

매트릭스 블록선형유동에 관한 이중공극 모델

Dual-Porosity Models with Linear Flow Pattern

함세영(Se-Yeong Hamm)* · 성익환(Ig-Hwan Sung)**

요약 : 본 연구에서는 이중공극매체(정상류의 이중공극매체와 부정류의 이중공극매체)내에 중요한 수직구조대(단층이나 균열대)가 존재할 때, 이 수직구조대내에 위치하는 양수정으로부터 양수에 따른 이중공극매체의 균열단위내 선형유동에 대한 이론을 다루었다. 이때 수직구조대는 무한소 또는 일정 너비를 가지며, 수직구조대의 수리전도도는 매우 크고, 비저유율은 매우 작은 것으로 가정한다. 이와 같은 선형유동의 경우에 양수정과 관측정에 대한 이론곡선이 제시되었다. 양수정의 이론곡선은 우물저장효과와 미소한 두께의 우물손실효과를 고려한 곡선이며, 관측정의 경우는 선원해(line source solution)에 의한 이론곡선이다.

Abstract : This study deals with linear flow pattern in steady-state or transient dual-porosity media with a vertical geologic structure such as fault, fracture zone, etc. A pumping well is located in the vertical structure of infinitesimal or finite width with high hydraulic conductivity and negligible specific storage. Selected type curves on a pumping well and observation wells in the fractured system and the matrix block are provided. The type curves on the pumping well considers both wellbore and well-loss effects.

서 론

결정질 암석에는 여러 가지 형태의 균열대나 단층대가 발달되어 있다. 이러한 결정질 암석내 지하수 유동을 고찰할 때는 균열이 비교적 잘 발달되고 서로 연결되어 있어서 지하수가 잘 흐를 수 있는 부분과 균열의 발달이 미약하고 연결성도 낮아서 지하수가 유동하기 어려운 부분으로 나누어 모식화하는 이중공극모델이 널리 알려져 있다. 이중공극모델(Barenblatt 외, 1960; Warren and Root, 1963; Kazemi, 1969; Boulton과 Streltsova, 1977)은 매트릭스 블록(matrix block)으로부터 균열쪽으로 흐르는 지하수유동이 정상류(steady-state flow)나 부정류(transient flow)나에 따라서 정상류의 이중공극모델(Barenblatt 외, 1960; Warren and Root, 1963)과 부정류의 이중공극모델(Kazemi, 1969; Boulton과 Streltsova, 1977; Huyakorn *et al.*, 1983)이다. 이중공극모델은 균열암반내 발달되는 대수층을 균열단위와 매트릭스 블록단위로 모식화한 것이다. 이때 균열단위는 이차공극으로서 지하수유동의 주요 통로가 되며, 매트릭스 블록단위는 일차공극으로서 지하수를 저장하는 역할을 한다.

한편, 암반내에는 수직 또는 거의 수직 방향의 주요 균열대가 발달되어 있는 경우가 있으며, 따라서 이를 균열암반에 대해서는 유한하거나 또는 무한한 수리전도도의 무한한 길이 또는 유한한 길이의 수직 균열 모델이 연구되었다(Daniel, 1954; Gringarten and Witherspoon, 1972; Jenkins and Prentice, 1982; Cinco-Ley and Samaniego-V., 1981; Sen, 1986, 1992). 함세영 외(1998)

는 수직 균열대내에 개발된 우물에서 행한 양수시험결과와 지질조사 자료를 이용하여 지하수의 선형유동을 해석하였다.

결정질암에는 상기한 이중공극체계와 주요한 수직 구조대가 함께 나타나는 경우도 있다. 이와 같은 경우에는 선형유동모델이나 이중공극모델 중 어느 하나만으로는 실제 지하수계를 정확하게 해석할 수 없다. 본 논문에서는 선형유동모델과 이중공극모델(정상류의 이중공극모델, 상·하부가 불투수경계로 되어 있는 부정류의 이중공극모델, 하부가 불투수경계 그리고 상부가 일정수두경계로 되어 있는 부정류의 이중공극모델)의 통합모델을 제안하였으며 양수시험에 따른 수위하강의 표준곡선을 제시하였다.

정상류의 이중공극매체에 수직구조대가 존재할 때

이론적인 배경

정상류의 이중공극 모델(Barenblatt 외, 1960; Warren and Root, 1963; Hamm and Bidaux, 1994)은 높은 투수율과 낮은 비저유율을 가지는 균열(fracture)과 낮은 투수율과 높은 비저유율을 가지는 매트릭스 블록(matrix block)들로 이루어진 이중공극 대수층을 모식화한 것이다(Figure 1). 이 모델에서 양수정을 통한 지하수 유출은 균열을 따라서 일어나며, 블록은 균열에 물을 보충하여 주는 역할을 한다. 이 때 블록으로부터 균열로 보충되는 수량(v)은 블록의 수두(h_2)와 균열의 수두(h_1)의 차에 비례한다. 균열단위(fracture unit)와 매트릭스 블록단위는 대수층의 대표미소체적(REV, representative elementary volume)이 될 수 있을 만큼 충분히 큰 규모가 되어야 한다.

