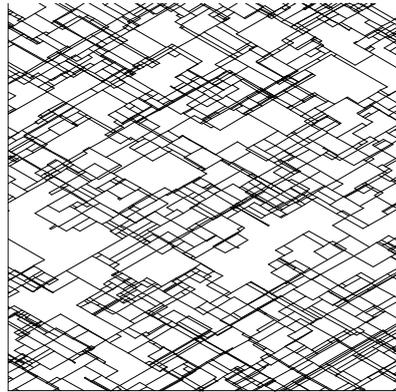


(b)

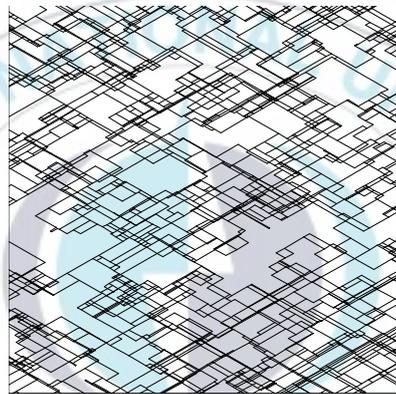


(c)

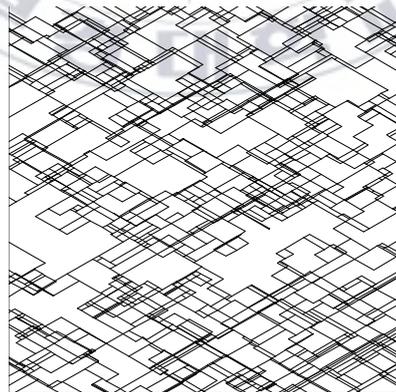
Fig. 10. Generated fracture traces of a square window of size 20m of DFN1-0; (a) cutoff 0%, (b) cutoff 30% and (c) cutoff 50%



(a)

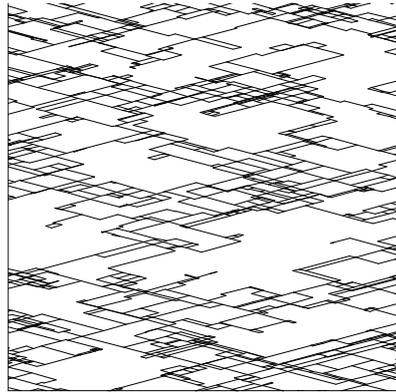


(b)

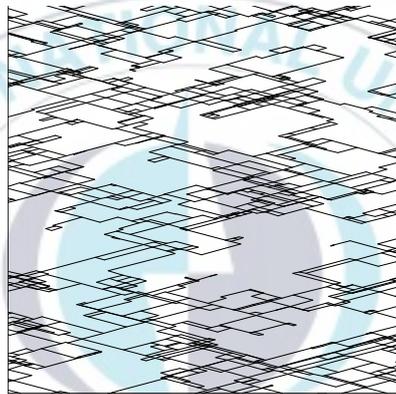


(c)

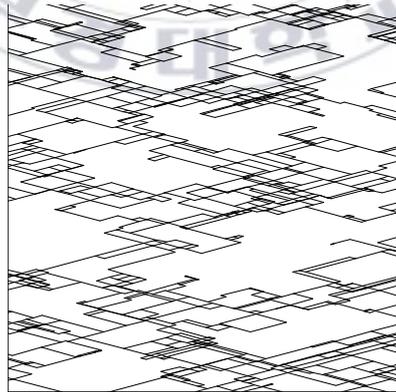
Fig. 11. Generated fracture traces of a square window of size 20m of DFN2-0; (a) cutoff 0%, (b) cutoff 30% and (c) cutoff 50%



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Generated fracture traces of a square window of size 20m of DFN3-0; (a) cutoff 0%, (b) cutoff 30% and (c) cutoff 50%

10(b)~12(b)를 비교하였을 때 육안으로 큰 차이를 느낄 수 없지만, Figs. 10(a)~12(a)와 50%의 절리를 제거한 Figs. 10(c)~12(c)를 비교해보면 확연한 차이를 인지할 수 있다. 절리길이의 하한절삭을 통해 DFN 블록에서 흐름에 큰 영향을 미치는 긴 절리들은 유지되고 사이를 연결하는 짧은 길이의 절리들이 제거된 것을 볼 수 있다.

