

일정수두 상부경계를 가지는 이중공극 대수층내 부정류에 관한 프락탈모델

Fractal Model of Transient Flow in a Dual-porosity Aquifer with Constant-head Upper Boundary

함세영(Se - Yeong Hamm)*

요 약 : 지금까지 균열대수층에 관한 많은 모델들이 제안되었다. 본 연구에서는 block의 상부에 일정수두 경계가 규정되어 있으며 이중공극 대수층내에서 block으로부터 균열로 향하여 흐르는 부정류의 새로운 프락탈 모델이 개발되었다. 이 모델은 양수정의 우물저장 효과와 우물손실 효과를 고려하고 있으며, 아울러 block과 균열간의 fracture skin도 고려하는 것이다. 본 모델은 fracture skin이 존재하지 않는 경우에는 Hantush(1960)의 수정식 또는 Boulton과 Streltsova(1978)의 식을 2차원의 해로서 포함하는 일반화된 모델이 된다. 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3의 유동 차원과 여러 가지 누수계수 및 fracture skin에 대해서 그리고 양수정과 관측정에 대해서 무차원의 시간에 대한 무차원의 수위하강 표준곡선이 작성되었다.

Abstract : So far, several fractal models of fluid flow in a fractured aquifer have been developed. In this study, a new fractal model is derived that considers transient flow in the dual-porosity aquifer with the fracture skin between the fissure and the block, and the storage capacity and the wellbore skin on the pumping well. Constant-head upper boundary is specified in the block. This model is a generalized one which comprises both modified Hantush equation (1960) and Boulton-Streltsova equation (1978). Type curves are plotted for different flow dimensions (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3) with various values of the leakage factor and the fracture skin. They show dimensionless drawdown in the pumping well and observation wells located either in the fissure system or in the matrix block.

서 론

균열암반내 지하수 유동에 관한 모델들은 크게 이중공극 모델, 단일균열 모델, 프락탈 모델 그리고 추계론적 분리균열(stochastic discrete fracture) 모델로 대별된다. 기존의 이중공극 모델들(Barenblatt 외, 1960; Warren and Root, 1963; Kazemi, 1969; Boulton and Streltsova, 1977)은 정상류의 또는 부정류의 이중공극 모델들로서 균열암반내 지하수 유동 특성을 분석하는데 지금까지도 많이 이용되고 있으나 복잡한 균열망을 따라서 흐르는 지하수 유동을 모식화하기에는 불충분하다. 이에 대해서, 추계론적 분리균열 모델은 균열을 통한 지하수 유동을 보다 상세히 분석할 수 있으나, 이를 위해서는 보다 자세한 야외 정보를 요구하며, 또한 복잡한 계산을 필요로 한다는 단점이 있다. 프락탈 모델은 균열망의 프락탈 분포성을 이용함으로써 이중공극 모델이나 단일균열 모델보다 더 자연상태에 가깝게 균열암반 대수층을 모식화할 수 있으며, 추계론적 분리균열 모델보다는 훨씬 간편하게 균열암반내 지하수 유동 특성을 밝힐 수 있다.

균열의 프락탈 분포성은 다양한 규모에도 불구하고 자기 유사적 성질을 나타내며 균열의 총 표면적은 규모에 비례하여 실수의 승수로서 증가한다(Allégre 외, 1982; Thomas, 1987; Velde 외, 1991). 암반내 균열망은 균열의 폭, 길이, 방향, 균열들간의 간격 등으로 나타낼 수 있으나, 실제로는 복잡한 균열망을 정량적으로 표시하기가 어렵다(선우춘, 1989). 그러나, 이와 같이 복잡한 균열망을 프락탈 분포성(또는 프락탈 구조)을 이용하여 나타냄으로써 정량화시킬 수 있을 것이다. 따라서, 균열대수층내 지하수 흐름은 프락탈 형태(fractal geometry)를 가지는 균열망에 지배되고, 2차원 흐름뿐만 아니라 1차원 미만부터 3차원까지의 임의의 실수차원의 흐름이 존재할 수 있을 것이다. 지금까지 여러 학자들에 의해서 균열 기반암내 지하수 유동에 관한 여러 종류의 프락탈 모델(Barker, 1988; Chang and Yortsos, 1988; Hamm and Bidaux, 1994a, 1994b, 1996; Acuna and Yortsos, 1995)이 개발되었다. Barker(1988)는 프락탈 이론을 균열암반내 지하수 유동에 적용하였으며, 이를 일반화 방사상 유동모델(generalized radial flow model)이라고 하였다. 그는 유동 차원을 분할 유동 차원(fractional flow dimension)으로까지 확장시켰다. Hamm과 Bidaux(1994a)는 반투수층으로부터의 누수현상을 포함하는 프락탈 이론을 발표하였으며, Hamm과 Bidaux(1994b)는 정상류의 이중공극 프락탈 모델을 제안하

*부산대학교 지질학과(Department of Geology, Pusan National University, San 30, Jangjeon-Dong, Geumjeong-Gu, Pusan 609-735, Korea)

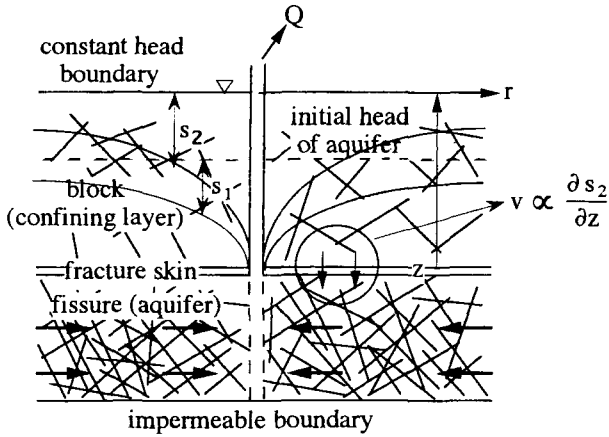


Figure 1. Fractal model of transient flow in a dual-porosity aquifer with constant-head upper boundary.

