

3차원 분리 균열망 모델링 시스템 개발

노재순, 박창협, 박희준, 장일식, 강주명
서울대학교 지구환경시스템공학부

Development of a 3D discrete fracture networks for topological modeling

Jaeseung Noh, Changhyup Park, Hui-june Park, Ilsik Jang, Joo-Myung Kang
School of Civil, Urban & Geosystems Engineering, Seoul National University

1. 서론

저류층에 균열이 발달해 있을 경우, 대부분의 유체 유동은 균열을 통해 이루어지게 된다. 이러한 특성 때문에 균열에서의 유체 유동 현상은 균열간의 연결성에 의해 결정된다. 기존의 다공성 매질을 기본 형태로 만들어진 저류층 모델링 기법인 3차원 연속체 모델은 균열간의 연결성에 비해 균열면과 다공성 매질의 유체투과율에 관심을 두고 개발된 형태이므로, 유동 분석에 한계를 지니고 있다. 또한, 2차원 분리 균열 모델의 경우, 연결성에 중점을 두어 연속체 모델의 한계를 극복했지만, 3차원에서 일어나는 유체 유동 현상을 표현할 수 없는 한계가 여전히 존재한다. 그러므로, 균열 저류층에서의 유체 유동을 적절히 모사하기 위해 3차원 분리 균열 모델을 사용한 모델링 시스템, SNUFRACS를 개발하였다.

SNUFRACS는 현장 적용성이 높은 대표적인 4가지 모델을 이용하여 균열군을 구성할 수 있다. 균열면의 형태를 원형으로 보고 균열의 중심, 길이, 밀도, 개수 등의 모델링 요소를 현장의 특정 분포에 근거하여 균열망을 재생하는 배처 모델(Baechal Model), 생성된 균열이 프랙탈 특성을 지닌다는 가정하에 개발된 Levy-Lee 프랙탈 모델(Levy-Lee Fractal Model), 모델링 요소들이 상호 독립적이지 않음에 기반한 지구통계학적 모델(Geostatistical Model), 균열의 형태를 다각형으로 가정한 다각형 모델(Polygon Model)이 있다.

각각의 모델에 의해 구성된 균열망에 대하여 연결성을 분석하여 사용자가 쉽게 접근할 수 있도록 OpenGL 프로그래밍을 통해 3차원 균열망을 시각화하였다. 또한, 모델링 요소들에 대한 히스토그램(Histogram)과 베리오그램(Variogram) 분석 결과를 출력할 수 있게 구성하였다.

2. 연구방법

2-1. 3차원 분리 균열 모델

(1) 배처 모델(Baecher model)

Baecher 등[1]이 제안한 Baecher 모델은 암석역학분야에 사용되어온 기본 분리 균열 모델이다. 균열은 원형판 또는 타원형 형태로 구성한다. 균열망 구성 시 필요한 입력 자료는 균열의 중심 위치, 길이, 방향성, 간극분포이다.

(2) Levy-Lee 프랙탈 모델(Levy-Lee Fractal model)

균열 저류층의 크기가 충분히 클 경우, 균열의 중심은 프랙탈 특성을 지닌다.[4] Levy-Lee 프랙탈 모델은 수학적으로 프랙탈 형태를 보이는 "Levy flight"의 과정에 의해서 균열을 생성한다. Levy flight의 수식은 (1)과 같다.

$$P_L(L' > L) = L^{-D} \quad (1)$$

여기서 $P_L(L' > L)$ 은 ($L' < L$)의 조건을 만족할 확률이고, L 은 도약거리(jump), L' 는 이전 도약거리(previous jump), D 는 프랙탈 차원(Fractal dimension)이다.

(3) 지구통계학적 모델(Geostatistical model)

지구통계학적 모델은 통계적인 균열자료를 독립적으로 사용하는 모델이 아닌 자료의 이방성과 자료 상호간의 연관관계를 고려한 모델이다. SGS(Sequential Gaussian Simulation)를 이용하여 균열 중심 분포와 균열 길이 분포에 이방성을 주었다.