이중공극매체와 주요 수직구조대의 체계에서 양수정이 주요 수직구조대내에 위치할 때 다음과 같은 가정을 둔다. 즉, 수직구조대는 하나의 연장된 우물(extended well)의 역할을 하며 대

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

** 한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 30, Kajung-Dong, Yusung-Ku, Taejon 305-350, Korea)

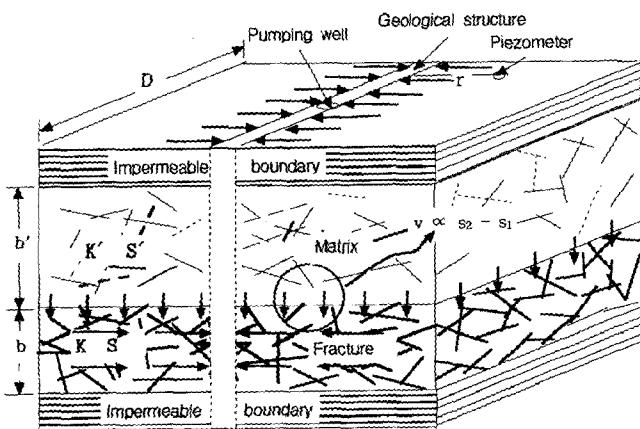


Figure 1. Pseudo-steady state dual-porosity model with vertical structure.

수층에서 수직구조대쪽으로 직각 방향으로 지하수의 선형 흐름(일차원 흐름)이 일어나게 된다(Figure 1). 수직구조대의 폭은 무한소이거나(Jenkins and Prentice, 1982), 유한한 폭을 가진다(Sen, 1986). 수직구조대의 연장은 무한하고, 이중공극 균열단위를 완전 관통하고 있다고 가정한다. 수직구조대의 수리전도도는 무한하며, 구조대내에서는 지하수 흐름의 마찰저항이 없다고 가정한다. Cinco-Ley and Samaniego-V.(1981)는 수직구조대의 고유투수율과 폭의 곱이 암반의 고유투수율과 균열대연장의 반의 곱의 300배 이상이면 수직 균열대의 수리전도도는 무한하다고 가정하였다. 수직구조대의 저류계수는 0이며 따라서 구조대내에서는 양수정쪽으로 흐름이 없다. 이중공극 균열단위는 횡적으로 무한대이고, 균질하고, 등방성이다. 또한, 일정한 공경을 가지는 양수정은 우물저장효과와 우물손실효과를 가진다(Hamm and Bidaux, 1996, 1994).

정상류의 이중공극 매체내에 수직구조대가 존재할 때의 수위하강 평형식은

$$K \frac{\partial^2 s_1}{\partial r^2} = S_s \frac{\partial s_1}{\partial t} + v \quad (1)$$

와 같다. 여기서, K는 균열의 수리전도도($L^2 T^{-1}$), S_s 는 균열의 비저유율(L^{-1}), s_1 는 균열의 수위강하(L), r 은 지하수 유동방향을 따라 관측정에서 수직구조대까지의 거리(L), v 는 매트릭스 블록으로부터 공급되는 단위체적당 단위시간당 지하수량(T^{-1})이다. 그리고, $v = -S_s (\partial s_1 / \partial t)$ 와 같다. 여기서, s_2 는 매트릭스 블록내의 수위강하(L)이다.

매트릭스 블록으로부터 균열로의 흐름이 정상류이므로, $v = \kappa K' (s_2 - s_1)$ 이다. 따라서,

$$\kappa K' (s_2 - s_1) = -S_s \frac{\partial s_1}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, κ 는 매트릭스 블록의 기하학적 요소(geometry factor, L^2)이다.

또한 양수에 따른 우물내의 저장량의 변화는

$$W_s \frac{\partial s_w}{\partial t} = Q + 2KD \left(\frac{\partial s_1}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (3)$$

여기서, Q 는 양수량($L^3 T^{-1}$), W_s 는 양수정의 저장계수(L^2), s_w 는 양수정에서의 수위강하(L), r_w 는 양수정의 반경, D 는 대수층의 횡방향의 발달 범위(L)로서 두 불투수 경계 사이의 거리이다(Figure 1).

만약 공벽과 대수층간에 미소두께의 우물손실이 존재한다면, 양수정내의 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

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

이고, 경계조건은 양수시작후 임의의 시간 t 에 대해서

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

이다.

상기 식들에 다음과 같은 무차원의 매개변수를 도입하자.

$$t_D = \frac{4Kt}{(S_s + S_s')r_w^2} \quad (7)$$

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

$$\lambda = \frac{\kappa K' r_w^2}{K} \quad (9)$$

$$\omega = \frac{S_s}{S_s + S_s'} \quad (10)$$

$$s_{ID} = \frac{4\pi^{1/2} K D b}{Q r_w} s \quad (i=1, 2, w) \quad (11)$$

$$W_{sD} = \frac{W_s}{\pi^{1/2} b^2 r_w (S_s + S_s')} \quad (12)$$

따라서, (1), (2), (3), (4)식을 무차원 식으로 고쳐서 Laplace 변환시키면

$$\frac{d^2 \tilde{s}_{1D}}{dr_D^2} = 4p\omega \tilde{s}_{1D} + 4p(1-\omega) \tilde{s}_{2D} \quad (13)$$

$$4p(1-\omega) \tilde{s}_{2D} = \lambda(\tilde{s}_{1D} - \tilde{s}_{2D}) \quad (14)$$

$$p W_{sD} \tilde{s}_{wD} = \frac{1}{p} + \frac{1}{2\pi^{1/2}} \left(\frac{d\tilde{s}_{1D}}{dr_D} \right)_{r_D=1} \quad (15)$$

$$\tilde{s}_{wD}(p) = \tilde{s}_{1D}(1, p) - s_f \left(\frac{d\tilde{s}_{1D}}{dr_D} \right)_{r_D=1} \quad (16)$$

과 같이 된다. 여기서, p 는 Laplace 변수이다.