였다. 또한, Hamm과 Bidaux(1996)는 fracture skin을 포함하는 부정류의 이중공극 프락탈 모델과 정상류의 이중공극 프락탈 모델의 관련성을 정립하였다. Acuna와 Yortsos(1995)는 균열의 프락탈망내에서의 유체의 유동을 수치적으로 분석하였다.

본 연구에서는 이중공극 균열 대수층내 상부 일정수두 경계를 가지는 부정류흐름의 프락탈 모델을 개발하였다(Figure 1). 이 모델은 균열암반대수층의 이중공극 모델에서 block의 상부 경계가 일정수두에 의해서 유지되거나(Boulton과 Streltsova, 1978), Hantush(1960)의 누수 피압대수층과 같이 저류성을 가지는 가압층이 일정수위의 자유면대수층 하부에 존재하는 경우를 모두 포함하는 모델이다. block은 균열대(대수층)에 비해서 상대적으로 균열의 발달이 미약한 부분으로서 균열들간의 연결성이 낮아서 대수층으로서의 역할을 하지 못한다. 균열대수층에서 수리전도도는 균열의 개구성(aperture)에 크게 좌우되므로 연결성이 좋은 주요한 균열대는 지하수 유동을 지배하며 개구성이 낮은 작은 균열들은 block의 역할을 한다(Hamm과 Bidaux, 1996). 따라서, 본 모델은 양수시간이 상당히 경과하면서 지하수위가 안정화되는 균열대수층의 수리상수를 Hantush식(1956)이나 Hantush의 수정식(1960)보다 정확히 산출할 수 있으며, Hamm과 Bidaux(1994)에 비해서 가압층 또는 block의 저류계수를 구할 수 있는 이점이 있다. 따라서, 본 모델은 암반대수층의 합리적인 수리상수를 산출하고 양수량에 따른 정확한 수위강하를 예측하는데 활용될 수 있을 것이다.

이 론

Boulton과 Streltsova(1977)에 의하면 block내의 수위강하에 관한 미분방정식은

$$\frac{\partial^2 s_2}{\partial z^2} = \frac{S_s'}{K'} \frac{\partial s_2}{\partial t} \quad (1)$$

과 같다. 여기서, K' 는 block의 수리전도도(LT^{-1}), S_s' 는 block의 비저유율(L^{-1}), s_2 는 block내의 수위강하(L), z 는 지하수 유동방향을 따라 block내의 한 점으로부터 균열의 경계까지의 거리(L), t 는 양수경과시간을 의미한다.

한편, 균열내의 수위강하에 관한 미분 방정식은

$$\frac{K_f}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s_1}{\partial r} \right) = S_{sf} \frac{\partial s_1}{\partial t} + v \quad (2)$$

과 같다. 여기서, K_f 는 균열의 수리전도도(LT^{-1}), S_{sf} 는 균열의 비저유율(L^{-1}), s_1 는 균열내의 수위강하(L), r 은 지하수 유동방향을 따라 양수정으로부터 균열내의 한 점까지의 거리(L), v 는 block으로부터 공급되는 단위체적당 지하수량(T^{-1}), n 은 지하수 유동차원으로서 $0 \leq n \leq 3$ 의 임의의 실수값이다. 그리고,

$$v = -\frac{K'}{b'} \left(\frac{\partial s_2}{\partial z} \right)_{z=0}$$

는 지하수의 유동방향으로 block의 범위로 규정된다.

이중공극 프락탈매체내 지하수 흐름이 Darcy의 법칙에 따른다고 하면, 양수에 따른 우물내의 저장량의 변화는

$$W_s \frac{\partial s_w}{\partial t} = Q + K_f b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-1} \left(\frac{\partial s_1}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (3)$$

여기서, Q 는 양수량(L^3T^{-1}), W_s 는 양수정의 저장계수(L^2), s_w 는 양수정에서의 수위강하(L), r_w 는 양수정의 반경, b 는 지하수의 흐름에 직각방향의 균열의 범위(L)이다. 그리고, $\alpha_n = 2\pi^{n/2} / \Gamma(n/2)$ 이다.

만약 우물손실이 존재한다면, 양수정에서의 수위강하는 $r = r_w$ 에서의 대수층의 수위강하와 다를 것이다.

$$s_w(t) = s_1(r_w, t) - s_f r_w \left(\frac{\partial s_1}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (4)$$

여기서, s_f 는 우물손실상수이다.

초기조건은 양수정으로부터의 모든 거리에 대해서

$$s_w(r, 0) = s_1(r, 0) = s_2(r, 0) = 0 \quad (5)$$

이고, 경계조건은 양수시작후 임의의 시간 t 에 대해서

$$s_1(\infty, t) = s_2(\infty, t) = 0 \quad (6)$$

이다.

