

## 암반의 3차원 불연속균열망(DFN)에 관한 연구 및 민감도분석

박정찬, 박승훈, 김하영, 김건영, 권상기\*

## Sensitivity Analyses of Three-Dimensional Discrete Fracture Network Modeling of Rock Mass

Jung Chan Park, Seung Hun Park, Ha Yung Kim, Geon-Young Kim, Sangki Kwon\*

**Abstract** This study analyzes the relationship between parameters of the discontinuity in Discrete Fracture Network model such as fracture intensity, fracture orientation, fracture size, fracture shape etc. In this paper, FracMan code was used to model and analyze 3D DFN. A sensitivity analysis was performed in order to analyze the relationship between linear fracture intensity measure ( $P_{10}$ ) and parameters of the discontinuity in  $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$  model area. As a result the sensitivity analysis showed that key parameters affecting fracture intensity are fracture orientation (Trend / Plunge). Conversion factor ( $C_{13}$ ) for  $P_{10}$ , to calculate volumetric fracture intensity measure ( $P_{32}$ ), is derived in case of vertical well and horizontal well when trend is  $10^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$  (7cases) and plunge is  $5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 85^\circ$  (7cases). It is expected that this paper can be used effectively for modeling and understanding DFN model.

**Key words** Discontinuous rock masses, 3D Discrete Fracture Network, Fracture intensity, FracMan code

**초 록** 본 연구에서는 불연속암반의 모사기법인 3차원 불연속균열망(Discrete Fracture Network, DFN)모델의 구성 및 해석 코드인 FracMan을 이용하여, DFN모델에서의 불연속면의 밀도(fracture intensity), 불연속면의 방향성(fracture orientation), 불연속면의 크기(fracture size), 불연속면의 모양(fracture shape) 등의 불연속면의 특성인 자간의 관계를 분석하고자 하였다.  $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$  모델영역에서 균열의 선형밀도( $P_{10}$ )와 불연속면을 구성하는 인자 간의 상관관계 분석을 위해 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구 결과, 불연속면의 밀도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 불연속면의 방향성 인자인 선주향(Trend)과 선경사(Plunge)로 나타났다. 불연속면의 체적밀도( $P_{32}$ )의 계산을 위해서 불연속면의 선주향이  $10^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$  인 7가지 경우와 선경사가  $5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 85^\circ$ 인 7가지 경우에서의 수치, 수평시추일 경우에 관한  $P_{10}$ 의 환산인자( $C_{13}$ )를 도출하였다. 본 연구의 결과가 불연속균열망 모델을 구성하고 이해하는 데 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

**핵심어** 불연속암반, 3D 불연속균열망(DFN), 불연속면의 밀도, FracMan코드

## 1. 서 론

현재 국내에서는 제한된 국토를 효율적으로 활용하기 위해 지하공간의 개발이 활발히 추진되고 있다. 터널,

지하철, 지하주차장 등과 같은 기존의 지하공간 개발에서부터 석유 및 LPG 지하비축기지, 식품저장고, 방사성 폐기물 처분장 등으로 지하공간의 활용 형태와 범위는 더욱 다양화되고 있는 추세이다. 안전한 지하공간 개발을 위해서는 암반의 특성에 대한 면밀한 조사와 이해가 요구된다.

암반의 역학적, 수리적, 열적 거동은 절리(joint), 층리(bedding), 단층(fault)과 같은 다양한 불연속면의 분포 특성에 의해서 크게 좌우된다. 즉, 불연속면은 암반의 강도 및 탄성계수를 저하시키는 중요한 요인으로서, 불연속면의 발달 정도 및 특성에 따라서 불연속 암반에

Received: Jun. 16, 2015

Revised: Aug. 11, 2015

Accepted: Aug. 11, 2015

\*Corresponding Author: Sang Ki Kwon

Tel) +820328607554, Fax) +820328727550

E-Mail) kwonsk@inha.ac.kr

INHA UNIVERSITY, 100, Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

위치한 구조물의 역학적 안정성은 영향을 받게 된다. 암반 내의 지하수와 같은 유체의 유동은 암반블럭(rock block) 자체를 투과하기보다는 대부분이 불연속면을 통해 이동하므로, 불연속면의 특성은 암반의 수리적인 거동에도 큰 영향을 미친다. 또한 현장히터시험을 통해 권상기 등(2011)이 보고한 바와 같이 불연속면의 분포 및 특성은 암반의 열적 거동에도 지대한 영향을 주게 된다. 따라서 지하 구조물의 안정성 평가 및 운영을 위해서는 현지 암반을 불연속면들에 의해 분리된 암석 블록들의 집합체로 간주한 평가가 이루어져야 하고, 불연속면의 특성을 파악하기 위한 조사 및 분석 작업인 불연속면의 특성화 작업은 필수적이다. 불연속면의 특성화 작업은 전통 및 비전통 석유 및 가스 분야의 경제성에도 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며, 불연속면의 분포 특성은 석유 회수율을 예측하는 데 중요한 요인으로 고려되고 있다(Nelson, 2001).

하지만 노두조사 또는 시추공 자료로부터 측정되는 1, 2차원 균열자료를 통해서 암반 내 불연속면의 3차원의 분포를 정확하게 묘사하는 작업은 매우 어려운 일이다. 보다 정확한 3차원 불연속면의 분포를 얻기 위해 현장 지질조사를 통해 획득된 불연속면의 특성 데이터를 바탕으로 다양한 통계적 확률분포를 이용한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Priest, 1993).

본 연구에서는 불연속면의 특성인자(불연속면의 방향성, 크기, 모양 등)의 분포특성을 통계적으로 발생시킬 수 있는 FracMan 코드를 이용하여, 불연속암반의 특성을 대표하는 불연속면의 밀도(fracture intensity)에 영향을 미치는 인자를 규명하기 위해 민감도 분석을 실시하였다.

이를 통해 불연속면의 특성인자 간의 상관관계를 분석하였고, 1차원 균열자료를 바탕으로 3차원 불연속균

열망을 구성하기 위해 필요한 수직 및 수평공에 대한 환산인자(conversion factor)의 범위를 도출하였다.

현재 비전통에너지 자원인 셰일가스 및 오일샌드분야에서는 개발과 생산을 위한 수평공(horizontal well)의 활용이 증가하고 있는 추세이다(Alexander et al., 2011). 따라서 수직 시추를 통해 얻어진 1차원의 불연속면 자료를 통해 수평공 구간의 불연속면 특성을 추정하는 방법이 요구된다. 본 연구에서 도출된 1차원 불연속면의 밀도에 대한 수직 및 수평공의 환산인자는 수평공 구간의 불연속면 특성을 이해하고, 3차원 암반균열망 모델링 작업을 위한 기초자료로서 효과적으로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

## 2. 3차원 불연속 균열암반 모델링

### 2.1 Dual Porosity Model and Discrete Fracture Model

불연속암반을 묘사하는 기법으로는 두 가지 이론적인 개념모델(이원공극-Dual Porosity 모델과 불연속균열망-Discrete Fracture Network 모델)이 연구되었다. Fig. 1은 Warren과 Root(1963)가 제안한 이원공극모델과 불연속균열망을 보여준다(Long et al., 1982).

이원공극모델은 실제 불연속암반을 단순화하는 개념 모델(Conceptual Model)이다. 반면에 불연속균열망은 실제 불연속암반을 최대한 근접하게 묘사하기 위해서, 실제 현장에서 조사된 불연속면의 방향(fracture orientation), 크기(fracture size), 밀도(fracture intensity), 간극(fracture aperture) 등의 불연속면들의 특성에 관한 통계적인 자료를 바탕으로 불연속면의 분포를 묘사하는 추계학적(stochastic)인 모델링기법이다.

불연속균열망은 통계적 처리를 통해서 최적의 분포함수를 찾고, 이를 바탕으로 불연속암반을 특성화하기 때

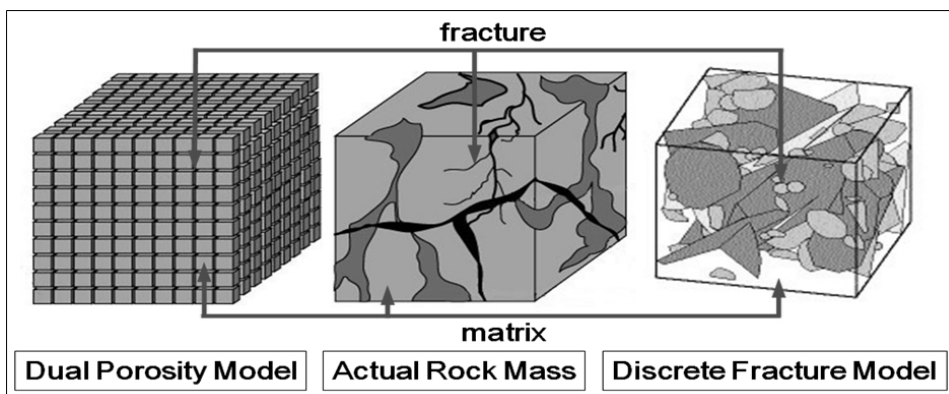


Fig. 1. Conceptual models for discontinuous rock masses (modified from Golder Associates, 2009)

문에 이원공극모델보다 실제에 더욱 적합하다고 보고 되고 있다(Long et al., 1991). 국내에서도 불연속균열 망을 통한 연구가 진행된 바 있다. 박종성 등(2007)이 EDZ에서의 지하수 유동 특성에 관한 수리적인 연구를 위해서 3차원 불연속균열망을 적용시켰고, 민기복 등(2011)은 불연속균열망을 통해서 균열암반의 역학적 및 수리적 성질에 암반 초기응력이 미치는 영향을 고찰하였다.