(14)식으로부터 매트릭스 블록 내의 수위강하는

$$\tilde{s}_{2D} = \frac{\lambda \tilde{s}_{1D}}{4p(1-\omega) + \lambda} \quad (17)$$

와 같다.

Laplace domain에서 양수정의 수위강하(우물저장효과와 우물손실효과를 고려함)과 균열대내의 수위강하(우물저장효과와 우물손실효과를 고려하지 않음)의 일반 해는 Barker식(1988)의 수위하강을 구하는 과정과 같으므로

$$\bar{s}_{WD} = \left\{ p \left[p W_{sD} + \frac{1}{2\pi^{1/2}} \frac{1}{K_{-0.5}^0(\sqrt{4p}) + s_f} \right] \right\}^{-1} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \bar{s}_{1D} &= \left\{ p \left[p W_{sD} + \frac{1}{2\pi^{1/2}} \frac{1}{K_{-0.5}^0(\sqrt{4p}) + s_f} \right] \right\}^{-1} \\ &\quad \frac{r_D^{1/2} K_{1/2}(r_D \sqrt{4p})}{K_{1/2}(\sqrt{4p}) + s_f \sqrt{4p} K_{-1/2}(r_D \sqrt{4p})} \end{aligned} \quad (19)$$

과 같다. 여기서,

$$\sigma^2 = \frac{4p[4p\omega(1-\omega) + \lambda]}{4p(1-\omega) + \lambda} \quad (20)$$

또한, $K_v(z)$ 는 2종 v계 변형베셀함수(modified Bessel function of second kind and order v)^o고,

$$K_{-1/2}^{1/2}(z) = \frac{K_{1/2}(z)}{z K_{-1/2}(z)} \quad (21)$$

이다.

(19)식에서 양수정의 우물저장효과와 우물손실효과를 무시하고, 양수정의 우물반경에 비해서 양수정과 관측정 사이의 거리가 충분히 클 때, (19)식을 다음과 같이 선원해(infinitesimal source solution)로 고칠 수 있다:

$$\bar{s}_{1D} = \frac{2^{1.5} K_{1/2}(\sqrt{4p})}{p (4p)^{1/4}} \quad (22)$$

이다. 이 때, 우리가 관심을 가지는 것은 관측정에서의 수위하강 값이므로 무차원 변수에서 양수정의 반경보다는 관측정과 양수정간의 거리(r)를 고려하는 것이 더 낫다. 따라서, 무차원 변수 (7), (9), (11)을

$$t_D = \frac{4Kt}{(S_s + S_s')r^2} \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{\kappa K' r^2}{K} \quad (24)$$

$$s_{iD} = \frac{4\pi^{1/2} K D b}{Q r} s \quad (i = 1, 2) \quad (25)$$

로 수정할 수 있다. (17), (18), (19), (22)식은 Stehfest(1970) algorithm에 의해서 실수영역으로 변환시킬 수 있으며, $K_{1/2}(z)$ 는 Abramowitz and Stegun(1972)을 이용하여 계산된다.

본 모델에서 구할 수리적 매개변수는 KDb , S_sDb , $K'Db'$, $S_s'Db'$, W_s (우물의 저장계수, L^2), s (우물손실계수, 비차원), λ (블록과 균열간의 cross-flow계수, 무차원), ω (균열과 블록의 비저유율의 합에 대한 균열의 비저유율의 비)이다. 만약, D 가 알려진다면 투수량계수(Kb)와 저류계수($S_s b$)가 구해진다.

표준곡선

정상류의 이중공극 모델의 경우에 양수정의 수위강하곡선을 보면, 양수초기(1단계)에는 우물저장효과와 우물손실효과에 의해서 양대수방안지상의 곡선의 기울기가 1을 나타내고, 이어서 이중공극 균열단위로부터의 지하수 유입이 일어나게 된다(Figure 2). 시간이 경과하면서 블록단위로부터 지하수 공급이 늘어나면서 곡선의 기울기가 초기 단계보다 더 완만해지는 전이단계

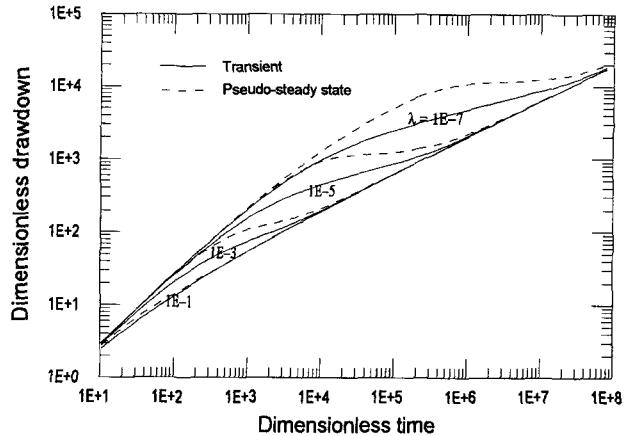


Figure 2. Pseudo-steady and transient dual-porosity models with vertical structure: influence of the interporosity flow coefficient λ on the drawdown response at the pumping well ($\omega=0.01$, $S_F=0$ for transient dual-porosity model).