수치실험의 결과 DFN 블록에서 절리들을 제거하지 않은 cutoff 0%인 블록의 평균블록수리전도도(K_0)와 10% 간격으로 절리들을 제거한 블록의 평균블록수리전도도(K_{0c})의 비가 Fig. 13에 도시되어있다. Fig. 13에서 그래프의 x축은 하한절삭한 cutoff의 %를 나타내고 y축은 K_{0c}/K_0 이다. 수치실험에 사용된 모든 DFN 블록에서 절리를 20%까지 하한절삭하여도 K_{0c} 는 K_0 의 95% 이상을 유지하였다. 또한 모든 조건의 블록에서 길이가 짧은 절리를 30%까지 하한절삭하여도 K_0 의 90% 이상의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 40%이상의 절리를 제거하면 일부 DFN블록에서는 K_{0c} 가 90% 이하로 떨어지게 된다. Figs. 14~16은 DFN1-0, DFN1-3, DFN1-6와 각 DFN블록에서 10%, 20%, 30%, 40%, 50%의 절리들을 제거한 블록들에서 30° 간격으로 방향에 따라 산정된 블록수리전도도 $k^{(p)}$ 값을 그래프에 도시한 것이다. 60% 이상의 절리가 제거된 DFN 블록에서 산정된 블록수리전도도 값들은 Fig. 13에서 알 수 있듯이 큰 차이를 발생하여 그래프에 도시하지 않았다. cutoff가 10%와 20% 일 때에는 절리를 제거하지 않은 블록에서 산정된 블록수리전도도 값과 거의 비슷한 값을 갖고 cutoff 30%인 경우에도 값이 크게 떨어지지 않는다는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 17은 하한절삭에 따른 이방성의 변화를 알아보기 위하여 각각의 DFN 블록에서 산정한 주 수리전도도 비(K_{11}/K_{22})의 변화를 그래프에 도시한 것이다. 여기서 이방성의 크기에 따라 세 그룹으로 나누어진 것을 확인할 수 있는데, 이는 두 절리군을 포함하는 DFN 블록에서 절리군 사이의 교

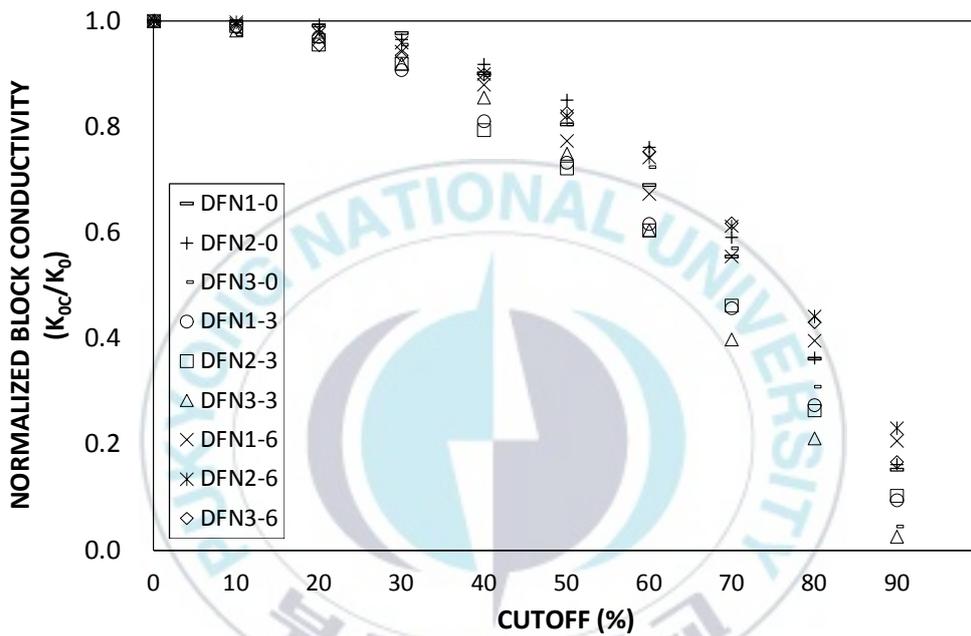


Fig. 13. Normalized block conductivity, K_{OC}/K_0 for all DFN blocks in Table 6.

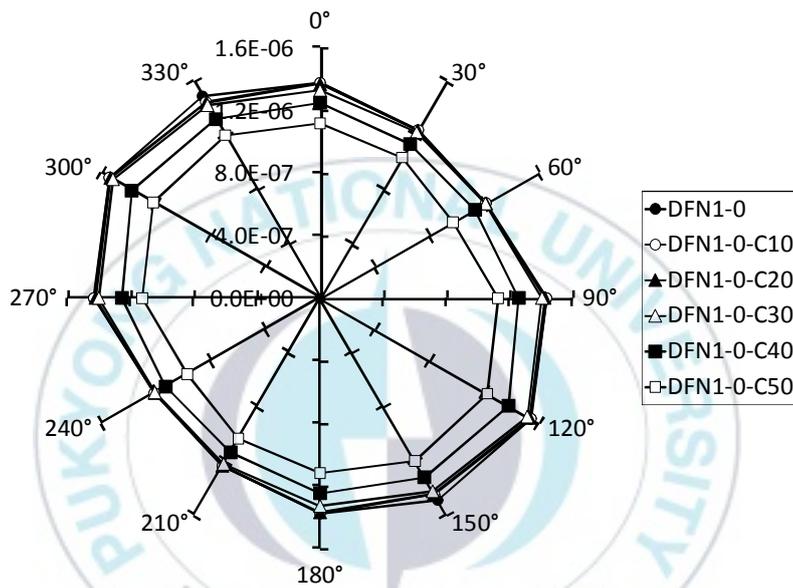


Fig. 14. Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-0 with cutoff of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%

