

판상체 및 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 지하수위 거동 Dual-porosity fractal model with parallel fracture and blocky fracture flow

함 세 영

부산대학교 지질학과

요 약 문

이 연구에서는 부정류의 판상체 이중공극 프랙탈 모델과 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 지하수위 거동을 비교 연구하였다. 균열내 지하수위 거동 해석은 판상 이중공극 프랙탈 모델은 Hamm과 Bidaux(1996)을 이용하였고 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 경우에는 입방체 블록과 같은 크기의 구상체 블록으로 간주하여 지하수위 거동을 해석하였다. 그리고 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3차원에 대해서 판상체 이중공극 프랙탈 모델과 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 이론적인 수위강하 곡선을 작성하여 비교, 분석하였다.

부정류의 판상체 이중공극 프랙탈 모델과 입방체 이중공극 프랙탈 모델은 기반암내 균열의 분포가 프랙탈망을 형성하고, 균열과 매트릭스 블록이 거의 수평의 층상으로 발달하는 경우와 균열이 수평방향과 수직방향으로 발달하면서 매트릭스 블록이 입방체를 이루는 경우에 적용될 수 있다.

주제어 : 이중공극 프랙탈 모델, 판상체 블록, 입방체 블록

I. 서론

기반암내의 균열이 잘 발달된 부분(균열대로서 수리전도도가 높고 비저유율이 낮음)과 그렇지 않은 부분(매트릭스 블록으로서 수리전도도가 낮고 비저유율이 높음)을 구분하여 모식화한 대수층체계를 이중공극 대수층이라 한다(Barenblatt et al., 1960; Warren and Root, 1963; Boulton, and Streltsova, 1977; Kazemi, 1969; Huyakorn et al, 1983). 이중공극 대수층은 매트릭스 블록과 균열의 수위차에 비례하여 블록으로부터 균열쪽으로 향하는 누수량이 결정되는 준 정상류 상태(quasi-steady state)와 매트릭스 블록내의 수두분포와 매트릭스 블록의 geometry에 따라 균열쪽으로 향하는 누수량이 결정되는 부정류 상태(unsteady state)가 있다. 부정류의 이중공극 모델에는 블록의 형태가 판상(slab-shaped block)인 경우와 구형(sphere-shaped block)의 경우가 있다.

균열의 형태가 규모에 관계없이 자기 상사성(self-similarity)을 보일 때, 균열대는 프랙탈 망(fractal network)를 가진다고 할 수 있다(Allègre외, 1982; Velde외, 1991). 이때, 균열의

총 표면적은 규모에 비례하여 실수의 승수로서 증가한다. 지하수 유동의 프랙탈 모델 (Barker, 1988; Chang and Yortsos, 1990; Hamm and Bidaux, 1994, 1996; Acuna and Yortsos, 1995)은 percolation theory에 의해서 쉽게 이해될 수 있다(Ritzenberger and Cohen, 1984). Acuna와 Yortsos(1995)에 의하면, Baker의 식(1988)은 O'Shaughnessy and Procaccia(1985) 또는 Chang과 Yortsos(1990)의 프랙탈 모델의 한 특수해로서 수리전도도계수(conductivity index) $\theta=0$ 인 경우이다. 수리전도도계수는 프랙탈망의 수리전도도와 관련되는 계수로서 정상적인 프랙탈망에서 벗어나는 편차를 나타낸다. 만약, $\theta > 0$ 이라면, hydraulic diffusivity가 위치에 따라 달라지게 된다. θ 가 0에 가까워지면, 프랙탈망의 연결성이 좋아진다는 것을 의미한다.

II. 판상체 이중공극 프랙탈 모델

부정류의 판상체 이중공극 프랙탈 모델(Hamm and Bidaux, 1996)은 높은 투수율과 낮은 비저유율을 가지는 균열과 낮은 투수율과 높은 비저유율을 가지는 매트릭스 블록들로 이루어진 대수층으로서, 블록에서 균열로 공급되는 수량(v)은 ∂h_2 (매트릭스 블록내의 수두)/ ∂z (균열-블록의 경계면으로부터 블록내의 임의의 점까지의 거리)에 비례한다. 블록단위와 균열단위 사이에 균열스킨(fracture skin)이 존재하는 경우에는 블록으로부터 균열로의 흐름을 방해함으로써, 균열내 수위가 균열스킨이 존재하지 않을 때보다 더 떨어지게 하는 결과를 가져온다. 균열스킨은 광물의 침전이나 화학적인 변질작용으로부터 유래할 수 있다. 이 때 블록의 상부 경계는 불투수경계이다.

판상체 이중공극 프랙탈 대수층의 균열단위내 지하수 유동의 평형방정식은

$$\frac{K}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s_1}{\partial r} \right) = S_s \frac{\partial s_1}{\partial t} + v \quad (1)$$

과 같다. 여기서, r 은 양수정으로부터의 거리이고, t 는 양수경과시간을 의미한다. v 는 블록 단위로부터 공급되는 단위체적당 지하수량(T^{-1})으로서, $v = -\frac{K'}{b'} \left(\frac{\partial s_2}{\partial z} \right)_{z=0}$ 와 같이 표현된다. 여기서, b' 는 블록내에서 균열로 향한 지하수의 유동범위로 규정된다.

한편, 블록내의 수위하강에 관한 미분방정식은

$$\frac{\partial^2 s_2}{\partial z^2} = \frac{S_s'}{K'} \frac{\partial s_2}{\partial t} \quad (2)$$

과 같다 (Boulton과 Streltsova, 1977). 여기서, K' 는 블록의 수리전도도(LT^{-1}), S_s' 는 블록의 비저유율(L^{-1}), s_2 는 블록내 수위강하(L), z 는 지하수 유동방향을 따라 블록내의 한 점으로부터 균열의 경계까지의 거리(L)이다.