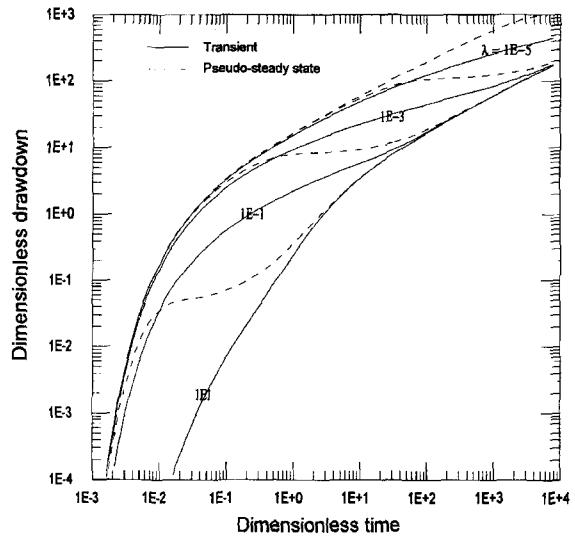


Figure 3. Pseudo-steady and transient dual-porosity models with vertical structure: influence of the interporosity flow coefficient λ on the drawdown response at an observation well in the fissures ($\omega=0.01$; $S_F=0$ for transient dual-porosity model).

(2단계)에 들어가게 되고, 3단계에서는 균열단위와 블록단위가 하나의 통합 지하수체로 거동하게 되면서 곡선의 기울기는 일차원흐름(선형유동)의 특징인 기울기 0.5를 나타내게 된다. 균열단위내 관측정의 지하수위강하는 균열단위내의 지하수유입 단계(1단계), 전이단계(2단계), 통합 지하수체 단계(3단계)로 구분된다(Figure 3). 또한 양수정이나 균열단위의 관측정에서는 λ 값이 클수록 수위강하는 상대적으로 작게 일어나고 있다.

불투수 상부경계를 가지는 이중공극매체에 수직구조대가 존재할 때(부정류의 경우)

이론적 배경

부정류의 이중공극 모델(Kazemi, 1969; Boulton과 Streletsova,

1977; Hamm and Bidaux, 1996)도 정상류의 이중공극 모델과 같이 높은 투수율과 낮은 비저유율을 가지는 균열과 낮은 투수율과 높은 비저유율을 가지는 매트릭스 블록으로 이루어진 대수층을 모식화한 것이지만, 매트릭스 블록에서 균열로 공급되는 수량(v)은 블록내의 수두 h_2 와 균열-블록의 경계면으로부터 매트릭스 블록 내로의 연직높이 z 의 기울기($\partial h_2 / \partial z$)에 비례 한다(Figure 4). 매트릭스 블록과 균열대 사이에 균열스킨(fracture skin)이 존재하는 경우가 있다. 균열스킨은 블록으로부터 균열로의 흐름을 방해함으로서, 균열내 수위가 더 떨어지게 하는 결과를 가져온다. 균열스킨은 광물의 침전이나 화학적인 변질작용으로부터 유래할 수 있다.

Boulton과 Streltsova(1977)에 의하면 매트릭스 블록내의 수위하강에 관한 평형방정식은

$$\frac{\partial^2 s_2}{\partial z^2} = \frac{S_s' \partial s_2}{K' \partial t} \quad (26)$$

과 같다. 여기서, K' 는 매트릭스 블록의 수리전도도($L T^{-1}$), S_s' 는 매트릭스 블록의 비저유율(L^{-1}), s_2 는 매트릭스 블록내의 수위강하(L), z 는 매트릭스 블록내의 한 점으로부터 매트릭스 블록과 균열의 경계면까지의 거리(L), t 는 양수경과시간을 의미한다.

한편, 균열대내의 수위하강식은 (1)식과 같다. 여기서, v 는 matrix로부터 공급되는 단위체적당 지하수량(T^{-1})으로서, $v = -(K'/b') (\partial s_2 / \partial z)_{z=0}$ 와 같다.

양수에 따른 우물내의 저장량의 변화는 (3)식과 같다. 만약 공벽과 대수층간에 미소두께의 우물손실이 존재한다면, 양수정내의 수위강하는 $r = r_w$ 에서의 대수층의 수위강하와 다를 것이다(식 (4)). 초기조건과 경계조건은 (5), (6)과 같다.