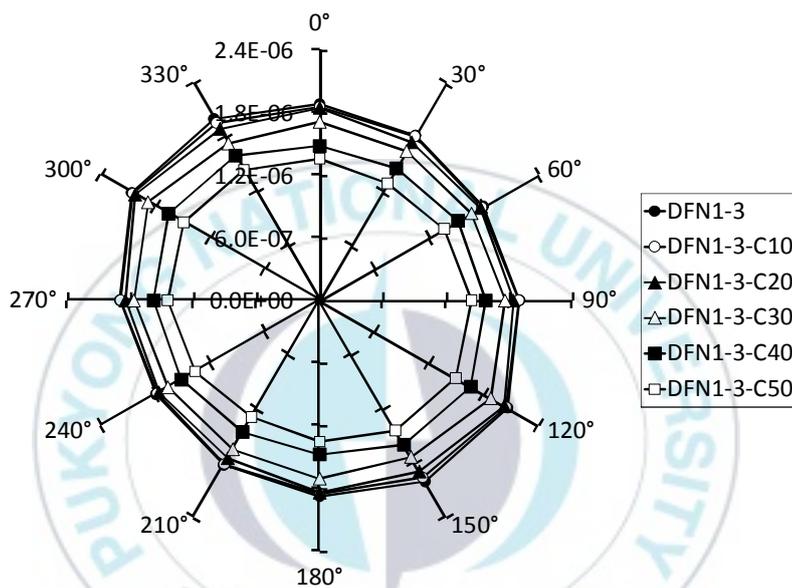


Fig. 15. Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-3 with cutoff of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%

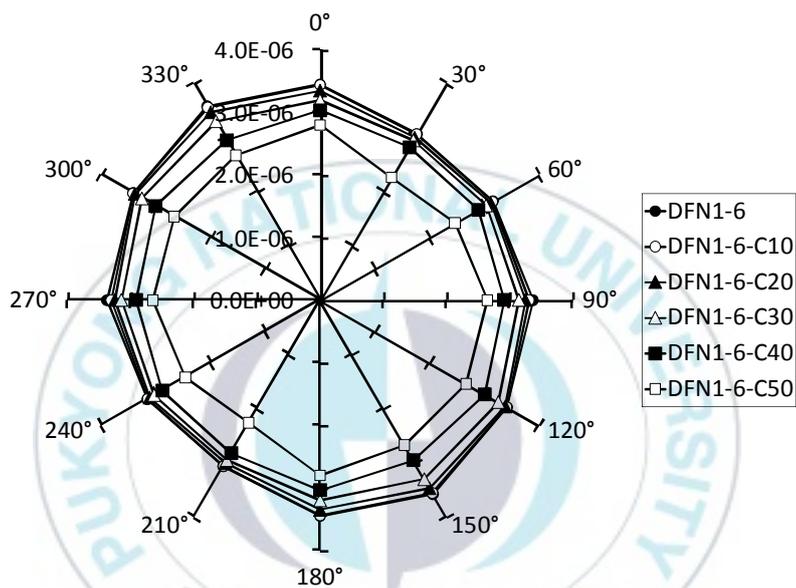


Fig. 16. Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-6 with cutoff of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%

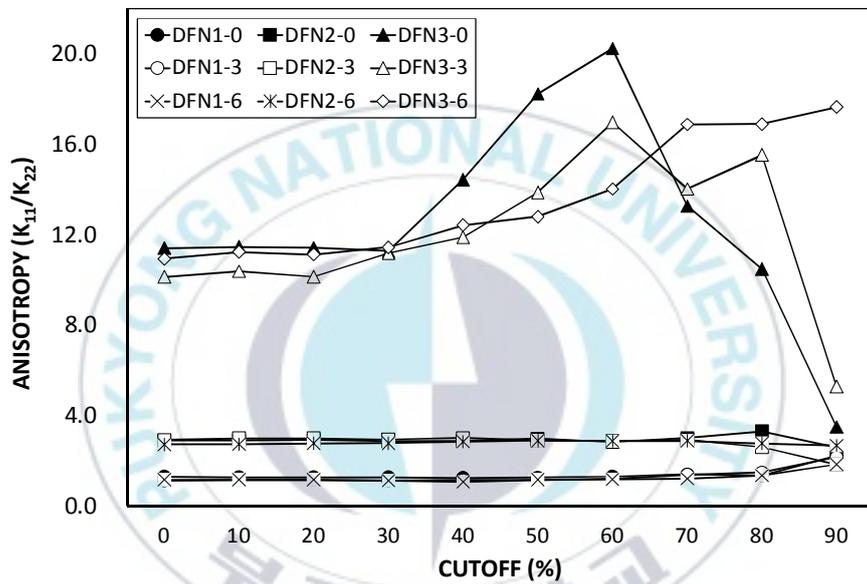


Fig. 17. Anisotropy, K_{11}/K_{22} of all DFN blocks in Table 6 with respect to cutoff value