상기 식들에 다음과 같은 무차원의 매개변수를 도입하자.

$$t_D = \frac{4K_f t}{(S_{sf} + S_s')r_w^2} \quad (7)$$

$$r_D = r/r_w \quad (8)$$

$$z_D = r/b' \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{K' r_w^2}{K_f b'^2} \quad (10)$$

$$\omega = \frac{S_{sf}}{S_{sf} + S_s'} \quad (11)$$

$$s_{iD} = \frac{4\pi^{n/2} K_f b^{3-n}}{Q r_w^{2-n}} s_i \quad (i = 1, 2, w) \quad (12)$$

$$W_{sD} = \frac{W_s}{\pi^{n/2} b^{3-n} r_w^n (S_{sf} + S_s')} \quad (13)$$

따라서, (1), (2), (3), (4)식은

$$\frac{\partial^2 s_{2D}}{\partial z_D^2} = \frac{4(1-\omega)}{\lambda} \frac{\partial s_{2D}}{\partial t_D} \quad (14)$$

$$\frac{1}{r_D^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D^{n-1} \frac{\partial s_{1D}}{\partial r_D} \right) = 4\omega \frac{\partial s_{1D}}{\partial t_D} - \lambda \left(\frac{\partial s_{2D}}{\partial z_D} \right)_{z_D=0} \quad (15)$$

$$W_{sD} \frac{\partial s_{wD}}{\partial t_D} = 1 + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \left(\frac{\partial s_{1D}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (16)$$

$$s_{wD}(t_D) = s_{1D}(1, t_D) - s_f \left(\frac{\partial s_{1D}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (17)$$

과 같이 표현된다. (14), (15), (16), (17)식을 Laplace 변환시키면,

$$\frac{d^2 \bar{s}_{2D}}{dz_D^2} = \frac{4p(1-\omega)}{\lambda} \bar{s}_{2D} \quad (18)$$

$$\frac{1}{r_D^{n-1}} \frac{d}{dr_D} \left(r_D^{n-1} \frac{d\bar{s}_{1D}}{dz_D} \right) = 4p\omega \bar{s}_{1D} - \lambda \left(\frac{d\bar{s}_{2D}}{dz_D} \right)_{z_D=0} \quad (19)$$

$$pW_{sD} \bar{s}_{wD} = \frac{1}{p} + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \left(\frac{d\bar{s}_{1D}}{dr_D} \right)_{r_D=1} \quad (20)$$

$$\bar{s}_{wD}(p) = \bar{s}_{1D}(1, p) - s_f \left(\frac{d\bar{s}_{1D}}{dr_D} \right)_{r_D=1} \quad (21)$$

과 같이 된다. Laplace domain에서 (18)식의 일반해는

$$\bar{s}_{2D}(z_D, p) = A \cosh(\eta z_D) + B \sinh(\eta z_D) \quad (22)$$

와 같다. 여기서,

$$\eta^2 = \frac{4p(1-\omega)}{\lambda} \quad (23)$$

이다. $t \geq 0$ 일 때, $z_D = 1$ 에서

$$\bar{s}_{2D} = 0 \quad (24)$$

이다. 그러므로,

$$B = -A \coth(\eta) \quad (25)$$

이다.

만약, fracture skin이 존재한다면(Moench, 1984),

$$s_2 = s_1 + b' S_f \left(\frac{\partial s_2}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (26)$$

이다. 여기서, 무차원의 fracture skin은 $S_f = K' b_s / K_b b'$ 이고, K_s 와 b_s 는 각각 fracture skin의 수리전도도(LT⁻¹)와 두께(L)이다. 만약,

fracture skin이 존재하지 않는다면, 균열과 block의 경계에서

$$s_2 = s_1 \quad (27)$$

이다.

Fracture skin은 광물의 침전 또는 화학적인 변질의 산물에 의해서 만들어지는 투수율이 낮은 부분이다. 이러한, fracture skin은 block과 균열 사이에 존재하며 block의 수리전도도보다 낮은 수리전도도를 가지므로 block으로부터 균열쪽으로는 흐름을 방해하는 역할을 한다.

(26)식을 무차원의 형태로 바꾸고 Laplace로 변환시키면

$$\bar{s}_{2D} = \bar{s}_{1D} + S_f \left(\frac{d\bar{s}_{2D}}{dz_D} \right)_{z_D=0} \quad (28)$$

이다. 그런데, $z_D = 0$ 일때

$$\left(\frac{d\bar{s}_{2D}}{dz_D} \right)_{z_D=0} = -A \eta \coth(\eta) \quad (29)$$

이고

$$\bar{s}_{2D}(z_D=0) = A \quad (30)$$

이므로,

$$A = \frac{\bar{s}_{1D}}{1 + S_f \eta \coth(\eta)} \quad (31)$$

그러므로, (22), (25), (31)식으로부터,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D}}{1 + S_f \eta \coth(\eta)} [\cosh(\eta z_D) - \coth(\eta) \sinh(\eta z_D)] \quad (32)$$

또는

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D}}{1 + S_f \eta \coth(\eta)} \frac{\sinh[(1-z_D)\eta]}{\sinh(\eta)} \quad (33)$$

이다. block내 수위하강의 평균값을 구하기 위해서 (33)식을 $0 \leq z_D \leq 1$ 에 대해서 적분을 하면,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D} [\cosh(\eta) - 1]}{\eta \sinh(\eta) [1 + S_f \eta \tanh(\eta)]} \quad (34)$$

이 된다. 만약, fracture skin이 존재하지 않는다면,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D} [\cosh(\eta) - 1]}{\eta \sinh(\eta)} \quad (35)$$

이 된다. Laplace domain에서 양수정과 균열내에서의 수위하강의 일반해는 Barker 식(1988)의 수위하강을 구하는 과정과 같으므로

$$\bar{s}_{wD} = \left\{ p \left[pW_{sD} + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \frac{1}{K_{v-1}(\sigma) + s_f} \right] \right\}^{-1} \quad (36)$$

표준곡선

$$\bar{s}_{ID} = \left\{ p \left[p W_{SD} + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \frac{1}{K_{v-1}^v(\sigma) + S_f} \right] \frac{r_D^v K_v(\sigma r_D)}{K_v(\sigma) + S_f \sigma K_{v-1}(\sigma r_D)} \right\}^{-1} \quad (37)$$

이 된다. 여기서,

$$\sigma^2 = 4p\omega + \frac{\lambda \eta \coth(\eta)}{1 + S_f \eta \coth(\eta)} \quad (38)$$

$$K_{v-1}^v(z) = \frac{K_v(z)}{z K_{v-1}(z)} \quad (39)$$

$$v = 1 - n/2 \quad (40)$$

(37)식에서 우물반경이 무한소라고 가정하면(Hamm and Bidaux, 1996),

$$\bar{s}_{ID} = \frac{2^{1+v} K_v(\sigma)}{p \sigma^v} \quad (41)$$

이다. (34), (36), (37), (41)식은 Stehfest algorithm(1970)에 의해서 실수영역으로 변환시킬 수 있으며, $K_v(z)$ 는 Amos algorithm(1986)을 이용하여 계산된다.