상기 식들에 무차원의 매개변수 (7), (8), (10), (11), (12)식과

$$z_D = r/b' \quad (27)$$

$$\lambda = \frac{K' r_w^2}{K b'^2} \quad (28)$$

을 이용하여 (1), (26), (3), (4)식을 무차원식으로 바꾸고, 이식들을 Laplace 변환시키면 (19), (20)식 및

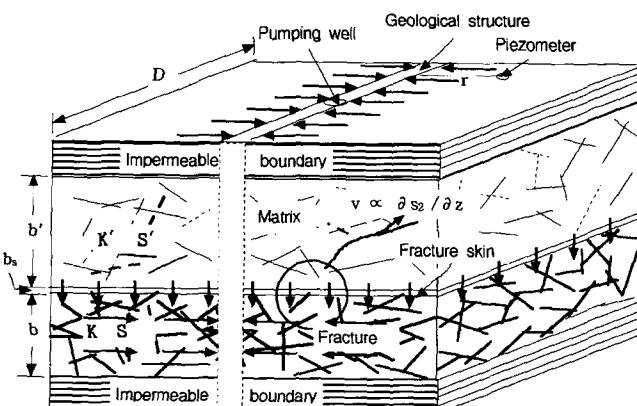


Figure 4. Transient dual-porosity model with vertical structure and impermeable upper boundary of matrix block.

$$\frac{d^2 \bar{s}_{2D}}{dz_D^2} = \frac{4p(1-\omega)}{\lambda} \bar{s}_{2D} \quad (29)$$

$$\frac{d^2 \bar{s}_{1D}}{dr_D^2} = 4p\omega \bar{s}_{1D} - \lambda \left(\frac{d\bar{s}_{2D}}{dz_D} \right)_{z_D=0} \quad (30)$$

와 같이 된다. Laplace domain에서 (29)식의 일반 해는

$$\bar{s}_{2D}(z_D, p) = A \cosh(\eta z_D) + B \sinh(\eta z_D) \quad (31)$$

와 같다. 여기서,

$$\eta^2 = \frac{4p(1-\omega)}{\lambda} \quad (32)$$

이다. 매트릭스 블록의 상부경계가 불투수경계이므로, $t \geq 0$ 일 때, $z_D = 1$ 에서

$$\frac{d\bar{s}_{2D}}{dz_D} = 0 \quad (33)$$

이다. 그러므로,

$$B = -A \tanh(\eta) \quad (34)$$

이다.

만약, 균열스킨이 존재한다면(Moench, 1984),

$$s_2 = s_1 + b' S_F \left(\frac{\partial s_2}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (35)$$

이다. 여기서, 무차원의 균열스킨(fracture skin)은 $S_F = K'b_s/K_s b'$ 이고, K_s 와 b_s 는 각각 균열스킨의 수리전도도($L T^{-1}$)와 두께(L)이다. 만약, 균열스킨이 존재하지 않는다면, 균열과 매트릭스 블록의 경계에서

$$s_2 = s_1 \quad (36)$$

이다.

균열스킨은 점토광물의 침전 또는 화학적인 변질의 산물에 의해서 만들어지는 투수율이 낮은 부분이다. 이러한 균열스킨은 매트릭스 블록과 균열사이에 존재하며 매트릭스 블록의 수리전도도보다 낮은 수리전도도를 가지므로 매트릭스 블록으로부터 균열쪽으로의 흐름을 방해하는 역할을 한다. (35)식을 무차원식으로 고치고 Laplace 변환시키면

$$\bar{s}_{2D} = \bar{s}_{1D} + S_F \left(\frac{d\bar{s}_{2D}}{dz_D} \right)_{z_D=0} \quad (37)$$

과 같이 된다. 그런데, $z_D = 0$ 일 때

$$\left(\frac{d\bar{s}_{2D}}{dz_D} \right)_{z_D=0} = A \eta \tanh(\eta) \quad (38)$$

이고,

$$\bar{s}_{2D}(z_D = 0) = A \quad (39)$$

이므로,

$$A = \frac{\bar{s}_{1D}}{1 + S_F \eta \tanh(\eta)} \quad (40)$$

그러므로, (31), (34), (40)식으로부터,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D}}{1 + S_F \eta \tanh(\eta)} [\cosh(\eta z_D) - \tanh(\eta) \sinh(\eta z_D)] \quad (41)$$

이다. 매트릭스 블록내 수위하강의 평균값을 구하기 위해서 (41)식을 $0 \leq z_D \leq 1$ 에 대해서 적분을 하면,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D} \tanh(\eta)}{\eta [1 + S_F \eta \tanh(\eta)]} \quad (42)$$

이 된다.

Laplace domain에서 양수정의 수위강하(우물저장효과와 우물손실효과를 고려함)과 균열대내의 수위강하(우물저장효과와 우물손실효과를 고려하지 않음)의 일반 해는 각각 (18), (19)식과 같다. 여기서,

$$\sigma^2 = 4p\omega + \frac{\lambda\eta \tanh(\eta)}{1 + S_F \eta \tanh(\eta)} \quad (43)$$

이다. (19)식에서 양수정의 우물저장효과와 우물손실효과를 무시하고, 양수정의 우물반경에 비해서 양수정과 관측정 사이의 거리가 충분히 클 때, (19)식을 다음과 같이 (22)식과 같이 선원해(infinitesimal source solution)로 고칠 수 있다. (18), (19), (22), (42)식은 Stehfest(1970) algorithm에 의해서 실수영역으로 변환시킬 수 있으며, $K_{1/2}(z)$ 는 Abramowitz and Stegun(1972)을 이용하여 계산된다.