차각에 의해 이방성의 크기가 뚜렷하게 구분되기 때문이다. 아래쪽에 위치하고 있는 그룹부터 차례대로 절리군 교차각이 90°, 60°, 30°인 DFN 블록 그룹이며 교차각이 90°, 60°인 그룹에서는 약 70%까지의 많은 절리들을 제거하였을 때에도 이방성에 유의미한 변화가 없다고 판단된다. 그러나 절리군 교차각이 30°인 그룹의 경우 cutoff 40% 이상에서는 이방성에 뚜렷한 변화가 발생한다. 따라서 본 연구의 DFN 블록에서 길이가 짧은 절리들을 30%까지 제거하여도 이방성이 유지되며 절리들을 제거하지 않은 블록에서의 흐름 특성을 유지한다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 수행한 수치실험에서 전체 흐름에 큰 영향을 받지 않고 절리 길이의 하한절삭이 가능한 범위는 약 30% 정도로 판단된다. 본 연구의 수치실험에 사용된 절리의 기하학적 속성은 국내 현장에서 일반적으로 나타나는 파라미터의 범위를 적용하였지만 추후 다양한 조건의 기하학적 속성을 갖는 DFN 시스템에 대하여 심도 있는 연구가 이루어져야 하며 이와 더불어 Gong and Rossen(2014)이 제시한 수리간극을 조정하는 방법을 결합한 추가적인 연구도 수행되어야 한다.

6. 균열텐서를 이용한 업스케일링

유체유동 모델링은 수십~수백 미터 규모의 현장을 대표할 수 있어야 한다. 앞의 5장에서는 DFN 유동모델을 이용한 해석이 더욱 타당한 조건에서 절리 길이분포의 하한절삭으로 입력 자료의 양을 경감하여 효율적인 연산을 수행하는 방법을 모색하였다. 그러나 현장 스케일의 유동해석을 수행할 때 자료의 개수를 줄이는 것만으로는 한계가 있을 수 있다. 이러한 경우 DFN 유동모델의 업스케일링을 통해 현장스케일의 유동해석을 수행할 수 있다.

업스케일링을 수행하면 km 단위까지 다양한 규모에서도 모델링을 수행할 수 있다. 최근에 업스케일링에 대한 필요성이 대두되어 현장시험을 통해 얻은 수리상수를 현장 규모로 업스케일링하는 연구들이 다양하게 이루어지고 있다. 그동안 업스케일링 기법은 대부분 연속체 유동해석 분야에서 연구되었는데, Wen and Gomez-Hernandez(1996)는 수리전도도가 불균질한 매질에서 단순 평균을 사용하는 것부터 복잡한 역변환을 사용하는 것까지 다양한 업스케일링 기법에 대해 논의한 바 있다.

Oda(1982)는 절리의 기하학적 속성들이 결합된 효과를 지시하는 균열텐서(F_{ij}) 파라미터를 정의하였다. 이후 Han and Um(2017)은 절리의 빈도와 길이가 동시에 결합된 파라미터인 균열텐서의 일차불변량(F_0)와 평균 블록 수리전도도의 사이에 강한 상관관계가 존재한다는 결과를 제시하였다. 식 (9)은 DFN 시스템의 절리군이 M개 일 때 F_0 와 절리의 빈도 및 길이의 관계를 설명한다(Han and Um, 2017).

$$F_0 = \sum_{m=1}^M \rho_m E(r_m^2) \quad (9)$$

여기서, ρ_m 는 절리군 m 의 면적빈도이고 $E(r_m^2)$ 는 절리군 m 의 절리길이(r) 제공의 기댓값이다.

본 연구는 블록수리전도 특성의 변화 없이 DFN 시스템을 구성하는 절리 속성의 변환을 통하여 수치연산을 효율적으로 수행하기 위한 방법으로 균열 텐서 파라미터를 이용한 업스케일링 기법을 제안하고자 한다. 본 연구에서는 F_0 와 절리빈도 및 길이의 관계식을 이용하여 절리의 기하속성을 보정하고 DFN 유동해석을 수행하였다.