**2.2 불연속면의 밀도**

불연속면의 밀도(fracture intensity)는 노두조사 방법인 조사선법(scanline survey)과 조사창법(window survey)을 통하여 측정할 수 있다. 해당 조사구역의 차원과 측정된 불연속면의 차원에 따라서 Table 1과 같이 불연속면의 밀도를 정의하고 분류할 수 있다.  $P_{AB}$ 의 아래첨자 A는 조사대상 구역의 차원(1D-line, 2D-surface, 3D-

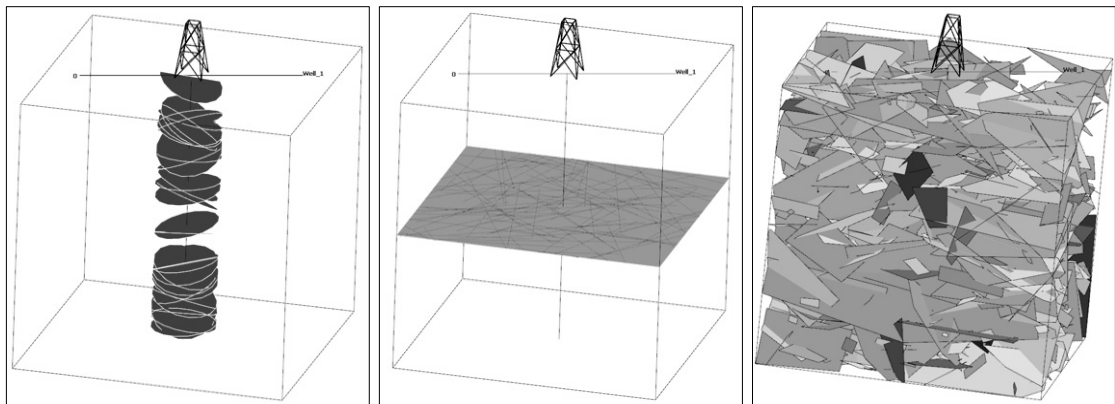
volume)을 의미하고, 아래첨자 B는 측정된 불연속면의 차원(0D-count, 1D-line, 2D-plane, 3D-volume)을 표현한다. 즉,  $P_{10}$ 은 조사구역에서 측정된 불연속면의 개수를 조사선 길이로 나눈 값이고,  $P_{21}$ 은 조사구역에서 측정된 불연속면의 길이의 합에서 조사구역의 넓이로 나눈 값,  $P_{32}$ 는 조사구역에서 측정된 불연속면의 넓이의 합에서 조사구역의 부피로 나눈 값을 말한다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 불연속면의 밀도를 표현하는 방법 중에서 가장 널리 쓰이는 표현방식인  $P_{10}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{32}$ 를 이용하였다.

**2.3 불연속면의 방향성**

불연속면의 방향성은 불연속망을 해석하기 위한 기초적인 자료이자, 암반사면의 안정성평가법인 평사투영법(Stereographic projection method)에서는 핵심 요소로서 작용할 만큼 매우 중요한 인자이다. 3차원 공간상에

**Table 1.** Fracture Intensity measures (Dershowitz and Herda, 1992)

Dimension of Sampling Region	Dimension of Measurement				
	Number of Fractures [D=0]	Fracture Length [D=1]	Fracture Area [D=2]	Fracture Volume [D=3]	
Line [D=1]	$P_{10}$ [1/m]	$P_{11}$			Linear Measures
Area [D=2]	$P_{20}$ [1/m <sup>2</sup> ]	$P_{21}$ [m/m <sup>2</sup> ]	$P_{22}$		Areal Measures
Volume [D=3]	$P_{30}$ [1/m <sup>3</sup> ]		$P_{32}$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$P_{33}$	Volumetric Measures



(a) P10 (Linear fracture intensity)      (b) P21 (Areal fracture intensity)      (c) P32 (Volumetric fracture intensity)

**Fig. 2.** Fracture intensity ( $P_{10}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{32}$ ) built in FracMan

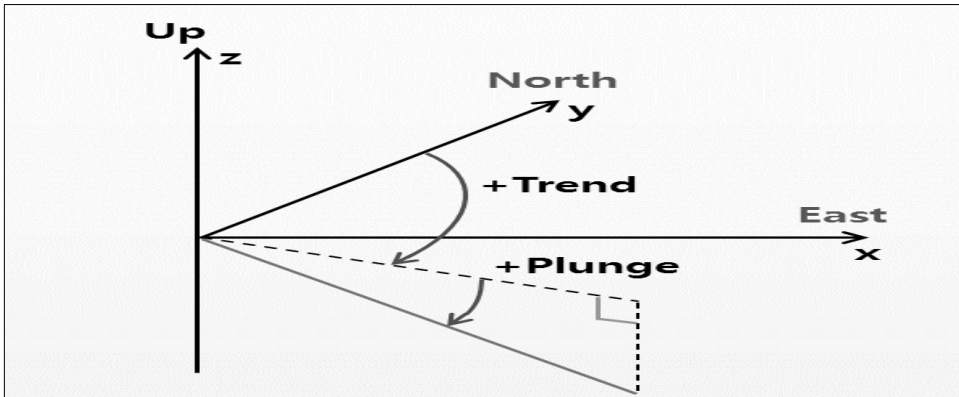
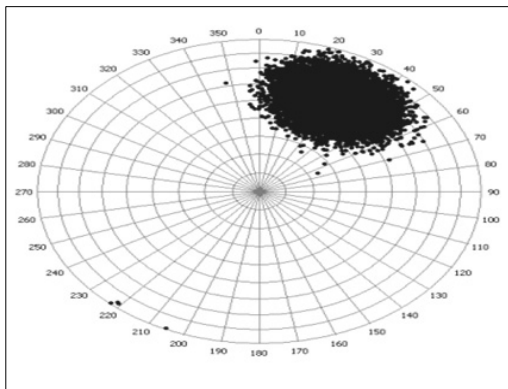
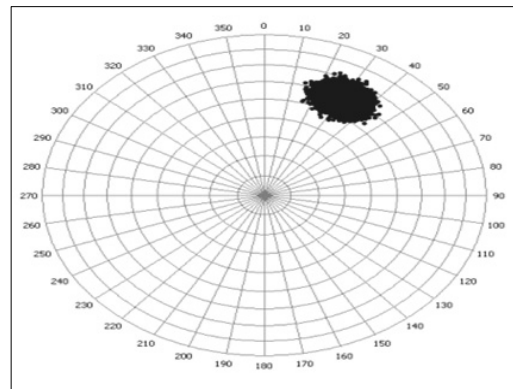


Fig. 3. Fracture orientation system (trend / plunge)



(a) Fisher K = 50  
(P32 1.0, trend 30, plunge 30)



(b) Fisher K = 300  
(P32 1.0, trend 30, plunge 30)

Fig. 4. Effect of Fisher parameter K on a randomly generated joint set

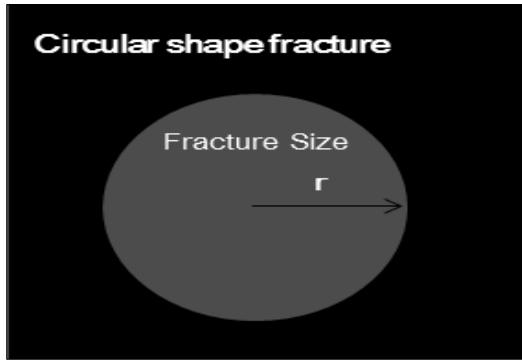
서 불연속면의 방향은 선주향(trend)과 선경사(plunge)로 나타낼 수 있다. Fig. 3과 같이 선주향은 불연속면의 법선벡터가 수평면(xy 평면)상에서 북쪽방향(y축의 양의 방향)과 시계방향으로 이루는 각을 의미하며, 선경사는 불연속면의 법선벡터가 수평면과 수직방향으로 이루는 각을 의미한다.

불연속면의 방향성에 관한 분포모델에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔다. 실제 암반의 불연속면의 방향성에 관한 대표적인 분포모델로는 Fisher 분포(Fisher, 1953), 균등분포(uniform distribution), Bingham 분포(Einstein & Baecher, 1983) 등이 있다. 본 연구에서는 불연속면의 방향성 분포를 Fisher 분포로 가정하였다. Fisher 분포는 모집단이 하나의 대표 방향을 중심으로 대칭적으로 분포한다. 따라서 불연속면의 방향성이 대칭 형태로 분포할 경우에는 일반적으로 Fisher 분포가 가장 적합

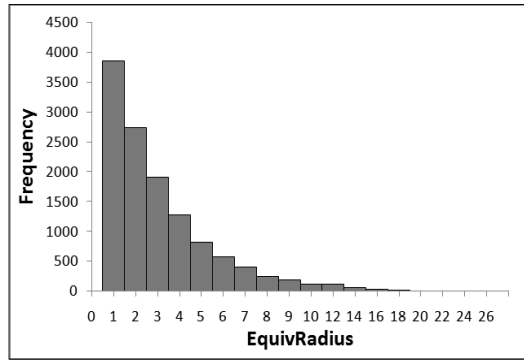
한 형태라고 말할 수 있다. Fisher 분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는 평균벡터로부터의 각편차(angular deviation), K는 Fisher 상수로서 불연속면의 균집도를 나타내며 K 값이 크면 클수록 불연속면들이 매우 밀집해 있고, K 값이 작으면 작을수록 더 넓게 흩어져 있다는 것을 의미한다. Fig. 4는 FracMan을 이용하여 K값만 50과 300으로 각각 다르게 설정한 뒤 불연속균열망을 생성하였다. 각각의 stereonet을 통해서 극점들의 밀집된 정도가 다르다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 방향성 자료(pole)의 개수가 대략 30개 이상일 경우에 K값은 다음과 같



(a) Circular model of fracture in FracMan



(b) Fracture size distribution applied to the modeling : negative exponential distribution

Fig. 5. Fracture shape and size

이 계산할 수 있다(Fisher, 1953).

$$K \simeq \frac{N-1}{N-R} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 불연속면의 방향성 자료의 개수,  $R$ 은 모든 불연속면의 방향성 자료의 벡터 합의 크기를 의미한다.