본 모델에서 구할 수리적 매개변수는 KDb , S_sDb , $K'Db'$, $S_s'Db'$, W_s (우물의 저장계수, L^2), s_r (우물손실판수, 무차원), λ (블록과 균열간의 cross-flow 계수, 무차원), ω (균열과 블록의 비저유율의 합에 대한 균열의 비저유율의 비)이다. 만약, D 가 알려진다면 투수량계수(Kb)와 저류계수(S_sb)가 구해진다. 또한 균열과 블록간에 균열스킨이 존재할 때는 S_F (균열스킨계수, 무차원)가 결정되어야 한다.

표준곡선

부정류의 이중공극 모델의 양수정의 수위강하곡선도 정상류의 경우와 비슷하게 양수초기(1단계)에는 우물저장효과와 우물손실효과에 의해서 양대수방안지상의 곡선의 기울기가 1을 나타내고, 시간이 더 경과하면서 블록단위로부터 지하수 공급량이 점차 늘어나면서 곡선의 기울기가 완만해지는 전이단계(2단계)에 들어가게 되고, 3단계에서는 균열단위와 블록단위가 하나의 통합 지하수체로 거동하게 되면서 곡선의 기울기는 일차원흐름의 특징인 기울기 0.5를 나타내게 된다(Figure 2). 균열단위내 관측정의 지하수위강하는 균열단위내의 지하수유입단계(1단계), 전이단계(2단계), 통합 지하수체 단계(3단계)로 구분된다(Figure 3). 그러나, 부정류의 이중공극 모델의 양수정과 관측정의 전이단계의 곡선의 기울기는 정상류의 이중공극 모델의 보다 더 급하고, 통합 지하수체 단계에서는 서로 일치하게 된다. 또한 양수정이나 균열단위의 관측정에서는 λ 값이 풀수록 수위강하는 상대적으로 작게 일어나고 있다. 그리고, 같은 λ 값에 대해서는 정상류의 이중공극 모델이 부정류의 경우 보다 더 큰 수위하강을 보여주고 있다.

일정수두 상부경계를 가지는 이중공극매체에 수직구조대가 존재할 때(부정류의 경우)

이론적 배경

일정수두 상부경계를 가지는 부정류의 이중공극 모델(Boulton과 Streletsova, 1978)은 균열암반대수층의 이중공극 모델에서 매트릭스 블록의 상부경계가 일정수두에 의해서 유지되거나, 누수 피압대수층(Hantush, 1960)과 같이 저류성을 가지는 가압층이 일정수위의 자유면대수층 하부에 존재하는 경우이다(Figure 5). 매트릭스 블록은 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 매트릭스 블록의 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 Bidaux의 식(1994)에 비해서 가압층 또는 매트릭스 블록의 저류계수를 구할 수 있는 이점이 있다.

부정류의 이중공극매체내 매트릭스 블록의 상부경계가 일정수두경계로 되어 있을 때

$$\bar{s}_{2D}(t \geq 0, z_D = 1) = 0 \quad (44)$$

이다. 그러므로,

$$B = -A \coth(\eta) \quad (45)$$

이다.

만약, 균열스킨(fracture skin)이 존재한다면, $z_D = 0$ 일 때

$$\left(\frac{ds_{2D}}{dz_D} \right)_{z_D=0} = -A \eta \coth(\eta) \quad (46)$$

이고

$$\bar{s}_{2D}(z_D = 0) = A \quad (47)$$

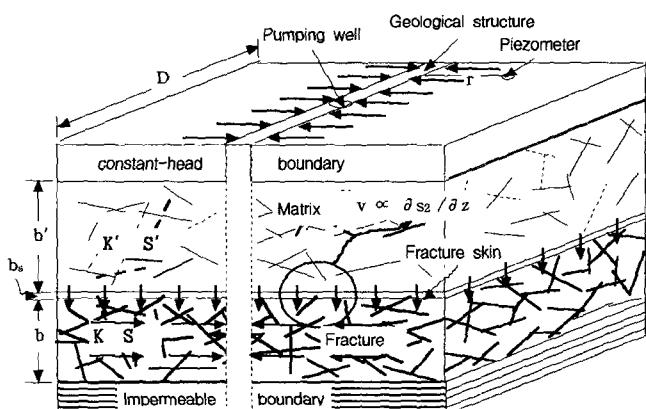


Figure 5. Transient dual-porosity model with vertical structure and constant-head upper boundary of matrix block.

