

간극 변화를 고려한 역학적 개념의 균열망 모델에서의 유체유동 연구

남일·강주명¹⁾

1. 서 론

Renshaw는 기존의 추계론적 균열망 모델과는 다르게 균열들간의 역학적인 관계를 이용하여 균열망을 생성하는 방법을 연구했다. 균열망은 임계하 균열 성장 메카니즘(subcritical fracture growth mechanism)을 통해 생성된다고 가정하고 균열망 성장에 관여할 수 있는 변수들을 연구했다. 그 변수로서 암반 생성시에 결정되는 초기 결함 밀도(flaw density)와 균열의 성장 속도와 관계되는 성장 속도 지수(growth rate exponent; α)를 설정했다. Fig. 1은 균열망 형성 방법을 개략적으로 나타낸 것이다.

이렇게 개발한 모형의 형태는 초기 결함 밀도와 성장 속도 지수의 영향을 받지만 유체유동량에 대해서는 성장 속도 지수가 영향이 크고 초기 결함 밀도는 크게 영향을 주지 못하는 것을 알아냈다. 그런데 간극의 크기가 어떤 영향을 주는지는 연구하지 않았다. 즉 균열마다 동일한 크기의 간극을 줌으로써 간극의 크기가 변함에 따라 유체유동량이 크게 변하는 효과는 고려하지 않았다.

이 연구에서는 임계하 균열 성장 메카니즘 하에서 균열이 성장하는 모델을 2차원으로 개발하고 간극의 크기를 고려했을 경우 초기 결함 밀도와 성장 속도 지수가 유체유동량에 영향을 미치는 정도를 분석하고, 간극의 크기를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 유체유동량의 차이가 어느 정도 되는지 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

기본적인 가정으로 1. 등방성, 균질성의 매질에, 2. 초기 결함의 위치는 무작위로 분포하며, 3. 외부 응력이 처음부터 끝까지 일정하며, 4. 균열의 성장은 임계하 응력 성장 메카니즘에서 응력 부식에 의한 과정만을 고려하게 된다. 확장되는데 걸리는 시간을 고려해 볼 때 새로 생기는 공간에 매질에서부터 나온 유체가 채워질 시간이 충분하다고 가정한다.

각 균열에 작용하는 응력(p_i)은 외부에서 작용하는 힘(p^∞)과 다른 균열에 의해 작용하는 영향력(Λ_{ij})을 중첩의 원리에 의해 모두 합한 것으로 나타낸다고 가정하여 구한다.

$$p_i(x) = p^\infty + \sum_{j=1, i \neq j}^n \Lambda_{ij}(x) \langle p_j(x) \rangle \quad (1)$$

한편 Kachanof는 역학적인 관계를 이용하여 각 균열 간극의 크기를 구하였다.

$$w = \frac{4a}{E} \sigma \left(1 - \alpha \frac{x}{a} + \beta \frac{x^2}{a^2} \right) \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (2)$$

3. 연구 결과 및 분석

Fig. 2는 식(2)에 의해 구한 균열 간극의 크기를 나타낸 것이다. 이 그림을 보면 균열 간극의 크기 분포가 실선으로 나타낸 것을 따라 분포하는 것을 알 수 있다. 이것은

주요어: 균열망, 간극, 유체유동량, 임계하 균열 성장 메카니즘, 초기 결함 밀도, 성장 속도 지수

1) 서울대학교 자원공학과

Renshaw가 1997년에 발표한 논문에서 제시한 것처럼 일반적인 균열 길이와 간극 크기와의 비례관계가 완전히 일치할 수 없음을 보여준다.

Fig. 3 (a)와 같은 균열망이 있을 경우 유동 분석을 행한 결과를 나타낸 것이 Fig. 3 (b)이다. 좌우의 경계와 연결되지 않은 모든 균열들은 제거되었다. 그림에서 원으로 나타낸 것은 그 위치에서의 압력을 나타낸다. 유체유동은 채널을 형성하면서 일어나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4 (a)는 성장 속도 지수에 따라 간극을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우의 유체유동량의 감소 비율을 나타낸 것이다. 간극의 크기는 균열의 길이에 비례하여 나타낸 경우는 검은색으로 식(2)에 구한 간극의 크기를 사용한 경우는 흰색으로 나타내었다. 두 가지 경우 다 균열 간극의 크기에 변화를 주었을 때 유체유동량이 더 적은 것을 확인할 수 있다. 그리고 성장속도지수에 따라 그 감소비가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 이것을 보면 균열 간극의 크기를 다르게 했을 때 유체유동량의 변화는 성장 속도 지수에 민감한 것을 알 수 있다.

Fig. 4 (b)는 초기 결함 밀도에 따라 간극의 크기를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 유체유동량 감소 비율을 나타낸 것이다. 이 그림에서도 간극의 크기를 고려한 경우 유체유동량이 크게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 한편 초기 결함 밀도가 다를 경우 성장 속도 지수에 따른 경우에 비하여 유체유동량 감소비가 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 특히 식(2)에 의해 구한 간극을 적용한 경우는 유체유동량 감소비가 거의 일정함을 볼 수 있다. 이것은 초기 결함 밀도는 간극의 크기를 다르게 할 경우 유체유동량의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것을 보여준다.