### 2.4 불연속면의 모양

실제 암반에서의 불연속면은 일정하지 않은 모양으로 존재한다. 불연속면의 모양은 불연속면 간의 연결성에 영향을 주어서 결국 유체흐름 또는 암반의 열적, 역학적 특성에 영향을 미친다. 하지만 실제 불연속암반에서 불연속면의 모양을 측정할 수 있는 신뢰할만한 방법이 없기 때문에, 3차원 불연속균열망 생성을 위한 불연속면 모양의 가정은 불가피하다. 다각형의 모양이 가장 받아들일 만한 개념적인 모델이지만 각각의 다각형의 많은 수의 꼭짓점과 모서리 때문에 계산의 어려움이 따른다. 따라서 일반적으로 계산의 편의를 위해서 원형, 타원형, 정사각형 그리고 직사각형 모양으로 가정된다 (Jing et al., 2007).

대표적인 균열망 해석 프로그램인 NAPSAC에서도 불연속면의 모양은 직사각형으로 가정된다. 국내에서도 서준우(2009)는 불연속암반 및 저류층 내의 불연속면의 모양을 직사각형의 형태로, 노영환 등(2013)은 불연속면의 모양을 원형으로 생성시켜 3차원 불연속균열망을 해석한 사례가 있다. 본 연구에서는 3차원 불연속균열망에서 불연속면의 모양을 Fig. 5(a)와 같이 원형으로 가정하였다.

### 2.5 불연속면의 크기

3차원 불연속균열망을 모사할 때는 현장조사를 통하여 측정된 균열의 길이(trace length)자료를 통계학적인 처리를 통해서 가장 유사한 분포모델을 찾아서 이를 모사하게 된다. 실제 암반내의 불연속면의 크기에 대한 확률분포 함수는 대수정규분포(Baecher et al., 1977, Priest and Hudson, 1981, Kulatilake et al., 1993), 음지수분포(Baecher et al., 1977, Priest and Hudson, 1981, Kulatilake et al., 1993) 그리고 멱함수분포(Hatton et al., 1994, Cladouhos and Marrett, 1996)에 적합하다는 연구결과가 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5(b)과 같이 불연속면의 크기에 대한 분포를 음지수분포(Negative Exponential Distribution)로 가정하여 3차원 불연속균열망을 구성하였다.

### 3. 민감도 분석 결과

#### 3.1 3차원 불연속 균열암반 모델링 프로그램

미국의 Golder Associates사의 FracMan은 3차원 불연속균열망을 기반으로, 광산에서는 광획분락법(block caving)현장에서 더 정확한 분락과정을 예측하고(Rogers et al., 2015), 석유 및 비전통에너지 분야(Dershowitz et al., 2011, Cottrell, 2012), 지하공간 개발(Fox et al., 2007, Lim et al., 2011) 등의 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 국내에서도 불연속균열망을 이용한 수리해석을 위해서 많은 연구자들에 의해서 사용되고 있는 코드이다 (이영훈, 1999, 박정균, 2012, 김동휘, 2013).

FracMan은 불연속암반의 균열망에 대한 자료 분석(Discrete feature data analysis), 지질 모델링(Geologic

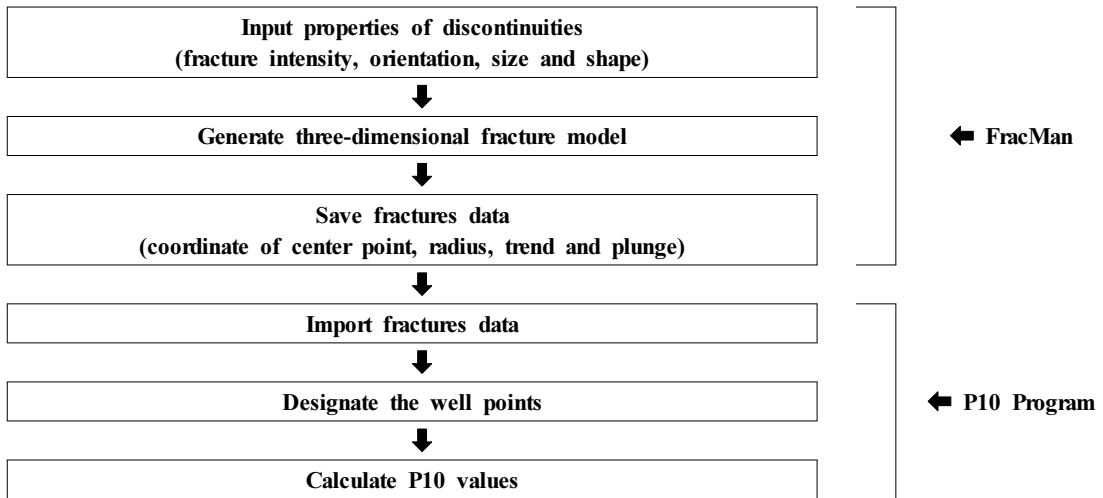


Fig. 6. The flow chart of fracture intensity (P10) calculation

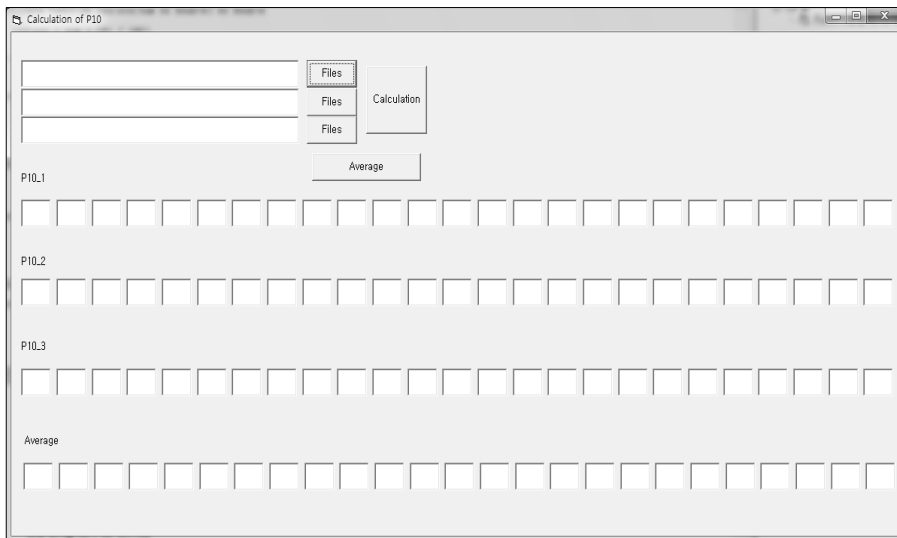


Fig. 7. 1D-fracture intensity (P10) calculation program

modeling), 지하수 흐름(Flow) 등 통합적인 분석도구를 제공한다. 실제 현장에서 획득한 균열자료를 바탕으로 통계기법을 활용하여서 실제 암반을 모델링할 수 있도록 한다. FracMan에서는 불연속면의 방향, 크기 등의 불연속면의 특성인자에 관한 다양한 분포모델을 지원하고 있다. 불연속면의 방향에 관한 대표적인 분포모델로는 Fisher 분포, Bingham 분포, 정규분포 등이 있고, 불연속면의 크기와 모양에 관한 분포모델로는 정규분포, 지수분포, 대수정규분포, 균일분포 등이 있다.

본 연구의 절차는 Fig. 6과 같이 FracMan을 통해 3차원 불연속균열망을 생성하고, 생성된 각각의 불연속면

들의 좌표(x, y, z), 방향성(선주향/선경사), 크기 등의 불연속면의 특성에 관한 데이터를 직접 코딩하여 만든 프로그램에 불러와서 선형밀도( $P_{10}$ )를 구하게 된다.

FracMan에는 선형밀도를 계산할 수 있는 기능이 내장되어 있으나 다수의 지역에서 선형밀도를 구하고, 민감도 분석에 필요한 많은 양의 데이터를 효율적으로 처리하기 위해서 Fig. 7과 같이 Visual Basic 언어를 이용하여 선형밀도 계산프로그램을 직접 개발하였다.

3차원 불연속균열망에서 수직정(vertical well)과 수평정(horizontal well)에 교차하는 불연속면들을 찾고, 선형밀도를 계산하는 알고리즘의 원리는 다음과 같다.