① 균열중심의 이방성을 고려한 지구통계학적 모델

균열 중심 분포의 상호 연관성과 이방성을 고려하기 위해서 Parents-daughter 방법[2, 3]을 이용한다. 이 방법은 3차원 공간을 격자화한 후, 각각의 격자에 한정된 개수의 균열 중심을 분포시키는 방법이다. 균열 중심의 개수는 SGS에 따라 결정한다.

② 균열길이의 이방성을 고려한 지구통계학적 모델

균열간의 거리와 균열길이에 대한 베리오그램을 이용하여 SGS를 실시한다.

(4) 다각형 모델(Polygon model)

다각형 모델은 3차원 지하매질에 존재하는 균열의 형태는 복잡하고 다양한 형태를 지니고 있다는 사실에 착안하여 원에 내접하는 블록 다각형을 균열의 형태로 가정한 모델이다. SNUFRACS에서 다각형은 정 4,5,6각형을 가지거나, 불규칙한 블록다각형의 형태이다. 불규칙한 블록다각형(Fig. 1(a))을 구성하기 위해서 $0 \sim \pi/2$ 사이에서 균등분포를 따르는 임의의 수를 내각으로 정했다. 임의성으로 인해 꼭지점이 각 사분면내지 특정한 지역에 집중되는 현상을 방지하기 위해서 n각형의 임의의 내각은 $0 < \theta \leq \frac{2\pi}{n}$ 범위를 가지도록 하였다. 정 n각형의 경우 내각은 $\frac{2\pi}{n}$ 이다(Fig. 1(b)).

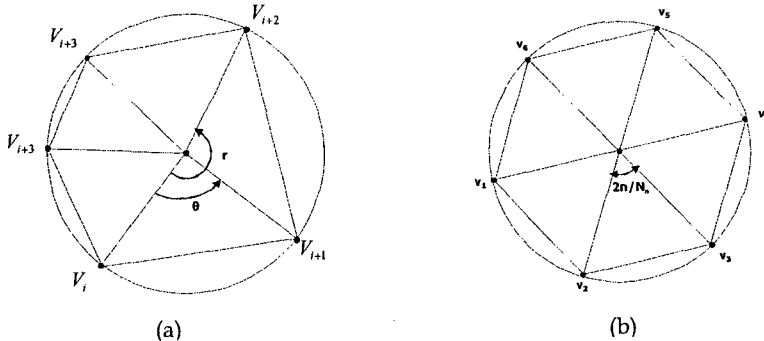


Fig. 1 다각형모델의 형태 (a) 불규칙 다각형, (b) 정내각 육각형

2-2. 3차원 균열의 연결성 분석

각각의 모델에 의해 균열면의 재생이 초기 입력 자료인 균열의 밀도 혹은 균열의 개수에 도달하게 되면 균열 재생을 마치게 된다. 균열 재생을 마치고 나면 각각의 균열들의 연결성을 파악하여 몇 개의 균열군으로 균열들을 나눈다.

(1) 두 개의 원형 균열면의 연결성 해석

우선, 두 원형 균열이 교차하기 위해서는 원의 반지름의 합이 원 중심 간의 거리보다 커야만 한다. 이 조건을 만족한다면, 두 개의 원형 균열의 교차여부를 결정하는 수학적 과정은 다음과 같다.

- ① 두 원형 균열을 포함하는 두 무한 평면이 만나는 교선을 구한다.
- ② 각각의 원형 균열과 교선의 교차 여부를 파악한다.
- ③ Fig. 2와 같이 두 균열이 교차할 때 나타날 수 있는 교차선분의 위치관계를 4가지 형태로 나누어 내적을 이용해 두 균열이 만나는 교차선분을 찾아낸다.