이므로,

$$A = \frac{\bar{s}_{1D}}{1 + S_F \eta \coth(\eta)} \quad (48)$$

그러므로, (31), (45), (48)식으로부터,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D}}{1 + S_F \eta \coth(\eta)} [\cosh(\eta z_D) - \coth(\eta) \sinh(\eta z_D)] \quad (49)$$

이다. 매트릭스 블록내 수위하강의 평균값을 구하기 위해서 (49)식을 $0 \leq z_D \leq 1$ 에 대해서 적분을 하면,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D}[\coth(\eta) - 1]}{\eta \sinh(\eta)[1 + S_F \eta \coth(\eta)]} \quad (50)$$

이 된다. 만약, 균열스킨이 존재하지 않는다면,

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D}[\coth(\eta) - 1]}{\eta \sinh(\eta)} \quad (51)$$

이 된다. Laplace domain에서 양수정의 수위강하(우물저장효과와 우물손실효과를 고려함)과 균열대내의 수위강하(우물저장효과와 우물손실효과를 고려하지 않음)의 일반 해는 각각 (18), (19)식과 같다. 여기서,

$$\sigma^2 = 4p\omega + \frac{\lambda \eta \coth(\eta)}{1 + S_F \eta \coth(\eta)} \quad (52)$$

이다. (19)식에서 양수정의 우물저장효과와 우물손실효과를 무시하고, 양수정의 우물반경에 비해서 양수정과 관측정 사이의 거리가 충분히 클 때, (19)식을 (22)식과 같이 선원해(infinitesimal source solution)로 고칠 수 있다. (18), (19), (22), (51)식은 Stehfest algorithm(1970)에 의해서 실수영역으로 변환시킬 수 있으며, $K_{1/2}(z)$ 는 Abramowitz and Stegun(1972)을 이용하여 계산된다.

본 모델에서 구할 수리적 매개변수는 KDb , S_sDb , $K'Db'$, $S_s'Db'$, W_s (우물의 저장계수, L^2), s_f (우물손실판수, 무차원), λ (블록과 균열간의 cross-flow계수, 무차원), ω (균열과 블록의 비저유율의 합에 대한 균열의 비저유율의 비)이다. 또한 균열과 블

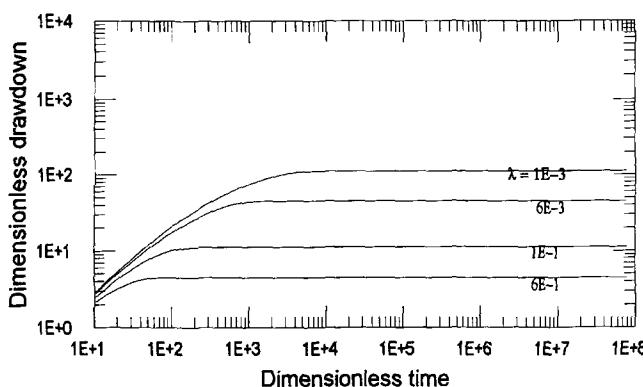


Figure 6. Transient dual-porosity models with vertical structure and constant-head upper boundary of the matrix: influence of the interporosity flow coefficient λ on the drawdown response at the pumping well ($\omega = 0.01$, $S_F = 0$).

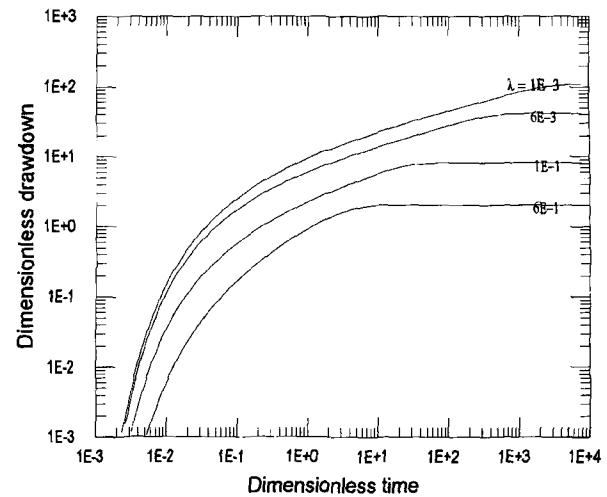


Figure 7. Transient dual-porosity models with vertical structure and constant-head upper boundary of the matrix: influence of the interporosity flow coefficient λ on the drawdown response at an observation well in the fissures ($\omega=0.01$, $S_F=0$).

록간에 균열스킨이 존재할 때는 S_F (균열스킨계수, 무차원)를 구하여야 한다.

표준곡선

블록단위의 상부에 일정수두경계가 존재할 때의 이중공극 모델의 양수정의 수위강하곡선(Figure 6)은 양수초기(1단계)에는 우물저장효과와 우물손실효과를 나타내고 2단계에는 균열단위로부터의 지하수 유입이 일어나게 된다. 3단계에서는 일정수두 경계로부터의 지하수공급에 의해서 지하수위가 안정된다. 관측정이 균열단위내에 위치하는 경우에는 양수초기에는 이중공극 모델의 선형유동을 보이다가 양수 후기로 가면서 일정수두경계로부터의 지하수공급에 의해서 지하수위가 안정된다.