Figure 2의 (a)에서 (f)까지는 각각 유동차원(n)이 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3에 대한 양수정에서의 무차원의 수위하강곡선을 나타내고 있다. 이때, $r_w/B = 0.1$, $\lambda = 0.01$, $\omega = 0.091$ 으로 고정하였으며, 각 곡선의 fracture skin(S_f)은 0, 1, 2, 3.5, 6, 10이다. 그 래프에서 수평축은 무차원의 시간인 t_D/r_D^2 고, 수직축은 무차원의 수위하강인 s_{wD} 이다. 같은 차원에서 fracture skin의 영향을 보면, fracture skin이 크면 클수록 block으로부터의 지하수 공급이 방해를 받으므로 수위하강은 커지게 된다. 유동차원에 따른 fracture skin의 효과를 보면, 차원이 증가할수록 fracture skin의 효과가 작아지며, 3차원(구상유동)에서는 지하수 유동이 fracture skin에 거의 영향을 받지 않아서 곡선들이 거의 하나처럼 나타나게 된다. 시간에 따른 수위변화를 보면, 초기에는 우물저장 효과로 인해서 기울기가 1인 직선상으로 나타나며 시간이 경과하여 누수의 효과가 나타나기 시작하면 수위가 안정되기 시작한다. 유동 차원에 따른 수위변화를 보면, 차원이 증가할수록 수위하강은 작아지게 된다.

Figure 3(a), (b), (c), (d), (e), (f)는 균열내에 위치하는 관측 정에 대해서 각각 유동차원 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3의 무차원 수위하강곡선을 나타내고 있다. 이때, $r/B = 0.2$, $\lambda r_D = 1.6 \times 10^{-5}$,

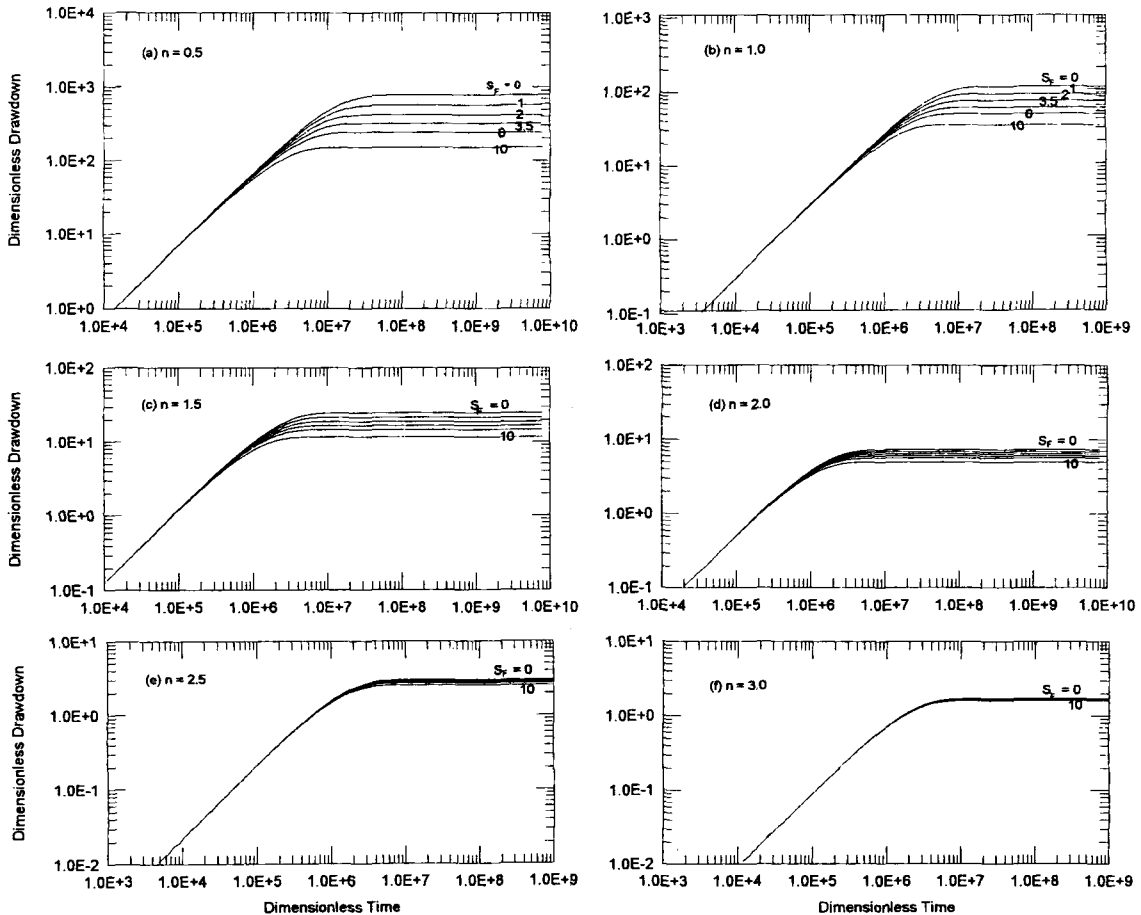


Figure 2. Selected type curves for drawdown at the production well in the fissure with different values of S_f and various flow dimensions ($W_s = 0$, $r_w/B = 0.1$, $\lambda = 0.01$ and $\omega = 0.091$).