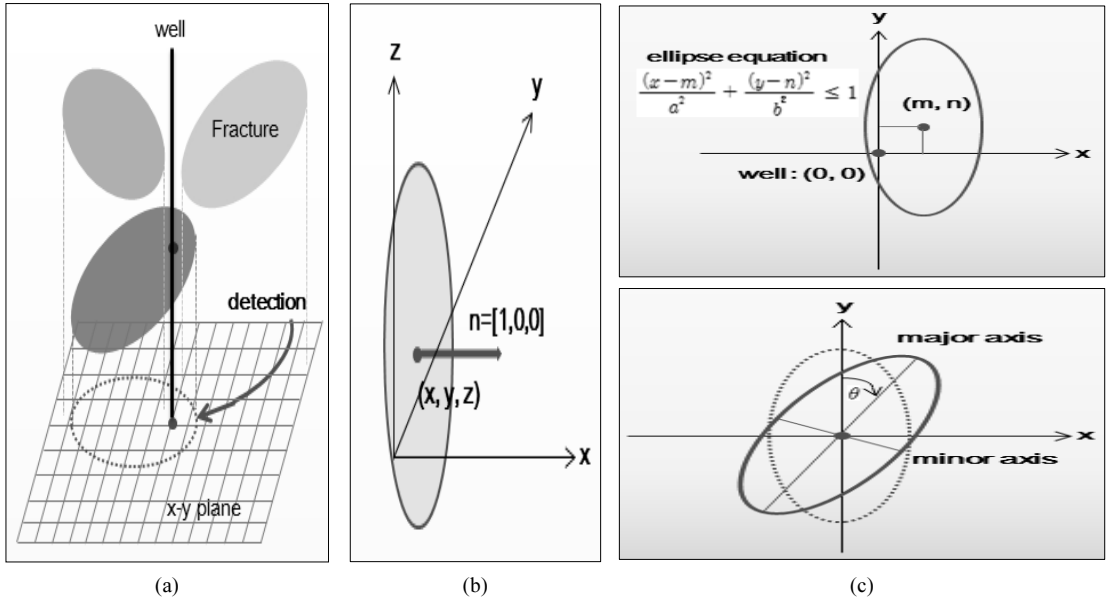


Fig. 8. Procedure of calculation of P10

Fig. 8(a)와 같이 3차원 공간상에 위치하는 다양한 불연속면들 중에서 xy평면의 특정 위치에서 수직으로 내린 z축에 교차하는 불연속면을 찾기 위해서는 우선 불연속면들을 xy평면에 투영시키는 과정이 필요하다. FracMan을 통해 생성된 불연속면은 반지름이 r을 갖는 원형으로서, xy평면에 투영시킬 경우에는 타원형이 된다. 따라서 이 투영된 타원 안에 수직정의 x, y좌표가 위치하는지 여부를 통해 교차하는 불연속면을 찾게 된다.

3차원의 불연속면을 xy평면에 투영시키기 위해서는 Fig. 8(b)처럼 불연속면의 선주향과 선경사의 각도가 0° 일 때의 법선벡터[1,0,0]에 각 불연속면의 선주향과 선경사의 값을 식 (3)의 회전변환 행렬을 이용하여 곱해 주게 된다. 여기서 선주향은 z축, 선경사는 y축 회전변환 행렬에 해당한다.

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\text{trend}) & \sin(\text{trend}) & 0 \\ -\sin(\text{trend}) & \cos(\text{trend}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\text{plunge}) & 0 & \sin(\text{plunge}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\text{plunge}) & 0 & \cos(\text{plunge}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

회전 변환된 불연속면의 법선벡터의 좌표를 이용하여

Fig. 8(c)에서의 타원의 장축(major axis), 타원의 단축(minor axis) 그리고 타원의 장축과 y축과 이루는 각도 ( $\theta$ )를 구하게 된다. xy평면에 투영된 각도  $\theta$ 만큼 틀어진 타원을 식(4)의 회전변환 행렬을 이용하여, 장축이 y축이고 단축이 x축인 타원의 방정식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (4)$$

최종적으로 xy평면에 내린 z축에 교차여부를 판단하기 위해서는 이 타원의 방정식에 수직정의 x, y좌표를 대입하여 식 (5)를 만족하는 불연속면들을 찾고, z축의 길이로 나누어 선형밀도를 계산하게 된다.

$$\frac{(x-m)^2}{a^2} + \frac{(y-n)^2}{b^2} \leq 1$$

$$\frac{(\cos(\text{Trend})(x-m) - \sin(\text{Trend})(y-n))^2}{(r \sin(\text{Plunge}))^2} + \frac{(\sin(\text{Trend})(x-m) + \cos(\text{Trend})(y-n))^2}{r^2} \leq 1 \quad (5)$$

여기서  $x, y$ 는 수직정의 위치,  $m, n$ 은 각 불연속면의  $xy$ 평면에서의 좌표,  $r$ 은 불연속면의 반지름을 의미한다.

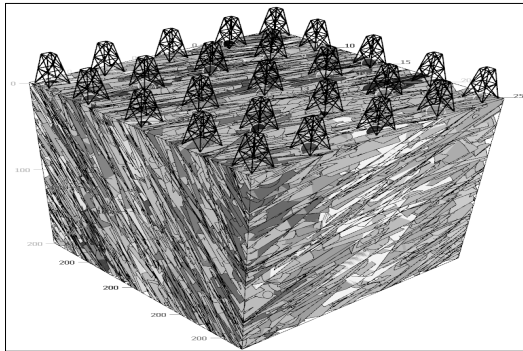
**3.2 민감도 분석을 위한 해석영역 및 입력정수**

3차원 불연속균열망에서 불연속면의 밀도와 균열인자 간의 상관관계 및 불연속면의 밀도에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 도출하고자 민감도 분석을 실시하였다. FracMan을 통해 생성된 3차원 불연속균열망은 통계적인 방법에 의해서 생성된다. 따라서 입력정수의 크기나 분포를 동일하게 설정하여 모델을 생성한다고 하여도, 각각의 모델들은 동일하지 않다. 그러므로 민감도 분석의 신뢰를 높이고자 동일한 입력값에 대해 3가지 불연속균열망 모델을 생성하였고, 각 모델에 Fig. 9와 같이

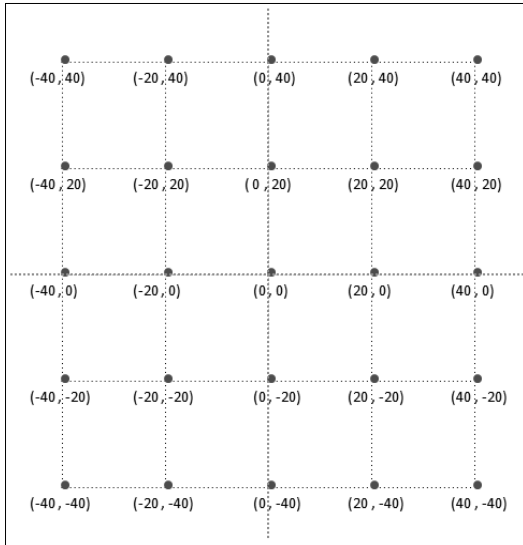
$z$ 축으로 총 25개의 가상의 수직정을 내려서 각 위치의 선형밀도를 산출하였다. 즉, 민감도분석에 사용되는 데이터는 75개의 수직정에서(3가지 불연속균열망 모델  $\times$  25개의 가상의 수직정) 얻은 선형밀도의 산술평균을 이용하였다.

모델의 해석영역은  $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 의 영역으로 설정하였고, 해석영역에 생성되는 3차원 불연속균열망의 체적밀도( $P_{32}$ )를 0.5, 1.0, 1.5로 변화를 주어 각각을 전수 분석하였다. 이는 체적밀도의 변화에 따른 불연속면의 밀도와 각 인자 간의 관계에 대한 동일성 여부를 확인하기 위함이다.

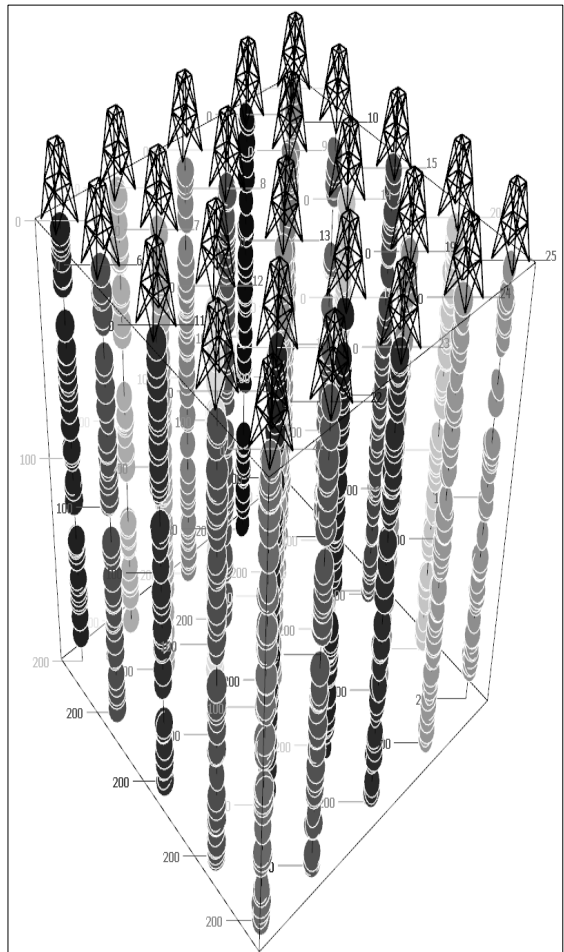
불연속면의 모양과 크기는 불연속면의 밀도에 영향이 미미하다는 것을 확인하였다(3.3절 참조). 따라서 불연



(a) Generating 3D DFN model



(b) Location of the sampling points



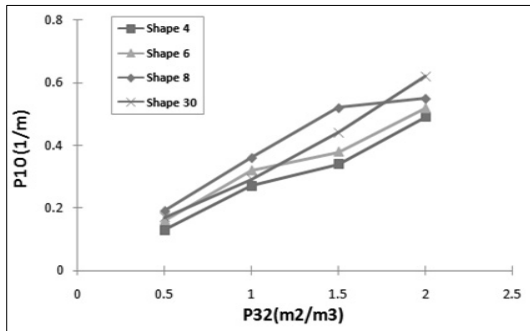
(c) Sampling P10

**Fig. 9.** DFN model generation of 25 sampling points in  $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$  modeling region