III. 입방체 이중공극 프랙탈 모델

부정류의 입방체 이중공극 프랙탈 모델도 부정류의 판상체 이중공극 프랙탈 모델과 수리적 특성이 같다. 다만, (1)식에서 $v = -\frac{3K'}{b'} \left(\frac{\partial s_2}{\partial \rho} \right)_{\rho=b'}$ 와 같이 표현된다. 여기서,

b'는 구상체 블록(입방체 블록을 구형으로 간주함)의 중심으로부터 방사상으로 균열까지의 거리 즉, 구상체 블록단위의 반경과 같고 ρ 는 블록의 중심으로부터 블록내 임의의 점까지의 거리이다.

한편, 블록내의 수위강하에 관한 미분방정식은

$$\frac{\partial^2 s_2}{\partial \rho^2} = \frac{S_s'}{K'} \frac{\partial s_2}{\partial t} \quad (3)$$

과 같다 (Moench, 1984). 여기서, K' 는 블록의 수리전도도(LT^{-1}), S_s' 는 블록의 비저유율(L^{-1}), s_2 는 블록내 수위강하(L), ρ 는 방사상으로 블록의 중심으로부터의 거리(L)이다.

상기 식과 초기조건 및 경계조건을 이용하여, 양수정과 관측정(균열과 매트릭스 블록)의 수위강하를 계산하였다. 그리고, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3차원에 대해서 판상체 이중공극 프랙탈 모델과 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 이론적인 수위강하 곡선을 작성하여 비교, 분석하였다.

IV. 결론

동일한 수리상수에 대해서 그리고 r/b' 또는 r/ρ 에 따라, 판상체 이중공극 프랙탈 모델과 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 균열내 지하수위 거동을 서로 비교한 결과, 양수초기에는 판상체 이중공극 프랙탈 모델이 입방체 이중공극 프랙탈 모델보다 더 큰 수위강하를 보여주었다. 이는 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 블록으로부터의 누수율이 판상체 이중공극 프랙탈 모델보다 더 크기 때문이다. 양수후기에는 판상체 이중공극 프랙탈 모델과 입방체 이중공극 프랙탈 모델이 같은 곡선으로 합쳐지면서, 균열과 블록이 하나의 대수층체계로 거동하게 된다. 또한, 균열과 매트릭스 블록 사이에 균열스킨이 존재하는 경우에도 양수초기에는 판상체 이중공극 프랙탈 모델이 입방체 이중공극 프랙탈 모델보다 더 큰 수위강하를 보여주고, 양수후기에는 이중공극 프랙탈 모델과 구상 이중공극 프랙탈 모델이 같은 곡선으로 합쳐지게 된다.

판상체 이중공극 프랙탈 모델과 입방체 이중공극 프랙탈 모델의 수위강하 곡선은 거의 같은 형태를 가지므로, 야외에서 균열의 형태를 확인하지 않고 수위강하 곡선만으로는 둘 중에서 어떤 모델이 더 합당한지 알아내기가 어렵다.

참 고 문 헌

- Acuna, J. A., and Yortsos, Y. C., "Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient", *Water Resour. Res.*, 31(3), pp. 527-540 (1995).
- Allègre, C. J., le Mouél, J. L., and Provost, A., "Scaling rules in rock fractures and possible implications for earthquake prediction", *Nature*, 297, pp. 47-49 (1982).
- Barenblatt, G. E., Zheltov, I. P. and Kochina, I. N., "Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks", *Jour. Appl. Math. Mech. Engl. Transl.*, 24(5), pp. 1286-1303 (1960).

- Barker, J. A., "A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock", *Water Resour. Res.*, 24(10), pp. 1796-1804 (1988).
- Boulton, N. S, and Streltsova, T. D., "Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation", *Jour. Hydr.*, 35, pp. 257-269 (1977).
- Chang, J. and Yortsos, Y. C., "Pressure-transient analysis of fractal reservoirs", *SPE Form Eval.*, 5, 631 (1990).
- Hamm, S.-Y. and Bidaux, P., "Dual-porosity fractal models for transient flow analysis in fissured rocks", *Water Resour. Res.*, 32(9), pp. 2733-2745 (1996).
- Hamm, S.-Y. and Bidaux, P., "Stationary dual-porosity fractal model of groundwater flow in fractured aquifers", *The Jour. Eng. Geol.* 4(2), pp. 127-138 (1994).
- Huyakorn, P. S., Lester, B. H., and Faust, C. R., "Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers", *Water Resour. Res.*, 19(4), pp. 1019-1035 (1983).
- Kazemi, H., "Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distributions", *Trans. Soc. Pet. Eng. AIME*, 246, pp. 451-462 (1969).
- Moench, A. F., "Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin", *Water Resour. Res.*, 20(7), pp. 831-846 (1984).
- O'Shaughnessy, B., and Procaccia, I., "Diffusion on fractals", *Phys. Rev. A. Gen. Phys.*, 32, 3073 (1985).
- Ritzenberger, A. L. and Cohen, R. J., "First passage percolation: Scaling and critical exponents", *Phys. Rev. B*, 30(7), pp. 4038-4040 (1984).
- Velde, B., Dubois, J., Moore, D., and Touchard, J., "Fractal patterns of fractures in granites", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104, pp. 25-35 (1991).
- Warren, J. E. and Root, P. J., "The behavior of naturally fractured reservoirs", *SPEJ*, 3(2), pp. 245-255 (1963).