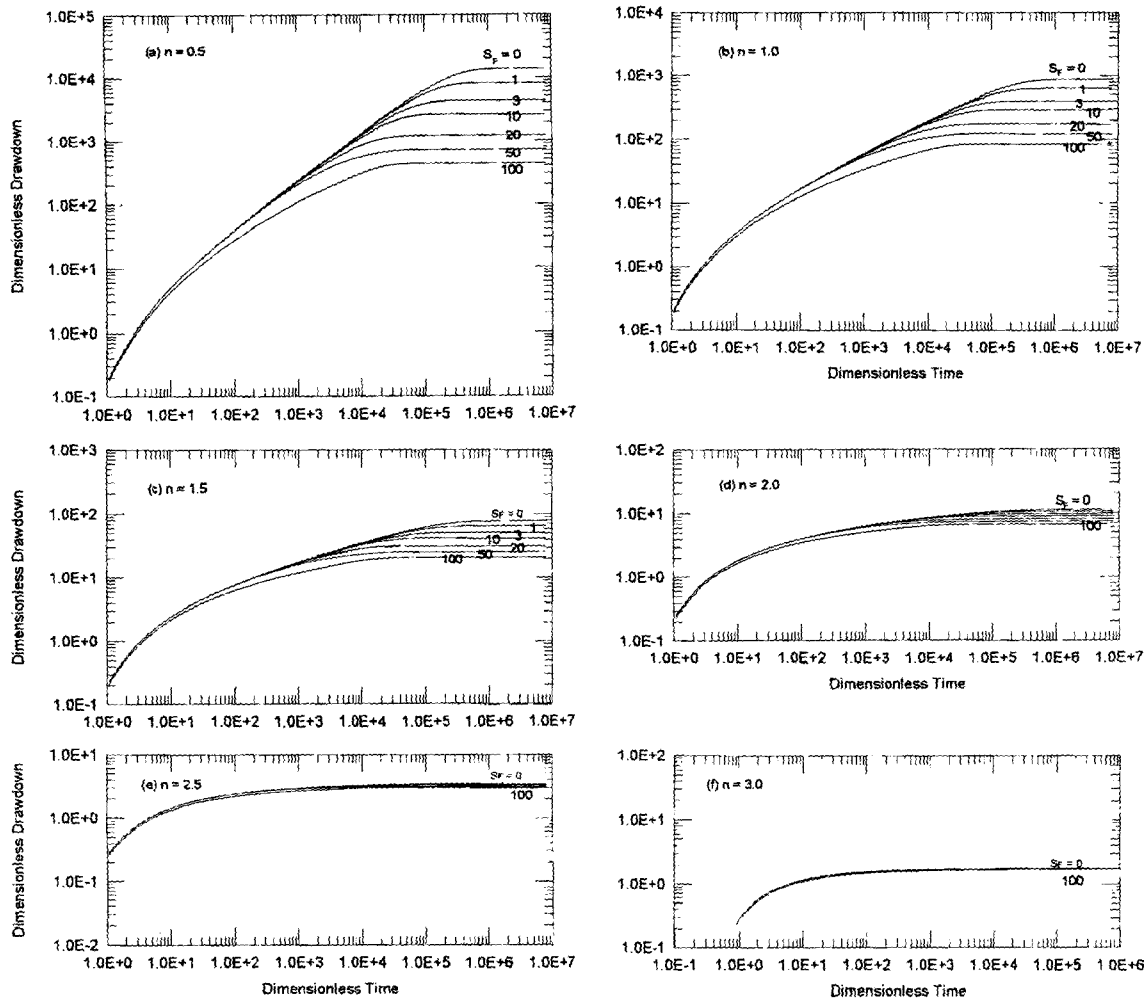


Figure 3. Selected type curves for drawdown at an observation well in the fissure with different values of S_f and various flow dimensions ($r/B = 0.2$, $\lambda r_D = 1.6 \times 10^{-5}$ and $\omega = 0.091$).

$\omega = 0.091$ 로 고정하였으며, 각 곡선의 fracture skin(S_f)은 0, 1, 3, 10, 20, 50, 100이다. Figure 3에서 수평축은 무차원의 시간인 t_D/r_D^2 이고, 수직축은 무차원의 수위하강인 s_{1D}/r_D^{2-n} 이다. Figure 2에서와 같이, fracture skin이 크면 클수록 block으로부터의 지하수 공급이 방해를 받으므로 수위하강은 커지게 되며, 유동차원이 증가할수록 fracture skin의 효과가 작아져서 3차원이 되면 모든 곡선들이 거의 같은 값을 가지게 된다.

Figure 4의 (a)에서 (f)까지는 균열내에 위치하는 양수정에 대해서 각각 유동차원 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3의 무차원 수위하강곡선을 나타내고 있다. 이때, $S_f = 0$, $W_s = 0.03$, $\omega = 0.091$ 로 두었으며, 각 곡선의 r_w/B 는 각각 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1이다. Figure 4의 수평축은 무차원의 시간인 t_D/r_D^2 이고, 수직축은 무차원의 수위하강인 s_{wD} 이다. 무차원 시간의 초기부분은 양수정내 우물저장효과에 의해서 기울기가 1을 나타내고 있으며, 시간이 경과하면서 Baker의 모델(Figure 4에서 $r_w/B = 0$ 인 경우)에 따르고, 이어서 누수효과가 나타나기 시작하면 수위가 안정된다. 유동차원에 따른 우물저장효과를 보면, 차원이 커질수록 우물저장효과의 지속시간이 길어지고, 2차원보다 커지면 우물저장효과가 사라지기 전에 누수의 효과가 나타

나기 시작한다.