수치실험에서 사용된 DFN 블록의 절리 속성과 식(9)를 이용해 보정된 절리 면적빈도와 길이가 Table 7에 요약되어있다. 앞의 실험에 사용된 Table 1 중에서 9개 DFN 시스템이 사용되었으며, 해석영역의 경계조건은 앞의 수치실험과 동일하다. 각 DFN 시스템에서 절리군의 면적빈도는 절반으로 감소시켰으며 절리길이는 식(9)를 이용해 증가시켰다. 또한, 보정하기 전의 DFN 블록에서 산정된 최대 및 최소 주 수리전도도도, 평균 블록수리전도도(K_{11} , K_{22} , K_0)와 F_0 에 의해 보정한 DFN 블록에서 산정된 주 수리전도도, 평균 블록수리전도도(K_{11} , K_{22} , K_{0F})가 Table 8에 수록되어있다.

Fig. 18은 보정하기 전의 DFN 블록에서 산정된 평균 블록수리전도도 K_0 와 보정한 DFN 블록에서 산정된 평균 블록수리전도도 K_{0F} 를 비교하기 위해 도시한 그래프이다. x축은 보정하기 전의 K_0 이고 y축은 F_0 를 이용해 보정한 DFN 블록의 K_{0F} 이다. 보정 후의 값이 80% 정도로 산정되는 경향을 보였지만 두 값 간의 상관성은 매우 높게 나타났다. 이는 F_0 보정을 이용한 업스케일링이 어느 정도 타당성을 확보할 수 있음을 의미한다.

Figs. 19~21은 각각 보정 전후의 DFN 블록에서 30° 간격으로 산정된 방향 블록수리전도도 $k^{(p)}$ 를 도시한 그래프이다. Fig. 19와 Fig. 21에서는 매 30° 간격의 방향에서 보정 후의 값이 보정 전의 값에 비해 낮게 산정되었지만 그 차이는 미약하며 Fig. 20에서는 보정 전후의 값이 매우 유사하게

Table 7. Summary of fracture density and length for the DFN systems before and after F_0 correction

DFN ID	DFN before correction		DFN after correction	
	Density (#/m ² /set)	Length (m)	Density (#/m ² /set)	Length (m)
DFN1-3	2	2.0	1	2.4
DFN1-4	4	0.8	2	1.4
DFN1-5	4	1.5	2	2.0
DFN2-3	2	2.0	1	2.4
DFN2-4	4	0.8	2	1.4
DFN2-5	4	1.5	2	2.0
DFN3-3	2	2.0	1	2.4
DFN3-4	4	0.8	2	1.4
DFN3-5	4	1.5	2	2.0

Table 8. Summary of block conductivity parameters for the DFN systems before and after F_0 correction

DFN ID	before F_0 correction (m/s)			after F_0 correction (m/s)		
	K_{11}	K_{22}	K_0	K_{11}	K_{22}	K_{0F}
DFN1-3	2.041E-06	1.780E-06	1.911E-06	1.585E-06	1.261E-06	1.423E-06
DFN1-4	1.428E-06	1.176E-06	1.302E-06	1.394E-06	1.174E-06	1.284E-06
DFN1-5	3.929E-06	3.603E-06	3.766E-06	3.150E-06	2.852E-06	3.001E-06
DFN2-3	2.612E-06	8.891E-07	1.751E-06	1.911E-06	6.072E-07	1.259E-06
DFN2-4	1.654E-06	6.291E-07	1.142E-06	1.756E-06	6.342E-07	1.195E-06
DFN2-5	5.012E-06	1.792E-06	3.402E-06	4.038E-06	1.380E-06	2.709E-06
DFN3-3	1.792E-06	1.732E-07	9.827E-07	1.465E-06	7.927E-08	7.723E-07
DFN3-4	1.201E-06	2.280E-07	7.143E-07	1.337E-06	1.265E-07	7.315E-07
DFN3-5	4.605E-06	3.945E-07	2.500E-06	3.801E-06	2.908E-07	2.046E-06