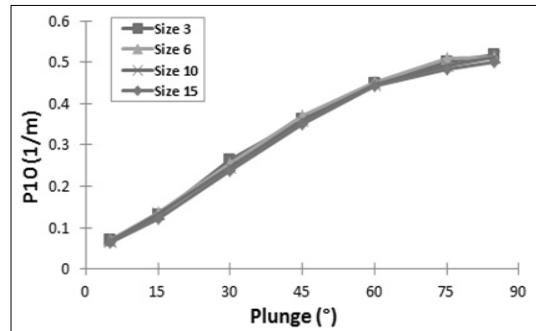


**Table 2.** Input data for 3D Discrete Fracture Network model generation

Parameter		Input data		
Region size		100 m × 100 m × 100 m		
Fracture data		Case-1	Case-2	Case-3
Intensity (P32)		0.5	1	1.5
Orientation	Trend	10°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180° (7cases)		
	Plunge	5°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 85° (7cases)		
	Distribution	Fisher-distribution		
	Dispersion (Fisher K)	50		
Shape		Circular shape		
Size		3 m		
Size Distribution		Exponential-distribution		



(a) P10 value comparison according to fracture shape changes



(b) P10 value comparison according to fracture size changes

**Fig. 10.** Relationship between fracture intensity and parameters of discontinuity (shape and size)

속면의 모양은 원형, 불연속면의 크기는 3 m(반지름)로 설정하였다. 불연속면의 방향성 인자인 선주향은 10°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°씩 7가지, 선경사는 5°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 85°씩 7가지를 택하여 3차원 불연속균열망을 생성한 뒤 불연속면의 밀도에 영향을 미치는 인자를 도출하고, 그 상관관계를 분석하였다 (Table 2 참조).

### 3.3 불연속면의 모양 및 크기

#### 3.3.1 불연속면의 모양

3차원 불연속균열망에서 불연속면의 모양이 불연속면의 밀도에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 불연속면의 모양은 4각형(shape 4), 6각형(shape 6), 8각형(shape 8) 그리고 원에 가까운 30각형(shape 30)으로 총 4가지 경우에 대해서 비교하였다.

Fig. 10(a)는 체적밀도가 커질수록 선형밀도가 증가하는 동일한 경향을 나타낸다. 체적밀도가 증가할수록 불연속면의 수가 매우 많아지므로, 선형밀도의 편차가 다소 커지는 경향을 확인할 수 있다. 하지만 그 편차는 미미한 수준이고, 30각형에서 직선적인 증가 양상을 보임에 따라서 본 연구에서는 3차원 불연속균열망에서 불연속면의 모양을 원형의 형태로 설정하여 민감도 분석을 진행하였다.

#### 3.3.2 불연속면의 크기

불연속면의 크기가 불연속면의 밀도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 단층과 같은 매우 큰 불연속면을 제외한다면 실제 암반에서 수십 미터의 크기를 갖는 절리들은 미미할 것으로 판단하였다. 따라서 반지름의 평균이 각각 3 m, 6 m, 10 m, 15 m까지 총 4가지 경우에 대해서 비교를 실시하였고, 불연속면의 크기에 대한 분

포는 2.5절에서 이미 언급한 바와 같이 실제 암반에 적합한 음지수분포로 설정하여 분석을 실시하였다.

Fig. 10(b)는 불연속면의 모양은 원형, 체적밀도는 0.5, 불연속면의 선주향은 10°로 고정된 뒤에, 선경사가 5° ~ 85°인 구간에서 반지름의 평균이 3 m, 6 m, 10 m, 15 m인 경우를 분석한 결과이다. 그 결과는 모든 불연속면의 크기에서 동일한 경향과 그 값들의 차이를 알 수 있다. 따라서 불연속면의 크기는 불연속면의 밀도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 3차원 불연속균열망에서 불연속면의 크기에 대한 분포를 음지수분포로, 반지름의 평균을 3 m로 구성하여 민감도 분석을 진행하였다.

### 3.4 불연속면의 방향성

#### 3.4.1 불연속면의 방향성(선주향)

불연속면의 방향성을 나타내는 인자 중의 하나인 선주향과 선형밀도의 관계를 분석한 결과는 Fig. 11, Fig. 12과 같다. 체적밀도의 변화에 따른 관계의 동일성 여부와 영향을 알아보기 위해서 체적밀도가 0.5, 1.0, 1.5일 때의 결과도 함께 분석하였다.

Fig. 11은 xy평면에 z축 방향으로 가상의 수직선을 내린 경우의 결과이다. 선주향과 선형밀도의 관계는 선경사의 모든 해석구간(plunge 5° ~ 85°)에서 동일한 경향을 나타내었다. 즉, 불연속면의 선주향은 선형밀도에 영향을 거의 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 체적밀도가 0.5, 1.0, 1.5인 경우에도 모두 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 yz평면에 x축 방향으로 가상의 수평선을 그을 경우에서 선형밀도를 구한 결과이다. 선주향과 선형밀도의 관계는 선경사가 5° ~ 75°구간에서 동일한 경향을 보였다. 하지만 xy평면에 z축 방향으로 가상의 수직선을 내린 결과와 달리 선주향의 방향에 따라 선형밀도가 영향을 받는다.

선주향이 90°를 기준으로 선주향이 90°로 갈수록 선형밀도가 작아지고, 선주향이 180°로 갈수록 선형밀도가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 선경사가 85°일 경우에는 선형밀도가 선주향에 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 이는 선경사의 값이 증가할수록 선주향의 각 구간에서의 선형밀도의 편차가 줄어들기 때문이다.

yz평면에 수직방향으로 선형밀도를 계산한 경우에서도 체적밀도가 커질수록 단지 선형밀도의 최댓값과 최솟값의 편차만 크게 나타났을 뿐 모두 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.4.2 불연속면의 방향성(선경사)

불연속면의 방향성을 나타내는 또 다른 인자인 선경사와 선형밀도의 관계를 분석한 결과는 Fig. 13, Fig. 14와 같다. 체적밀도의 변화에 따른 두 인자 간 관계의 동일성 여부와 영향을 알아보기 위해서 체적밀도가 각각 0.5, 1.0, 1.5일 때의 결과를 함께 분석하였다.

Fig. 13은 xy평면에 z축 방향으로 가상의 수직선을 내린 경우에서의 구한 결과이다. 선경사와 선형밀도와의 관계는 선주향의 모든 구간(10° ~ 180°)에서 선경사의 각도가 커질수록 선형밀도가 증가하는 경향을 보였다. 또한 체적밀도가 0.5, 1.0, 1.5인 경우에도 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 xy평면에 수직으로 시추할 경우에, 선경사의 방향에 따라 선형밀도가 영향을 받는다.

Fig. 14는 yz평면에 x축 방향으로 수평시추일 때 선형밀도를 구한 결과이다. 선경사와 선형밀도의 관계는 선주향의 각도가 90°일 경우를 제외하고 선주향의 모든 구간에서 선경사의 값이 증가할수록 선형밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 체적밀도가 0.5, 1.0, 1.5인 경우에도 모두 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 yz평면에 수평시추를 할 경우에, 불연속면의 선경사의 방향은 선형밀도에 영향을 준다.

### 3.5 선형밀도(P10)의 환산인자

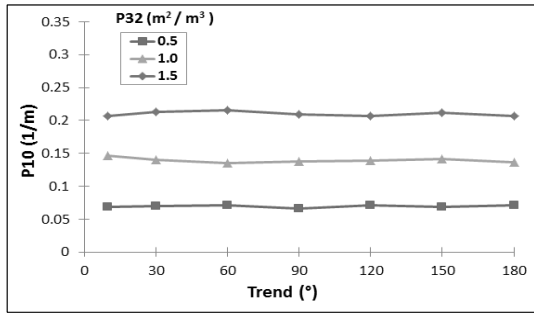
실제 암반에서의 노두조사를 통해서 3차원 불연속균열망을 모사하게 된다. 3차원 불연속암반을 모델링하기 위해서는 체적밀도를 필요로 하는데, 실제 현장에서의 체적밀도의 측정은 매우 어렵다. 따라서 1차원의 노두조사 데이터를 바탕으로 선형밀도를 계산하여, 식 (6)과 같이 선형밀도에 환산인자( $C_{13}$ )를 곱하여 체적밀도를 계산한다(Wang, 2005).

$$P_{32} = C_{13} P_{10}, \quad C_{13} = \left[ \int_0^\pi |\cos \alpha| f_A(\alpha) d\alpha \right]^{-1} \quad (6)$$

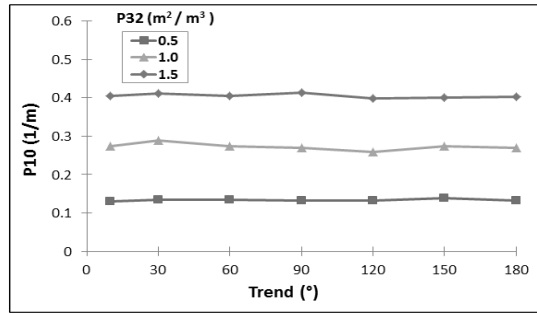
여기서  $C_{13}$ 은  $P_{10}$ 의 환산인자이며,  $\alpha$ 는 조사선과 불연속면의 법선벡터 간의 입체각도이다.

$$f_A(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{R_k} \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\sin^2 \delta \sin^2 \rho - (\cos \alpha - \cos \delta \cos \rho)^2}} \frac{ke^{k \cos \delta} \sin \delta}{e^k - e^{-k}} d\delta \quad (7)$$