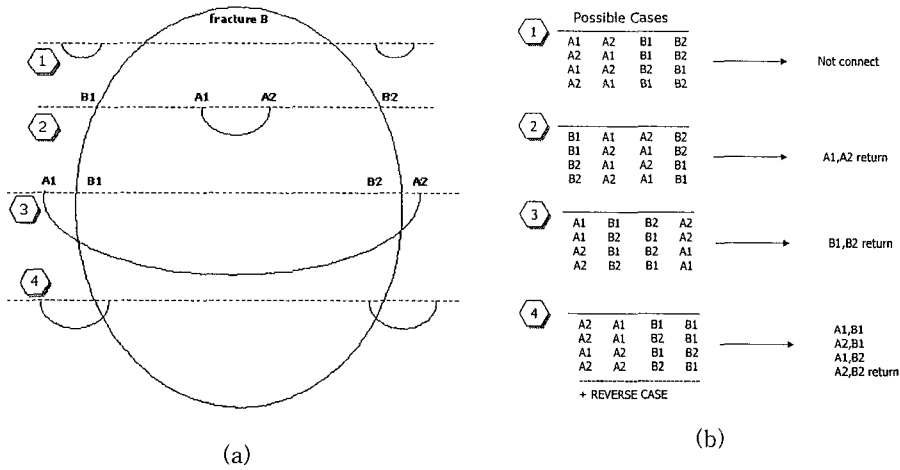


Fig. 2 (a) 균열 B와 교차하는 균열 A와 교선상의 상관관계, (b) 두 개의 원이 3차원 공간에서 교차하는 경우의 수와 반환 좌표

(2) 다각형(Polygon) 균열간의 연결성 해석

다각형 외접원의 연결성을 확보한 후, 교차선분과 다각형의 변이 만나는 점들을 추출한다. 이 점들은 다시 (1)의 ③과정을 수행하여 교차선분을 새롭게 도출한다.

(3) 유정과 균열간의 연결성 해석

원형 유정과 만나는 균열군을 확보하여 유정과 만나는 균열군을 추출한다. |

3. 시스템 개발 결과

개발된 모델의 검증을 위해 4가지 모델링 시스템을 사용하여 균열망을 재생해 보았다. Table 1은 모델의 자료 입력 자료를 나타낸 표이다. 균열망 자료는 3개의 다른 특성을 지니는 균열 집합으로 구성되어 있다. 시스템 크기는 $20 \times 20 \times 20(m^3)$ 이고 균열의 총 개수는 1570개, 프랙탈 차원은 2.75이며, 상관 길이(Correlation length)는 5로 하였다.

Fig. 3은 입력 자료를 통해 재생된 균열망의 3차원 그림이다. Fig. 3(a)에는 다양한 크기의 원형 균열이 무작위로 분포되는 배치 모델의 특징이 잘 나타난다. Fig. 3(b)는 불규칙 다각형들이 균열군을 이루며 구성되는 다각형 모델의 그림이다. Levy-Lee 프랙탈 모델은 도약거리의 한계가 비교적 작게 설정되어, Fig. 3(c)에서와 같이 시작점을 중심으로 균열군이 밀집되어 있는 형태가 나타난다. Fig. 3(d)에서는 SGS의 이방성으로 인해 균열이 밀집된 구역과 균열이 존재하지 않는 구역으로 구분되는 형태를 보여준다. Fig. 4는 3차원 균열 단면들의 길이 분포에 대한 히스토그램으로 로그-정규 분포(Log-normal distribution)의 입력값을 적절히 반영하고 있다. Fig. 5는 균열망과 교차하는 y축에 수직인 한 평면의 2차원 단면을 나타낸 그림이다. Fig. 5의 수직 평면에 의한 균열 단면도인 Fig. 6에서 평면 영역을 벗어나지 않고 올바르게 추적지도(trace map)가 구성되고 있음을 알 수 있다. Fig 7은 Fig. 6에 나타낸 2차원 단면의 균열 길이 분포 히스토그램이다. Table 2는 2차원 균열망의 길이에 대한 평균, 분산, 왜곡도 등의 통계적 변수 결과이다. 2차원 형태의 현장 균열자료의 입력에 대해 타당한 균열망이 생성되었음을 통계 자료를 통해 알 수 있다. Fig. 8은 2차원 균열망의 길이에 대한 베리오그램이다. 이 베리오그램에서 설정한 값과 동일한 상관 길이값을 가지는 분포로 균열의 길이 분포가 생성되었음을 알 수 있다. 이렇듯, 균열 구성의 특징과 형태 분포를 적절히 반영하면서, 통계 분석을 수행하는 통합 시스템을 개발하였다.