차원의 변화에 따른 누수의 영향을 보면, 차원이 높아질수록 누수의 영향(특히, $r_w/B < 0.3$ 인 경우)이 작아진다. 따라서, 2차원보다 작은 경우에는 표준곡선과 수위측정값을 맞추기가 용이하나 2차원보다 큰 경우에는 양수정의 자료만으로는 수리상수를 결정하기가 어렵게 된다.

Figure 5(a), (b), (c), (d), (e), (f)는 균열내에 위치하는 관측정(가는 실선)과 block내에 위치하는 관측정(가는 점선)에 대해서 각각 유동차원 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3의 무차원 수위하강곡선을 나타내고 있다. 이때, 양수정과 마찬가지로 $S_f = 0$, $W_s = 0.03$, $\omega = 0.091$ 로 두었으며, 각 곡선의 r/B 는 각각 0.04, 0.073, 0.133, 0.40, 0.894이다. Figure 5의 수평축은 무차원의 시간인 t_D/r_D^2 이고, 수직축은 균열내 관측정의 경우에는 무차원의 수위하강(s_{1D}/r_D^{2-n})이고 block내 관측정의 경우에는 무차원의 수위하강(s_{2D}/r_D^{2-n})이다. 균열내에 위치하는 관측정의 무차원 시간에 따른 무차원 수위변화를 보면 초기에는 Baker의 곡선(Figure 5의 굵은 실선)에 따르다가 누수의 효과가 나타나기 시작하면 수위가 안정되기 시작한다. Figure 5에서 균열내 관측정과 block내 관측정의 수위변화를 서로 비교하여 보면, $r/B < 0.4$ 일때는

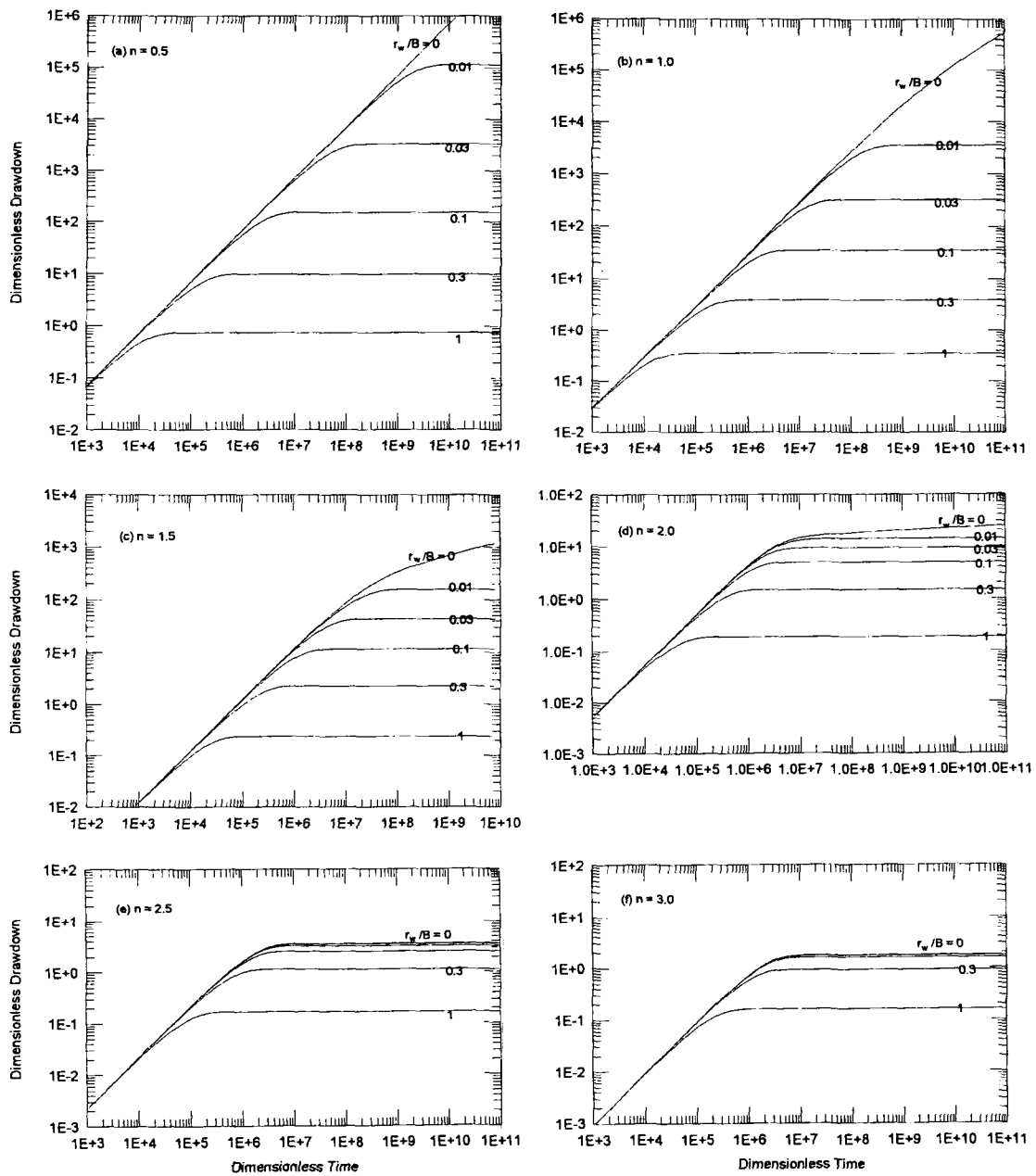


Figure 4. Selected type curves for drawdown at the production well in the fissure with different values of r_w/B and various flow dimensions ($W_s = 0.03$, $S_F = 0$ and $\omega = 0.091$).

block내 관측정의 수위강하가 더 크게 나타나고 있으나, $r/B \geq 0.4$ 일 때 균열내 관측정의 수위강하가 더 크게 나타나고 있다. 또한 유동차원의 증가에 따른 수위변화를 보면 block내의 관측정보다 균열내의 관측정이 r/B 의 영향을 덜 받으며, 차원이 증가할수록 이러한 현상은 더욱더 두드러진다. 특히, 2차원 이상일 때는 $r/B < 0.133$ 에서 균열내 관측정의 표준곡선들이 거의 하나로 나타난다. 따라서, 2차원보다 큰 차원에 대해서는 균열내 관측공의 자료보다 block내 관측공의 자료를 이용하는 것이 수리상수 산출이 더 용이할 것으로 판단된다.