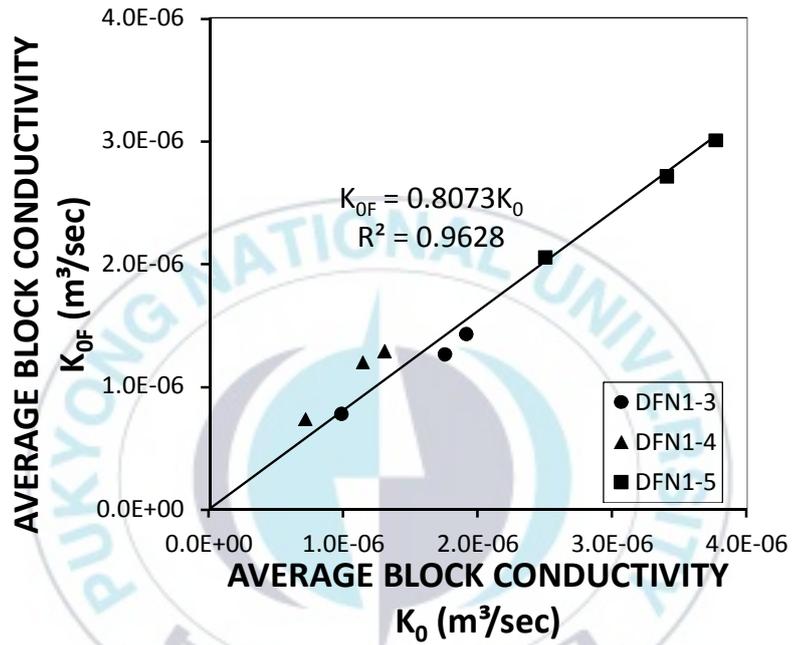


Fig. 18. Average block conductivity obtained from DFN before correction (K_0) and after correction (K_{0F}) for all DFN blocks in Table 8

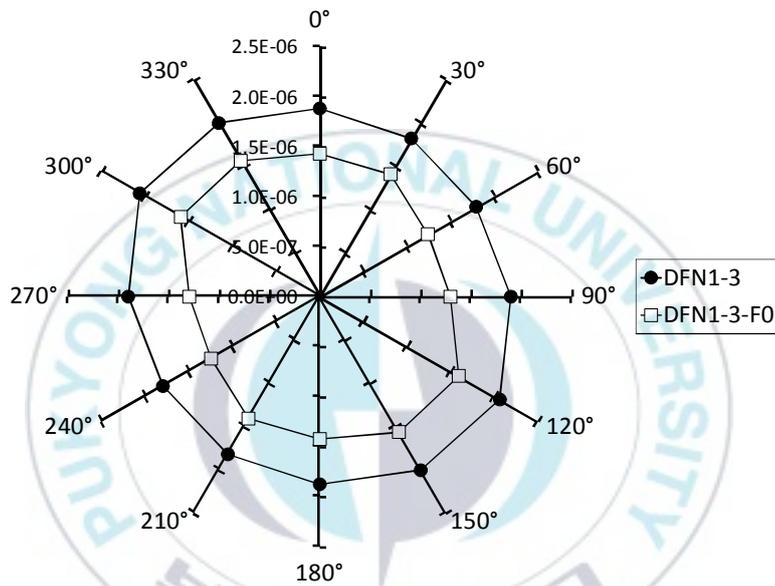


Fig. 19. Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-3 with F_0 correction

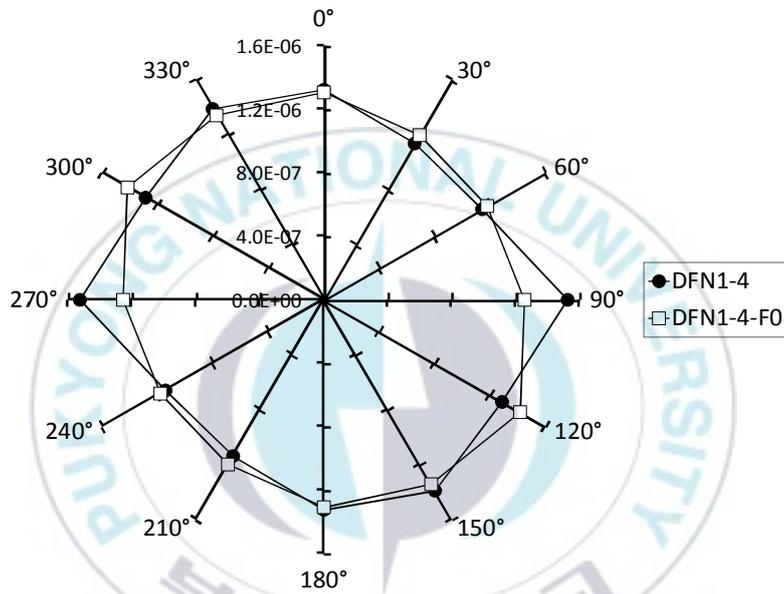


Fig. 20. Calculated directional conductivity, $k^{(D)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-4 with F_0 correction