Table 1 균열 입력 자료

Input Item	Fracture Set		
	Set #1	Set #2	Set #3
Center	Possion		
Radius	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
Mean(m)	2.74	2.91	2.45
Variance	0.8	1.2	0.5
Orientation	Fisher	Fisher	Fisher
Trend(degree)	158.59	251.41	67.78
Plunge(degree)	90.47	87.20	15.58
Fisher Constant	9.95	7.46	7.17
Density(NF, %)	64	24	12

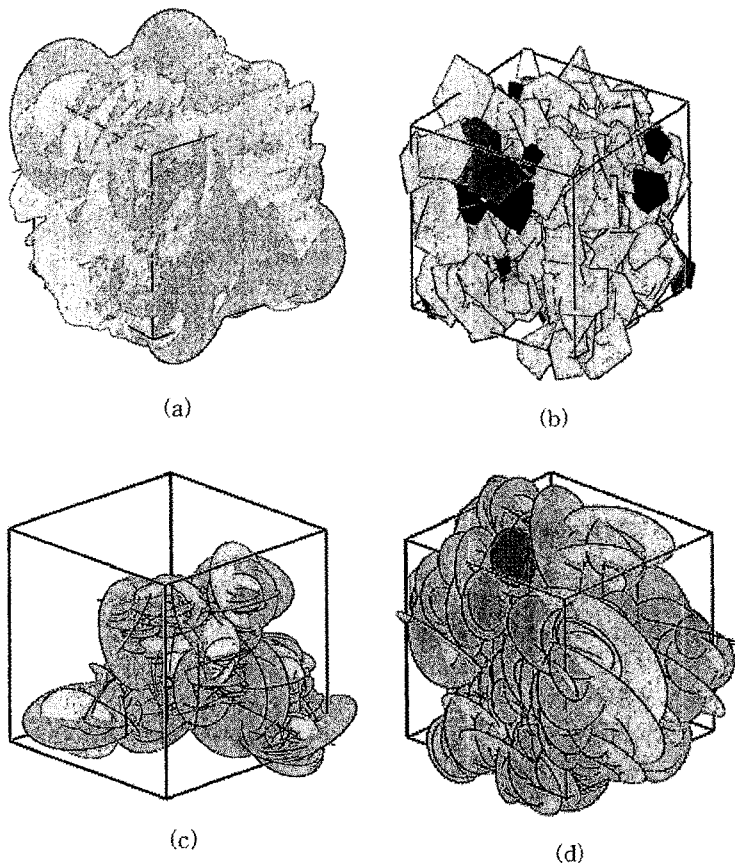


Fig. 3 모델링 결과 (a) 배치 모델 (b) 다각형 모델 (c) Levy-Lee 프랙탈 모델 (d) 지구통계학적 모델

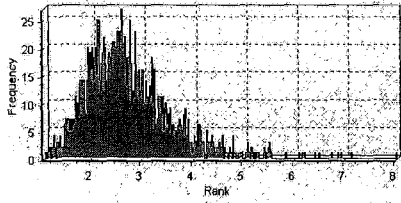


Fig. 4 길이 분포도(3차원)

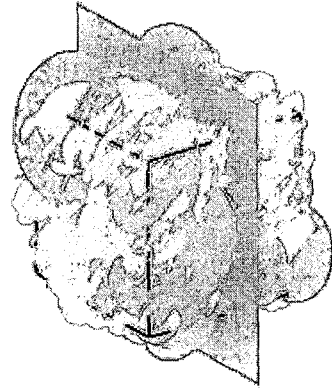


Fig. 5 3차원 균열망과 y축에 수직인 평면 ($y=10$)