Figure 5의 곡선 중에서 $r/B = 0.4$ 일 때는 Boulton과 Streltsova의 곡선(1978)의 $(K'b'S_a b)/(K_b S'b') = 0.1$, $K'b'/(K_b) = 1$ 일 때

와 같은 무차원 수위값인 $s_{1D}/r_D^{2-n} = 2.23$ 과 $s_{2D}/r_D^{2-n} = 1.11$ 을 가진다.

결론

본 연구는 block의 상부에 일정수두 경계를 가지며 block으로부터 균열로 향하여 흐르는 부정류의 새로운 이중공극 프랙탈 모델에 관한 것으로서 양수정의 우물저장 효과와 우물손실 효과, 그리고 block과 균열간의 스킨도 고려할 수 있다. 본 모델은 fracture skin이 존재하지 않는 2차원의 경우에는 Hantush (1960)의 수정식 또는 Boulton과 Streltsova(1978)의 식과 일치

일정수두 상부경계를 가지는 이중공극 대수층내 부정류에 관한 프락탈모델

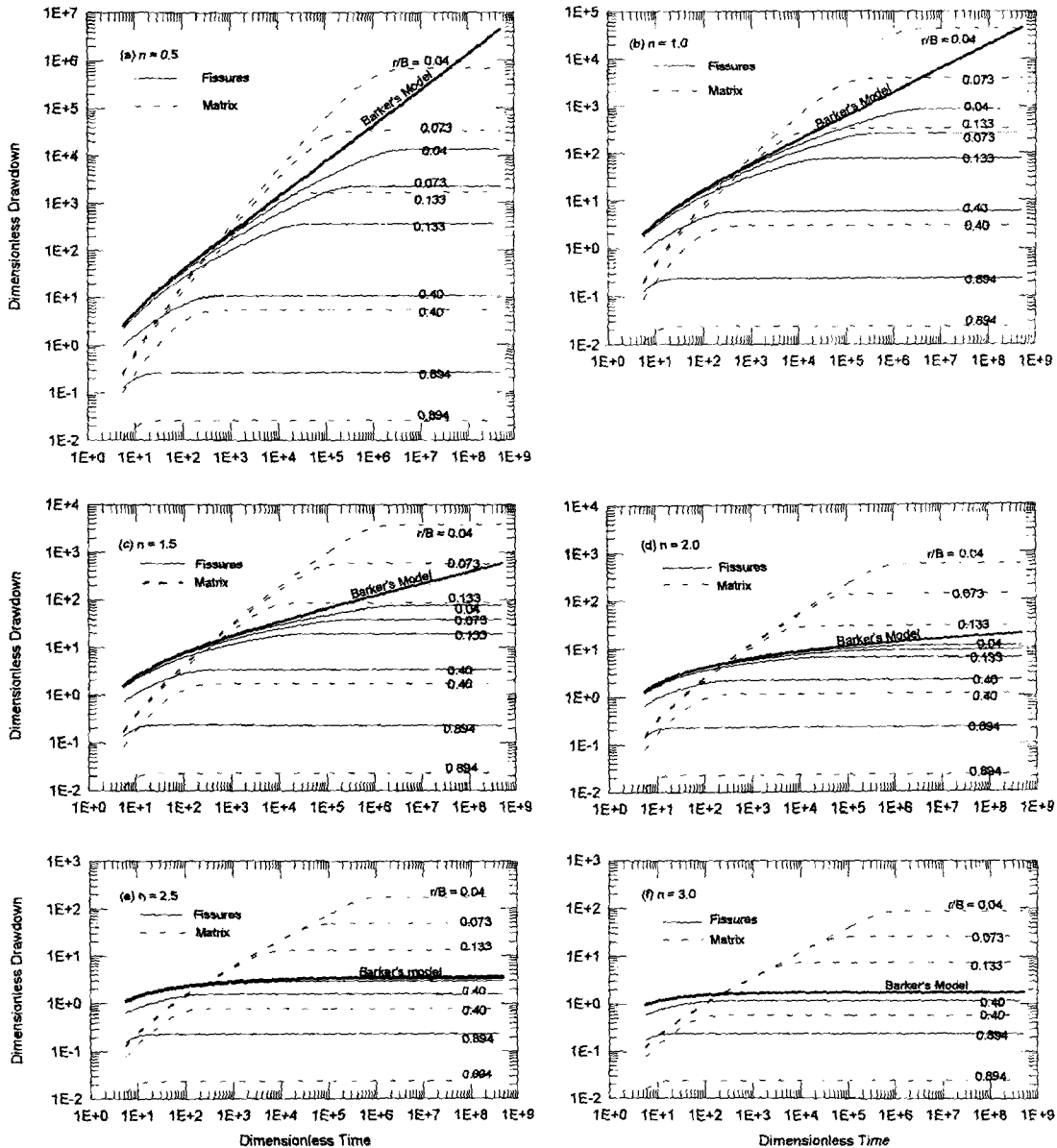


Figure 5. Selected type curves for drawdown at an observation well in the fissure and in the matrix block with different values of r/B and various flow dimensions ($W_e = 0$, $S_F = 0$ and $\omega = 0.091$).