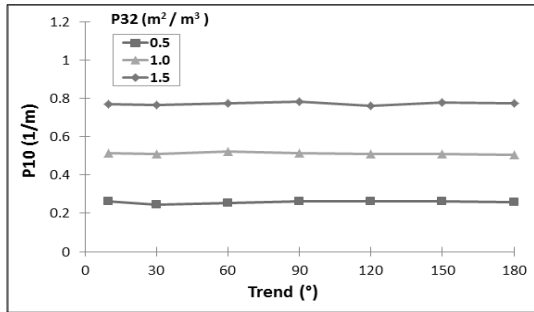
여기서  $k$ 는 Fisher 상수,  $\alpha$ 는 조사선과 불연속면의 법선벡터 간 입체각도,  $\delta$ 는 불연속면의 법선벡터와 Fisher 분포의 평균 극점벡터간의 입체각도,  $\rho$ 는 Fisher



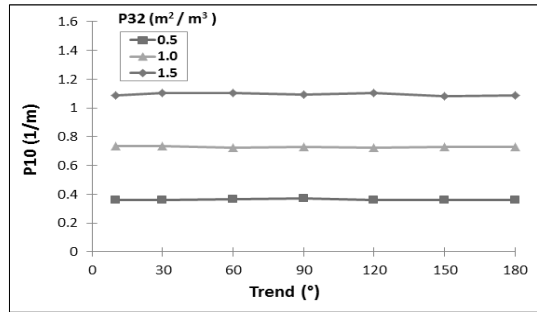
(a) plunge = 5°



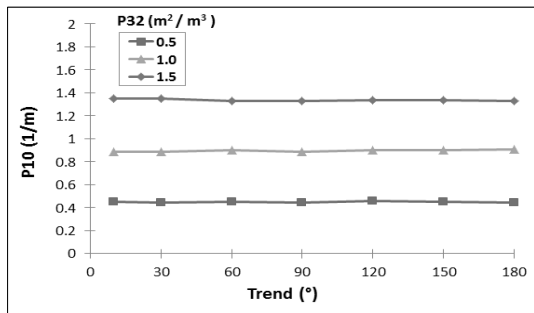
(b) plunge = 15°



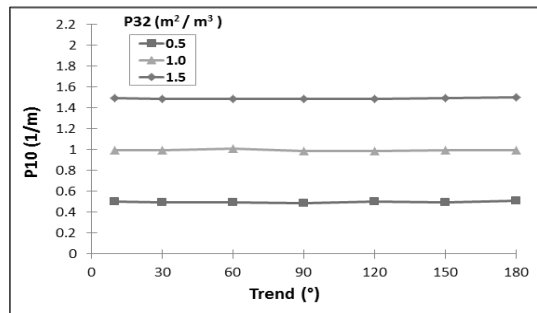
(c) plunge = 30°



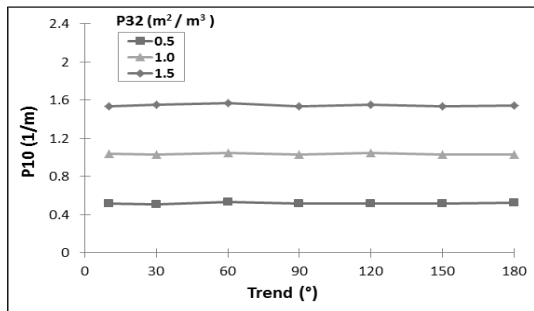
(d) plunge = 45°



(e) plunge = 60°

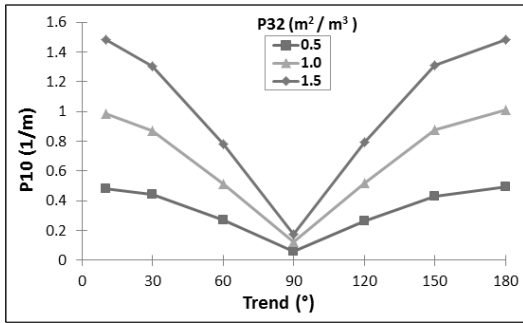


(f) plunge = 75°

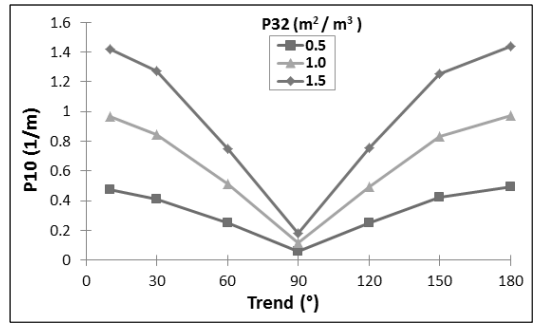


(g) plunge = 85°

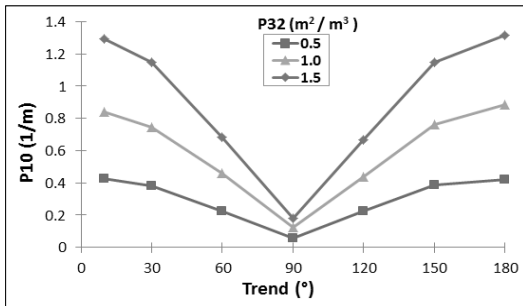
Fig. 11. Relationship between P10 and trend with variation of P32 in xy-plane



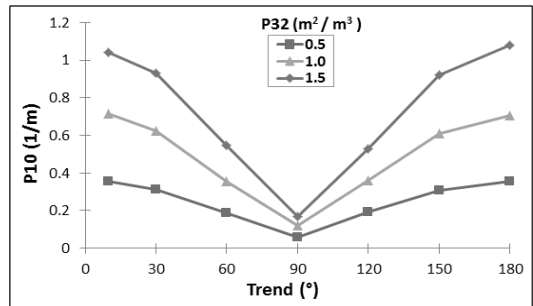
(a) plunge = 5°



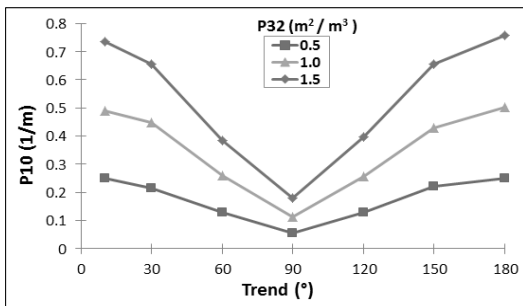
(b) plunge = 15°



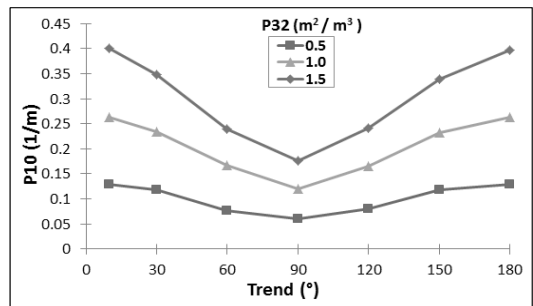
(c) plunge = 30°



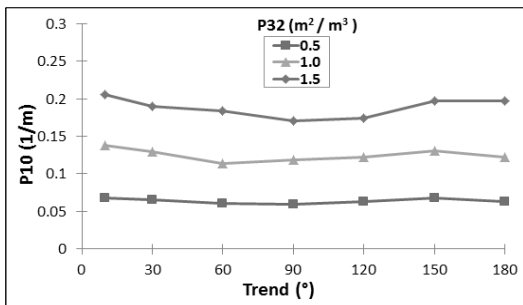
(d) plunge = 45°



(e) plunge = 60°

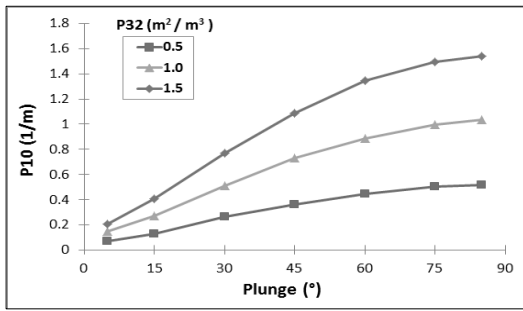


(f) plunge = 75°

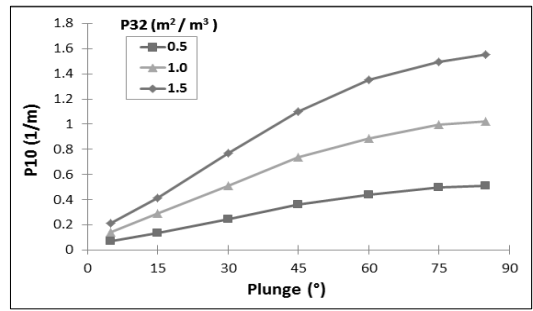


(g) plunge = 85°

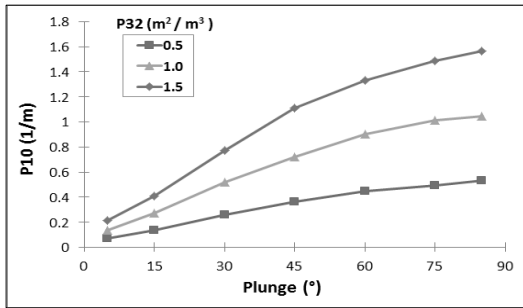
Fig. 12. Relationship between P10 and trend with variation of P32 in yz-plane