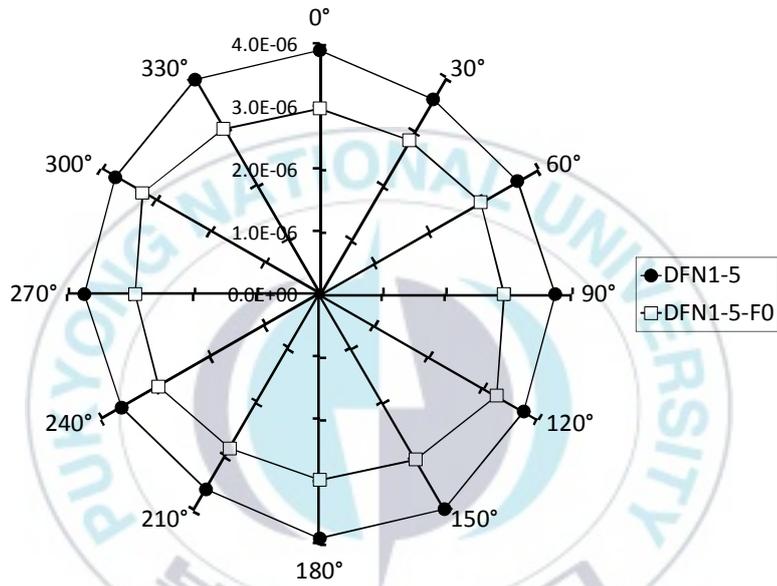


Fig. 21. Calculated directional conductivity, $k^{(p)}$, (m/s) in different flow directions for DFN1-5 with F_0 correction

나타났음을 알 수 있다. 또한, 방향에 따른 블록수리전도 특성의 경향은 본 연구의 세 가지 경우에서 유사하다는 것을 알 수 있다. 이는 F_0 보정을 통한 업스케일링의 가능성을 지시한다.



7. 결 론

본 연구는 절리성 암반에 대한 연속체 유동해석의 조건을 파악하기 위하여 다양한 기하학적 속성을 갖는 이차원 DFN 블록에 대하여 DFN 유동모델과 등가의 수리상수를 사용한 연속체 유동모델을 적용하여 두 접근법 간의 상관성을 분석하였다.

치밀한 결정질의 절리성 암반에서 연속체 유동해석이 가능한 조건은 해석 영역의 크기가 REV 이상이며 DFN을 연속체로 가정한 이론적 블록수리전도도와 DFN 유동모델로 산정한 블록수리전도도 사이의 상대오차(ER)가 0.2 이하의 낮은 경우로 평가되었다. DFN을 구성하는 개별 절리에 대한 수리간극의 변동성이 증대되면 ER 값도 증가하지만 ER 값이 0.2 이하로 낮은 경우에는 DFN 유동해석과 연속체 유동해석 결과 간에 높은 상관성을 유지하였다.

등가수리상수를 사용한 연속체 유동해석의 현장 적용성을 검토하기 위하여 지중 공동에서의 지하수 유입에 대한 모의 수치실험이 수행되었다. 개별 절리의 수리간극이 일정하고 ER 값이 0.2 이하로 낮은 경우에는 두 접근법 간에 상관성이 높게 평가되었으며 절리성 암반에 대한 등가연속체 유동해석이 가능할 것으로 판단된다. 절리군 간의 수리간극 차이가 증가하여 이방성이 증대되면 ER 값이 낮아도 연속체 유동모델에 의한 지하수 유입이 DFN 유동모델에 의한 결과에 비하여 과대평가될 가능성이 높은 것으로 평가되었다. 이와 같은 경우 주 수리전도도(K_{11} , K_{22})의 기하평균을 사용하여 연속체 해석을 수행하는 것을 추천하며 공동의 채원에 따른 보정계수의 도입에 관한 추가적인 후속 연구가 필요하다고 사료된다.

연속체 유동모델 보다 DFN 유동모델이 적합한 절리 기하속성을 갖는 DFN 시스템은 절리길이의 하한절삭을 통하여 DFN 유동모델을 적용할 수

있다. 절리길이의 하한절삭을 고려한 수치실험 결과 DFN 시스템의 블록수리전도 및 이방적 특성은 절리길이의 하한절삭이 30% 수준에서도 유의미한 변화 없이 유지되는 것으로 평가되었다.

본 연구는 균열텐서 파라미터와 절리 면적빈도 및 길이의 관계식을 이용해 DFN 시스템의 절리 속성 보정을 통한 업스케일링 기법을 연구한 결과 보정 전과 후의 블록수리상수가 유사하게 산정되었다. 이는 균열텐서 파라미터의 적용이 현장스케일의 절리성 암반에 대한 업스케일링 수단으로 적합할 수 있음을 지시하지만 확고한 결론을 도출하기 위해서는 추후 다양한 절리의 속성에 대한 심도 있는 연구가 뒷받침되어야 한다.