하게 된다. 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3의 유동 차원과 몇가지 값의 r/B 또는 r_w/B 및 S_F 에 대해서 그리고 양수정과 균열내 또는 block내 관측정에 대해서 무차원의 시간에 대한 무차원의 수위강하 표준곡선이 작성되었다.

양수정과 균열내 관측정의 fracture skin의 영향(Figure 2, Figure 3)은 fracture skin이 크면 클수록 block으로부터의 지하수 공급이 방해받으므로 수위하강은 커지게 된다. 그리고, 양수 초기에는 우물저장 효과로 인해서 기울기가 1인 직선상으로 나타나고, 차원이 높아질수록 fracture skin의 효과가 작아져서 3차원(구상유동)에서는 지하수 유동이 fracture skin에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

누수의 영향(Figure 4, Figure 5)을 보면 누수효과가 커질수록

수위하강이 작아진다. 또한, 유동차원이 2차원보다 커지게 되면 누수효과에 의한 수위곡선의 차이가 작아지기 때문에 표준곡선 결정이 어려워진다. 그러나, 현재까지 우리나라의 균열암반 대수층의 연구결과(함세영, 1995)에 의하면 2차원보다 높은 차원을 가지는 경우는 많지 않은 것으로 나타난다. 또한 유동차원의 증가에 따른 수위변화를 보면 block내의 관측공에 비해서 균열내의 관측공은 누수에 의한 영향을 덜 받으며, 차원이 증가할수록 이러한 현상은 더욱더 두드러진다.

본 모델은 양수시간이 상당히 경과하면서 지하수위가 안정화되는 균열대수층의 수리상수를 Hantush식(1956)이나 Hantush의 수정식(1960)보다 정확히 산출할 수 있으며, Hamm과 Bidaux(1994)에 비해서 가압층 또는 block의 저류계수를 구할

수 있는 이점이 있다. 따라서, 본 모델은 현재 우리나라에서 많이 수행되고 있는 먹는샘물 환경영향평가조사에서 실시하고 있는 양수시험 분석에 활용될 수 있으며, 균열암반대수층의 수리상수를 보다 정확히 산출함으로써 먹는샘물의 양수량에 따른 정확한 수위강하를 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이, 현재 먹는샘물 환경영향평가조사에서 자료의 빈곤 때문에 수치모델링이 어려운 상황에서는 자연상태에 근접한 해석적 모델에 의해서 양수정의 수위강하를 예측하는 것이 더 합리적일 수도 있을 것이다.

사 사

이 연구는 부산대학교 학술연구조성비(연구정착금) 지원으로 이루어졌으며 연구비를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- 선우춘, 1989, Fractal 방법에 의한 fracture network의 분포 해석, 지질학회지, 25(4), p. 468-473.
- 함세영, 1995, 프랙탈 모델에 의한 한국의 균열대수층의 수리특성 (I), 지질학회지, 31(4), p. 467-481.
- Acuna, J. A. and Yortsos, Y. C., 1995, Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient, *Water Resour. Res.*, 31(3), p. 527-540.
- Allégre, C. J., Le Mouél, J.-L. and Provost, A., 1982, Scaling rules in rock fractures and possible implications for earthquake prediction, *Nature*, 297, p. 47-49.
- Amos, D. E., 1986, Algorithm 664: A portable package for Bessel functions of complex argument and nonnegative order, *ACM Trans. Math Software*, 12(3), p. 265-273.
- Barenblatt, G. E., Zheltov, I. P. and Kochina, I. N., 1960, Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, *Jour. Appl. Math. Mech. Engl. Transl.*, 24(5), p. 1286-1303.
- Barker, J. A., 1988, A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, *Water Resour. Res.*, 24(10), p. 1796-1804.
- Boulton, N. S. and Streltsova, T. D., 1977, Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation, *Jour. Hydr.*, 35, p. 257-269.
- Boulton, N. S. and Streltsova, T. D., 1978, Unsteady flow to a pumped well in a fissured aquifer with a free surface level maintained constant, *Water Resour. Res.*, 14(3), p. 527-532.
- Chang, J. and Yortsos, Y. C., 1988, Pressure transient analysis of fractal reservoirs, *SPE 18170*, p. 1-14.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1996, Dual-porosity fractal models for transient flow analysis in fissured rocks, *Water Resour. Res.*, 32(9), p. 2733-2745.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1994a, Ecoulements transitoires en géométrie fractale avec drainage : théorie et application, *C. R. Acad. Sci. Paris, série II*, 318(2), p. 227-233.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1994b, Stationary dual-porosity fractal model of groundwater flow in fractured aquifers, *The Jour. Eng. Geol.*, 4(2), p. 127-138.
- Hantush, M. S., 1956, Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers, *Trans. AGU*, 37(6), p. 702-714.
- Hantush, M. S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers, *Jour. Geophys. Res.*, 65(11), p. 3713-3725.
- Kazemi, H., 1969, Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distributions, *Trans. Soc. Pet. Eng. AIME*, 246, p. 451-462.
- Moench, A. F., 1984, Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, *Water Resour. Res.*, 20(7), p. 831-846.
- Stehfest, H., 1970, Algorithm 368, Numerical inversion of Laplace transforms, *Commun. ACM*, 13(1), p. 47-49.
- Streltsova, T. D., 1976, Hydrodynamics of groundwater flow in fractured formation, *Water Resour. Res.*, 12(3), p. 405-414.
- Thomas, A., 1987, Structure fractale de l'architecture des champs de fractures en milieu rocheux, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 304, Ser. 2, p. 181-186.
- Velde, B., Dubois, J., Moore, D. and Touchard, J., 1991, Fractal patterns of fractures in granites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104, p. 25-35.
- Warren, J. E. and Root, P. J., 1963, The behavior of naturally fractured reservoirs, *SPEJ*, 3(2), p. 245-255.