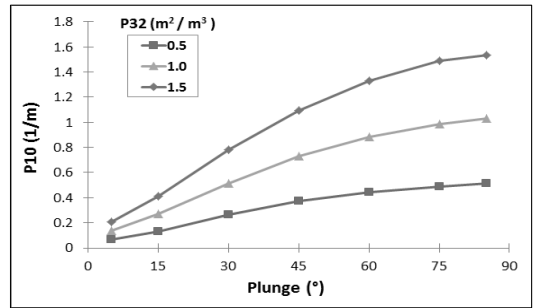
(a) Trend = 10°



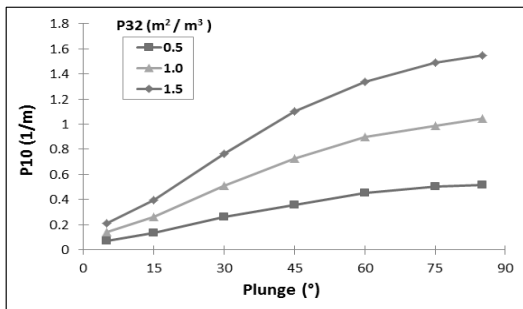
(b) Trend = 30°



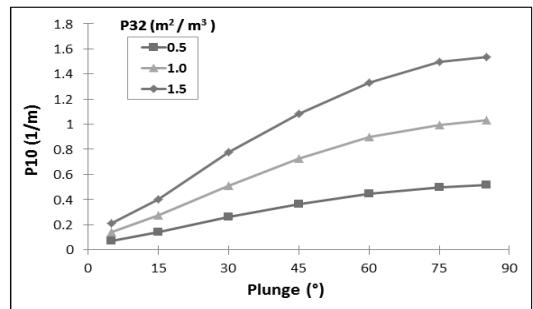
(c) Trend = 60°



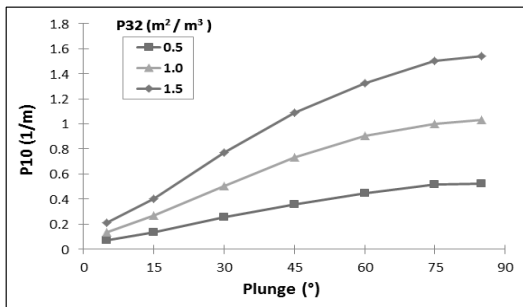
(d) Trend = 90°



(e) Trend = 120°

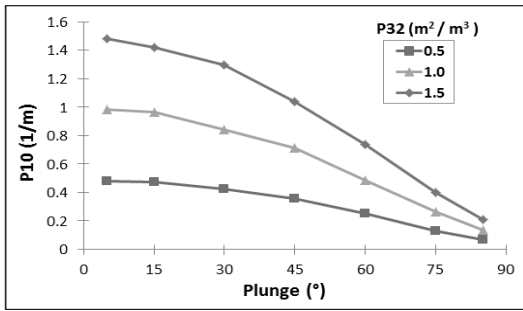


(f) Trend = 150°

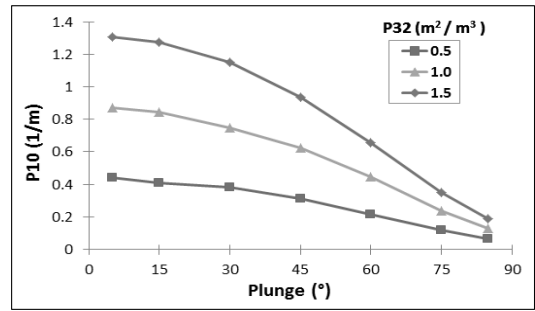


(g) Trend = 180°

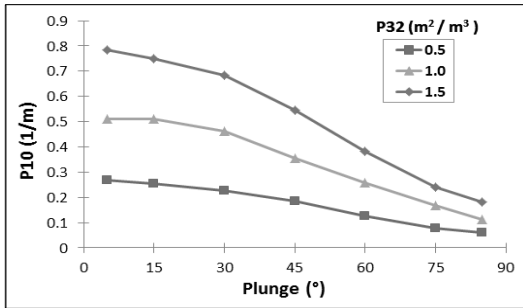
Fig. 13. Relationship between P10 and plunge with variation of P32 in xy-plane



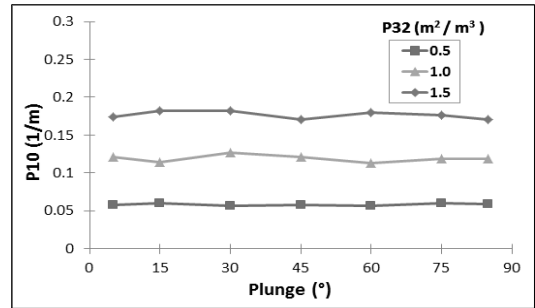
(a) Trend = 10°



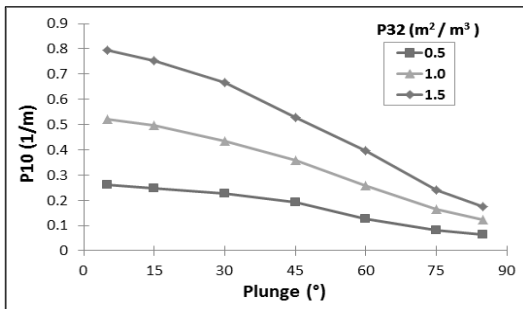
(b) Trend = 30°



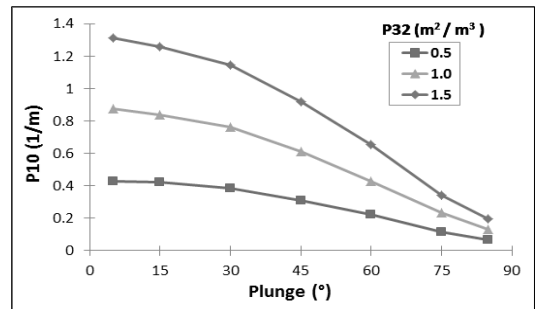
(c) Trend = 60°



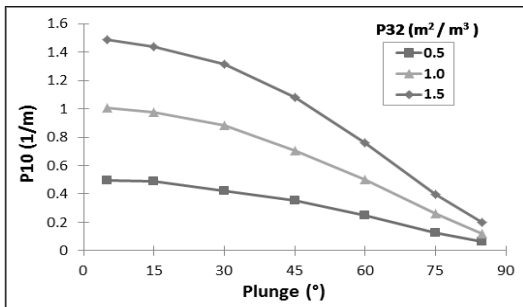
(d) Trend = 90°



(e) Trend = 120°



(f) Trend = 150°



(g) Trend = 180°

Fig. 14. Relationship between P10 and plunge with variation of P32 in xy-plane

**Table 3.** Conversion factor (C13) for P10 in case of vertical well

Fracture orientation distribution : Fisher-distribution, Dispersion(K) : 50 Fracture size : 3 m,  
distribution : Exponential-distribution

trend plunge	10°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
5°	0.070923	0.070897	0.07122	0.072909	0.071322	0.071442	0.071685
15°	0.037279	0.036188	0.036849	0.03697	0.038001	0.036703	0.037371
30°	0.019333	0.019845	0.019369	0.019211	0.019452	0.019356	0.019556
45°	0.013744	0.01371	0.013689	0.013643	0.013779	0.013828	0.013791
60°	0.011194	0.011253	0.011183	0.011286	0.011115	0.011187	0.011196
75°	0.010027	0.010041	0.010038	0.010134	0.010055	0.01004	0.009901
85°	0.009698	0.009736	0.009512	0.009756	0.009666	0.009743	0.009669

**Table 4.** Conversion factor (C13) for P10 in case of horizontal well

Fracture orientation distribution : Fisher-distribution, Dispersion(K) : 50 Fracture size : 3 m,  
distribution : Exponential-distribution

trend plunge	10°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
5°	0.010223	0.011447	0.019128	0.085316	0.019036	0.011483	0.010028
15°	0.010497	0.011937	0.019763	0.084518	0.020077	0.011895	0.010285
30°	0.011748	0.013203	0.021917	0.083179	0.022536	0.013066	0.011552
45°	0.014192	0.016039	0.027484	0.0855	0.027475	0.016285	0.01403
60°	0.020301	0.022828	0.038907	0.087053	0.038612	0.022892	0.019869
75°	0.038114	0.042733	0.062681	0.084038	0.061938	0.043245	0.03822
85°	0.07303	0.077641	0.084028	0.085667	0.082596	0.075292	0.079083

분포의 평균 극점벡터와 조사선과의 입체각도이다.  $\alpha$ 가  $|\delta - \rho| < \alpha < \delta + \rho$ 이므로  $R_\theta$ 는  $\alpha < \rho$ 에서는  $R_\theta = [\rho - \alpha, \rho + \alpha]$  이고,  $\alpha > \rho$ 에서는  $R_\theta = [0, \alpha + \rho]$  이다.

앞서 민감도 분석에 사용된 데이터를 통해 불연속면의 방향성이 특정한 조건일 때의 선형밀도의 환산인자를 도출하였다. 선형밀도의 환산인자를 계산하는 과정은 불연속면의 방향성을 나타내는 선주향을 10°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180° 그리고 선경사를 5°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 85°로 일정하게 고정시킨 뒤에 각 경우에서 체적밀도가 0.5, 1.0, 1.5에 해당하는 3차원 불연속균열망을 생성시킨 이후에 각 균열망의 선형밀도를 계산하였다. 즉, 체적밀도를 고정시켜 선형밀도를 역으로 구하였고,  $P_{32} = C_{13} P_{10}$ 의 상관관계를 이용하여 선형밀도의 환산인자를 계산하였다.