참고문헌

- Andersson, J., Dverstorp, B., 1987. Conditional simulations of fluid flow in three dimensional networks of discrete fractures, *Water Resour. Res.* 23, 1876–1886.
- Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B., Peaudecerf, P., 1990a. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model, *Water Resour. Res.* 26, 479–489.
- Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., Margritta, R., 1990b. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 2. The transport model, *Water Resour. Res.* 26, 491–500.
- Carrera J., Heredia, J., Vomvoris, S., Hufschmied, P., 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.
- Gong, J., W.R. Rossen, 2014, Modeling flow in naturally fracture reservoirs: effect of fracture aperture distribution on critical sub-network for flow, DFNE, Canada.
- 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.
- Han, J. and J. Um, 2016a, 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.
- Han, J. and Um, J. 2016b, Effect of joint orientation distribution on hydraulic behavior of the 2-D DFN system. *Economic and Environmental Geology*. 49, 31–41.
- Han J., 2016, Analysis of hydraulic characteristics of fractured rock masses through 2-D DFN fluid flow modeling, Master thesis, Pukyong National University, 104p.
- Hsieh, P.A., Neuman, S.P., 1985. Field determination of the three dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media-1. Theory, *Water Resour. Res.* 21, 1655–1665.
- Lee, D. and Um, J., 2017, A Study on Applicability of Equivalent Continuum Flow Model in DFN Media, *Tunnel & Underground Space* (J. of Korean Society for Rock Mech.), 27, 303–311.
- Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R., Witherspoon, P.A., 1982. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resour. Res.* 18, 645–658.
- Neuman, S.P., Depner, J.S., 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., 1982. Fabric tensor for discontinuous geologic materials, *Soils and Foundations*, 22, 96–108.
- Oda, M., 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses,

- Geotechnique. 35, 483–495.
- Priest, S.D., 1993. Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, London, 473p
- Rouleau, A., Gale, J.E., 1987. Stochastic discrete fracture simulation of ground water flow into an underground excavation in granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 24, 99–112.
- Rocha, M. and F. Franciss, 1977, Determination of permeability in anisotropic rock masses from integral samples, Structural and Geotechnical Mechanics, edited by W. J. Hall, Prentice–Hall, New York, 178–202.
- Schwartz, F.W., Smith, W.L., Crowe, A.S., 1983. A stochastic analysis of microscopic dispersion in fractured media, Water Resour. Res. 19, 1253–1265.
- Shapiro, A.M., Andersson, J., 1985. Simulation of steady state flow in three dimensional fracture networks using boundary element method, Advances in Water Resour. 8, 106–110.
- Snow, D. T., 1965, A parallel plate model of fractured permeable media, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 331p.
- 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.
- Sudicky, E.A., McLaren, R.G., 1992. The Laplace transform Galerkin technique for large–scale simulation of mass transport in discretely fractured porous formations, Water Resour. Res. 28, 499–514.

Wen, X.H., J.J., Gomez-Hernandez, 1996, Upscaling hydraulic conductivities in heterogeneous media: An overview, Journal of Hydrology, 183, 9-32.



요 약

절리성 암반에서의 유체 유동 특성에 관한 연구는 수리지질학, 암반공학, 자원공학 등 여러 분야에서 중요한 과제이다. 단일 절리와 같은 절리 스케일에서 유체의 흐름은 전통적인 연속체 해석법에 의하여 연구하는 것이 보편적이지만, 현장 스케일의 절리성 암반에서는 DFN(discrete fracture network) 유동모델에 의한 해석이 합리적일 가능성이 높다. 그러나 시간, 비용, 전산 시스템 등의 여러 가지 제약을 고려할 때 절리성 암반에 대한 연속체 모델이 적용가능하다면 연속체 유동모델은 DFN 유동모델을 대체할 수 있는 효과적인 수단이 될 수 있다. 본 연구는 다양한 기하학적 속성을 갖는 총 72개의 DFN 블록에 대하여 DFN 유동모델과 등가의 수리상수를 사용한 연속체 모델을 각각 적용하여 두 결과 간의 상관성을 분석하였다. DFN을 연속체로 가정한 이론적 블록수리전도도와 DFN 유동모델로 산정한 블록수리전도도 사이의 상대오차(ER)가 0.2 이하로 낮은 DFN 조건에서 두 접근법 사이에 강한 선형 상관관계를 이루며 두 결과가 거의 일치하는 것으로 평가되었다. DFN 매질에 대한 연속체 유동해석의 현장적용 가능성을 검토하기 위하여 지중 원형공동에서의 지하수 유입에 대한 모의 수치실험이 총 48회 수행되었다. 일정한 수리간극의 DFN 매질에 대한 등가연속체 유동 모델은 유효한 것으로 평가되었지만 수리간극 변화로 인하여 이방성이 증대 되면 DFN 유동모델에 의한 결과에 비하여 과대평가될 가능성이 높다. 연속체 유동모델의 적용이 적합하지 않은 절리의 기하학적 속성을 갖는 DFN 시스템은 절리 길이분포의 하한절삭을 통하여 DFN 유동해석을 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 현장스케일의 DFN 유동 해석을 위하여 균열텐서 파라미터를 이용한 업스케일링 기법의 적용 가능성을 논의하였다.