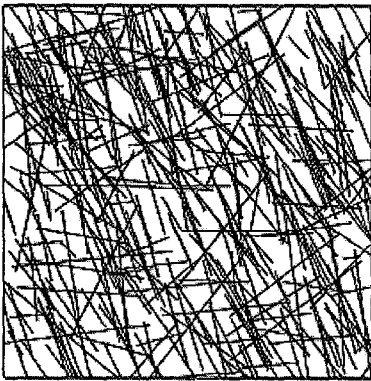


Fig. 6 2차원 균열 단면도($y=10$)

Table 2 2차원 단면의 길이 분포의 통계 변수

Statistical Parameter	Value
Mean	4.28
Average Deviation	1.45
Standard Deviation	1.86
Variance	3.47
Skewness	0.68
Kurtosis	0.87

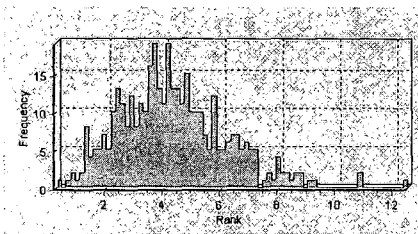


Fig.7 길이 분포도(2차원)

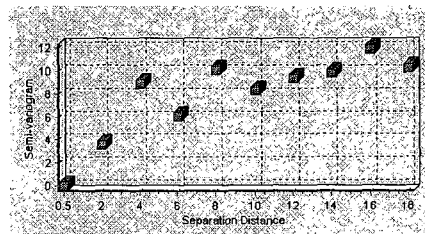


Fig. 8 등방성 길이 베리오그램(2차원)

4. 결론

기존의 3차원 연속체 모델이나 2차원 분리 균열 모델은 균열의 불균질성을 적절히 반영하지 못할 뿐만 아니라 균열을 통한 유체 유동에 대한 신뢰성 있는 예측을 할 수 없었다. 이 연구에서 개발한 3차원 균열모델링 시스템, SNUFRACS는 4가지 개념모델을 이용하여 현장의 균열 현상과 유사한, 다양한 형태를 가지는 균열망을 생성한다. 다양한 시각화 옵션과 3

차원 및 2차원 통계적 분석을 통하여 균열매질의 분포와 특성을 쉽게 파악할 수 있다. 개발한 시스템은 향후 다공성 균열매질에서의 이상유동 및 용질 거동을 모사하기 위한 기본 모델로써 유용하게 활용할 수 있다. 특히, 모델의 검증 및 수정 보완 단계에서 기존에 획득된 국내 균열 대수층의 추적자 시험 현장 자료 및 외국의 상용 데이터베이스를 적극 활용한다면 보다 현장 지향적인 모델을 개발할 수 있다. 개발된 자주적 모델링 기법은 국내 대륙붕 천연가스 개발과 핵폐기물 저장 부지 선정, 지하오염 해석 및 제거 기법 개발 등 에너지, 자원 및 환경 분야에서 폭넓게 사용될 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

1. Beacher, G.B., Lanney, N.A., and Einstein, H.H.: "Statistical Description of Rock Properties and Sampling," Proceedings 18th US Symp. On Rock Mechanics, AIME, 5C1, 1 (1977)
2. Billiaux, D., Chiles, J.P., Hestir, K., and Long, J.: "Three-Dimensional Statistical Modelling of Fractured Rock Mass - An Example from the Fanay-Augeres Mine," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, Vol. 26, No. 3, 281 (1989)
3. Chiles, J.P.: "Fractal and Geostatistical Methods for Modeling of a Fracture Network," Mathematical Geology, Vol. 20, 631 (1988)
4. Sahimi, M.: Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock, VCH, New York (1995)