Table 3과 Table 4는 일정한 선주향과 선경사일 때의 수직, 수평에 관한 선형밀도의 환산인자를 도출한 것이다. 도출된 결과는 불연속면의 크기에 대한 분포가 음

지수분포로, 평균크기가 3 m에 대한 환산인자를 나타낸 것이다. 하지만 식 (6)과 3.3.2절에서 살펴본 것처럼 불연속면의 크기는 불연속면의 밀도에 큰 영향을 미치지 않는다는 결과로부터, 본 연구에서 도출된 선형밀도의 환산인자는 다른 불연속면의 크기에도 활용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 불연속균열망(3D DFN)에서의 불연속면의 특성인자 간의 상관관계를 분석하고, 불연속면의 밀도(fracture intensity)에 영향을 미치는 인자를 규명하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 또한 수직 및 수평시추일 경우에서, 체적밀도( $P_{32}$ )값을 계산하기 위한 선형밀도( $P_{10}$ )의 환산인자( $C_{13}$ )를 도출하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 3차원 불연속균열망에서 불연속면의 밀도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 불연속면의 방향성임을 확인하였다. 수직시추 경우에는 선주향에 대한 영향은 미미하였고, 선경사의 각도가 커질수록 불연속면의 밀도가 증가하는 것을 확인하였다. 수평시추 경우에서의 불연속면의 밀도는 선주향과 선경사에 큰 영향을 받았다. 또한 체적밀도의 값의 변화에 따른 불연속면의 밀도와 방향성과의 상관관계의 동일성 여부를 확인하기 위해, 체적밀도의 크기를 각각 0.5, 1.0, 1.5로 불연속균열망을 구성하였다. 그 결과, 모든 체적밀도에서 동일한 경향성이 나타났다.
2. 불연속면의 모양을 사각형, 육각형, 팔각형, 원으로 가정했을 때, 각 조건에서의 불연속면의 밀도의 차이는 크지 않았다. 따라서 불연속면의 모양은 불연속면의 밀도에 큰 영향을 끼치지 않는 것을 확인하였다.
3. 불연속면의 크기가 3 m, 6 m, 10 m, 15 m일 경우에서 불연속면의 크기와 불연속면의 밀도와의 관계를 분석한 결과는, 불연속면의 크기는 불연속면의 밀도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 확인하였다.
4. 불연속면의 밀도에 가장 큰 영향을 미치는 불연속면의 방향의 값을 일정하게 변화시킨 후에, 불연속면의 선형밀도에 대한 수직 및 수평공의 환산인자를 도출하였다. 환산인자를 활용하여 1차원의 노두자료로부터 계산된 선형밀도로부터 체적밀도를 예측하는 데 활용할 수 있으며, 또한 수평공 구간의 불연속면 특성을 이해하고, 모사하는 작업을 위한 기초자료로서 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 결과는 3차원 불연속균열망을 구성하고 이해하는 데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구에서는 수직 및 수평 시추일 경우에서의 불연속면의 특성인자 간의 관계에 대해 알아보았으나, 다양한 시추 각도에 따른 불연속면의 특성인자 간의 관계에 대한 추가 연구가 향후 필요하겠다. 향후 연구로는 FLAC3D 코드를 이용하여 3차원 불연속균열망을 기반으로 불연속암반의 수리-역학적 연동해석을 실시할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 미국의 Golder Associates사의 임두현 박사님의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Alexander, T., Baihly, J., Boyer, C., Waters, G., Clark, B., Jochen, V., Calvez, J. L., Lewis, R., Miller, C. K., Thaeler, J., and Toelle, B. E., 2011, Shale Gas Revolution, Oilfield Review, No.3, pp. 40-55.
2. Baecher, G. B., Lanney, N. A., and Einstein, H. H., 1977, statistical description of rock properties and sampling. Proceedings, the 18th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), pp. 5C1\_1-5C1\_8.
3. Cladouhos, T. T., and Marrett, R., 1996, Are fault growth and linkage models consistent with power-law distributions of fault length?, J. struct. Geol. 18, pp. 281-293.
4. Cottrell, M. G., "Keynote Presentation: Managing The Environmental Risk and Financial Gain Associated with Shale Gas Hydraulic Fracturing using a Discrete Fracture Network Approach", IWA World Congress on Water, Climate and Energy, presentation Dublin Ireland, May 2012.
5. Dershowitz, William S., Ambrose, R., Lim, D. H., and Cottrell, M. G., 2011, Hydraulic Fracture and Natural Fracture Simulation for Improved Shale Gas Development, American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Annual Conference and Exhibition, Houston, United States.
6. Dershowitz, William S., and Herda, H. H., 1992, Interpretation of fracture spacing and intensity, Rock mechanics, pp. 757-766.
7. Einstein, H. H., and Baecher, G. B., 1983, Probabilistic and statistical methods in engineering geology, specific methods and examples, part 1: exploration. In: Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 16, pp. 39-72.
8. Fisher, R., 1953, Dispersion on a sphere, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 217, No. 1130.
9. Fox, A., La Pointe, P., Hermanson, J., and Ohman, J., 2007, Statistical geological discrete fracture network model. Forsmark modeling stage 2.2. Report R-07-46, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Stockholm, Sweden.
10. Hatton, C. G., Main, I. G., and Meredith, P. G., 1994, Non-universal scaling of fracture length and opening displacement. Nature 356, pp. 160-162.
11. Jing, L. and Stephansson, O., 2007, Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications, Elsevier, pp. 158.
12. Kim, D. H., 2013, A Study on the Hydrogeological Modelling of the Rockmass of a Limestone Mine, M.S. Dissertation, Kangwon National University.
13. Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N., and Stephansson, O., 1993, Stochastic three dimensional joint size, intensity and system modelling and a validation to an area in stripa Mine, sweden. Soils Found. 33, pp. 55-70.
14. Kwon, S. K., Lee, C. S., Yoon, C. H., Jeon, S. W., and Cho, W. J., 2011, Borehole Heater Test at KAERI



- Underground Research Tunnel, Tunnel and underground space, Vol. 21, No. 3, pp. 225-234.
15. Lee, Y. H., Shin, H. J., Kim, K. I., and Sim, T. M., 1999, Characterization of Fracture System for Comprehensive Safety Evaluation of Radioactive Waste Disposal Site in Subsurface Rockmass, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, Vol.6, No.3, pp. 111-119.
  16. Lim, D. H., Kim, J. Y., and Park, J. W., 2011, Multiple-Silo Performance Assessment Model for the Wolsong LILW Disposal Facility in Korea - PHASE I: Model development, J. of the Korean Radioactive Waste Society, 9 (2).
  17. Long, J. C. S., Karasaki, K., Davey, A., Peterson, J., Landsfeld, M., Kemeny, J., and Martel, S., 1991, "An Inverse Approach to the Construction of Fracture Hydrology Models Conditioned by Geophysical Data: An Example from the Validation Exercises at Stripa Mine." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 28, No. 2, pp. 121-142.
  18. Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R., and Witherspoon, P. A., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resource Research, 18.3, pp. 645-658.
  19. Min, K. B., and O. Stephansson, 2011, The DFN-DEM Approach Applied to investigate the Effects of Stress on Mechanical and Hydraulic Rock Mass Properties at Forsmark, Sweden, Tunnel and underground space, Vol. 21, No. 2, pp. 117-127.
  20. Nelson, R. A., 2001, Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs, 2nd Ed., Gulf Professional Publishing, Boston, USA.
  21. Noh, Y. H., Choi, Y. S., Um, J. G., and Hwang, S. Y., 2013, Development of the 3-D Fracture Network Analysis and Visualization Software Modules, Tunnel and underground space, Vol. 23, No. 4, pp. 261-270.
  22. Park, C. K., Lee, J. K., Baik, M. H., Lee, Y. M., Ko, N. Y., and Jeong, J. T., 2012, Production and Application of Domestic Input Data for Safety Assessment of Disposal, Journal of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 10, No. 3, pp. 161-170.
  23. Park, J. S., Ryu, D. W., Ryu, C. H., and Lee, C. I., 2007, Groundwater Flow Analysis around Hydraulic Excavation Damaged Zone, Tunnel and underground space, Vol. 17, No. 2, pp. 109-118.
  24. Priest, S. D., 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, London.
  25. Priest, S. D., and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. Int.J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. pp. 183-197.
  26. Rogers, S, Elmo, D., Webb, G., and Catalan, A., 2015, Volumetric Fracture Intensity Measurement for Improved Rock Mass Characterisation and Fragmentation Assessment in Block Caving Operations, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.48, Issue 2, pp. 633-649.
  27. Seo, J. W., 2009, Development of 3D DFN model with Rectangular fracture type, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol.46, No.3, pp. 279-288.
  28. Wang, X., 2005, Stereological interpretation of rock fracture traces on borehole walls and other cylindrical surfaces, Ph.D Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
  29. Warren, J. E., and Root, P. J., 1963, The behavior of naturally fractured reservoirs, Society of Petroleum Engineers journal, 3.03, pp. 245-255.

**박정찬**

2012년 인하대학교 토목공학과 공학사

Tel: 032-872-7551  
 E-mail: qwer9316@naver.com  
 현재 인하대학교 에너지자원공학과 석사  
 재학중

**박승훈**

2012년 조선대학교 에너지자원공학과  
 공학사  
 2014년 인하대학교 에너지자원공학과  
 공학석사

Tel: 032-872-7551  
 E-mail: wartrip@naver.com  
 현재 인하대학교 에너지자원공학과 박사  
 재학중

**김하영**2015년 인하대학교 에너지자원공학과  
공학사

Tel: 032-872-7551  
 E-mail: hy\_cool@naver.com  
 현재 인하대학교 에너지자원공학과 석사  
 재학중

**김건영**

Tel: 032-872-7551  
 E-mail: kimgy@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구원 책임연구원

**권상기**

1987년 서울대학교 자원공학과 공학사  
 1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사  
 1996년 University of Missouri-Rolla  
 Mining Eng. 공학박사

Tel: 032-860-7554  
 E-mail: kwonsk@inha.ac.kr  
 현재 인하대학교 에너지자원공학과 부  
 교수