4. 결 론

1. 임계하 균열 성장 메카니즘에 의한 역학적인 관계를 통하여 균열 간극을 고려한 균열망 모델을 개발했다.
2. 개발된 모델의 유체 유동량은 동일한 크기의 간극을 이용한 모델보다 크게 감소했다.
3. 간극의 크기를 고려한 경우와 동일한 크기의 간극을 사용한 경우에 대한 유체유동량 감소율은 초기 결함 밀도보다 성장 속도 지수에 의해 큰 영향을 받았다.
4. 임계하 균열성장 메카니즘을 이용한 균열망 개발에는 간극의 크기 변화를 고려해야 유체 유동 해석 능력이 향상될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Atkinson, B. K., 1987, "Fracture Mechanics of Rock," Academic, San Diego, California.
2. Kachanof, M., 1987, "Elastic solids with many cracks: A simple method of analysis," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 23, No. 1, pp. 23-43.
3. Renshaw, C. E., and Pollard, D. D., 1994, "Numerical simulation of fracture set formation: A fracture mechanics model consistent with experimental observation," *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, No. 5, pp. 9359-9372.
4. Renshaw, C. E., 1996, "Influence of sub-critical fracture growth on the connectivity of fracture networks," *Water Resour. Res.*, Vol. 25, pp. 1519-1550.
5. Renshaw, C. E., and Park, J. C., 1997, "Effect of mechanical interactions on the scaling of fracture length and aperture," *Nature*, Vol. 386, pp. 482-484.

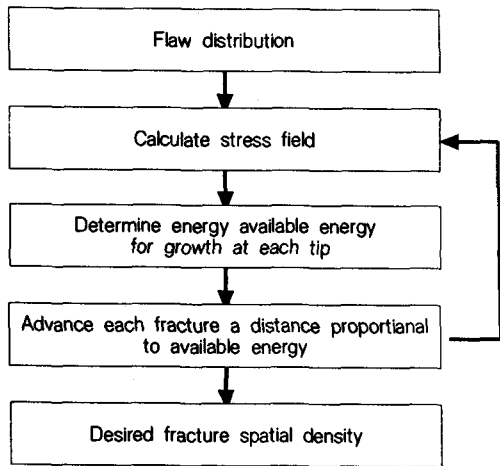


Fig. 1 Basic algorithm used to model the growth of a set of fractures

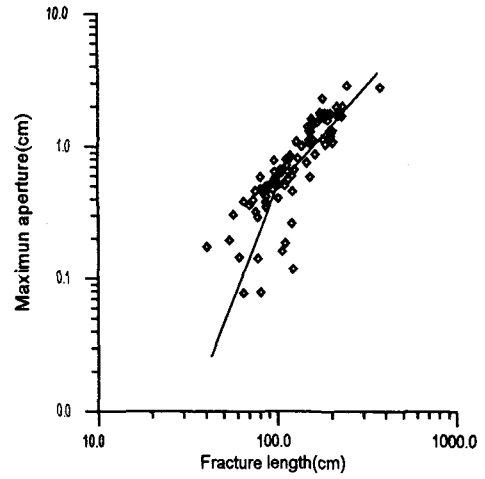
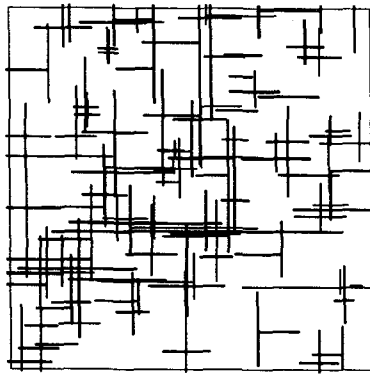
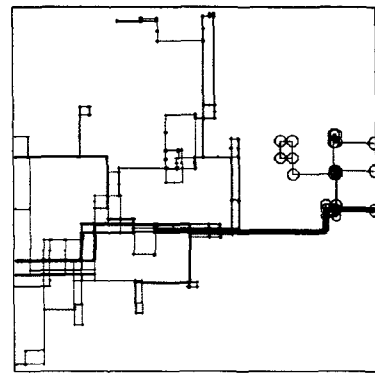


Fig. 2 Distribution of Aperture ($\alpha=1.0$, Flaw density= 2.0×10^{-5})

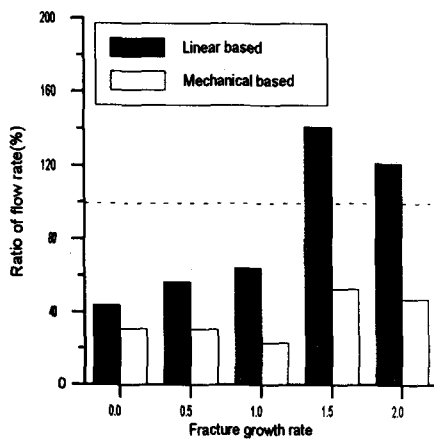


(a) Fracture network

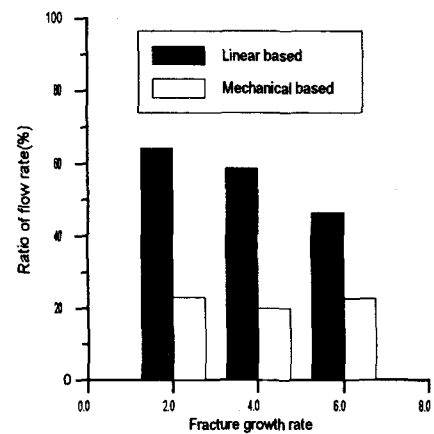


(b) Flow network

Fig. 3 Procedure of Flow analysis



(a) Growth rate exponent



(b) Flaw density

Fig. 4 Ratio of flow rate between variable aperture model and mean aperture model