결론 및 토의

본 연구에서는 선형유동모델과 이중공극모델(정상류의 이중공극모델, 상·하부가 불투수경계로 되어 있는 부정류의 이중공극모델, 하부가 불투수경계 그리고 상부가 일정수두경계로 되어 있는 부정류의 이중공극모델)이 결합된 모델을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

정상류의 이중공극 모델의 경우에 양수정의 수위강하곡선을 보면 양수초기에는 우물저장효과와 우물손실효과에 의해서 양대수방안지상의 곡선의 기울기가 1을 나타내고 그 다음에는 이중공극 균열단위로부터의 지하수 유입이 일어나게 된다. 시간이 경과하면서 매트릭스 블록으로부터의 지하수 공급이 늘어나면서 곡선의 기울기가 초기 단계보다 더 완만해지는 전이단계에 들어가게 되고, 양수시간이 더 경과하게 되면 이중공극 균열과 매트릭스 블록이 하나의 통합 지하수체로 거동하게 되면서 곡선의 기울기는 일차원흐름의 특징인 기울기 0.5를 나타내게 된다. 균열단위내에 관측정이 위치하는 경우에는 균열단위의 영향을 많이 받는 단계(1단계), 전이단계(2단계), 그리

고 통합 지하수체 단계(3단계)로 구분된다.

부정류의 이중공극 모델의 상부 매트릭스 블록단위의 경계가 불투수경계일 때, 양수정과 관측정의 수위강하곡선은 정상류의 경우와 비슷한 곡선의 형태를 보여준다. 그러나, 전이단계의 기울기는 정상류의 곡선보다 더 급하다. 또한 정상류의 이중공극 모델에서처럼 양수정이나 균열단위의 관측정에서는 λ 값이 허수록 수위강하는 상대적으로 작게 일어나고 있다. 그러나, 같은 λ 값에 대해서 정상류의 이중공극 모델이 부정류의 이중공극 모델보다 더 큰 수위하강을 보여주고 있다.

일정수두경계가 존재할 때의 부정류의 이중공극 모델의 양수정의 수위강하곡선은 양수초기에는 우물저장효과와 우물순실효과에 의해서 양대수방안지상의 곡선의 기울기가 1을 나타내고 그 다음에는 이중공극 균열단위로부터의 지하수 유입이 일어나게 된다. 마지막 단계에서는 일정수두경계로부터의 지하수공급에 의해서 지하수위가 안정된다. 균열단위내 관측정에서는 양수초기에는 이중공극 모델의 선형유동을 보이다가 양수후기로 가면서 일정수두경계로부터의 지하수공급에 의해서 지하수위가 안정된다.

균열암반은 투수성이 높고 저류성이 낮은 균열부분과 투수성이 낮고 저류성이 높은 매트릭스 블록으로 이루어져 있는 경우가 많으며, 이 때는 이중공극 모델이 적용된다. 또한, 균열암반내에 하나의 주요한 수직적인 구조대가 존재하는 경우에는 이 구조대를 따라서 지하수가 유동한다. 이 구조대의 투수성은 매우 높고 저류성은 매우 낮다. 실제로 야외 지질조사 및 현장수리시험에 의하면, 수직 구조대가 주요한 지하수 통로 역할을 하는 것이 알려져 있다(함세영 외, 1998). 이런 경우에는 선형유동 모델을 적용하게 된다. 그러나, 균열암반에는 중요한 수직구조대와 층상의 이중공극(균열대와 블록)이 동시에 발달되어 있는 경우가 있으며, 이 때는 수직구조대 및 이중공극매체의 통합모델을 적용함으로써 유체의 흐름을 정확하게 해석할 수 있다. 수직구조대 및 층상의 균열대와 매트릭스 블록의 발달, 그 연장 및 방향 등은 야외 지질조사, 지구물리탐사 및 공내검증 등을 통하여 확인할 수 있다.

사사

이 연구는 과학기술부와 한국자원연구소의 지원으로 이루어졌으며, 연구를 지원해주신 관계기관에 감사드린다.

참고문헌

- 함세영, 1997, 일정수두 상부경계를 가지는 이중공극 대수층내 부정류에 관한 프락탈 모델, 지하수환경, 4(2), p. 95-102.
- 함세영, 김형찬, 임정웅, 1998, 수직 지질구조에 의해서 지배되는 암반지하수 유동의 수리적 성질과 그 예, 지하수환경, 5(2), p. 101-109.
- Abramowitz, M. and Stegun, I. A. 1972, Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables, 8th ed., Dover Publications, Inc., New York, NY., 1046p.
- Bangoy, L. M., Bidaux, P., Drogue, C., Plegat, R. and Pistre, S. 1992, A new method of characterizing fissured media by pumping tests with observation wells, J. Hydrol., 138, p. 77-88.
- 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.
- Cinco-Ley, H. and Samaniego-V., F., 1981, Transient pressure analysis for fractured wells, Jour. Pet. Tech., 33(Sept.), p. 1749-1766.
- Daniel, E. J., 1954, Fractured reservoirs of Middle East, Bull. Am. Assoc. Pet. Geol., 38(5), p. 774-815.
- Ferris, J. G., Knowles, D. B., Brown, R. H. and Stallman, R. W., 1962, Theory of aquifer tests. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1536-E, p. 60-174.
- Gringarten, A. C. and Ramey, H. J., 1973, The use of source and Green's functions in solving unsteady flow problems in reservoirs, Soc. Pet. Eng. Jour., p. 285-296.
- Gringarten, A. C. and Ramey, H. J., 1974, Unsteady state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry, Soc. Pet. Eng. Jour., p. 413-426.
- Gringarten, A. C. and Witherspoon, P. A., 1972, A method of analyzing pump test data from fractured aquifers, in Symposium "Percolation Through Fissured Rock", Proceedings, pp. T3B1-T3B6, Dtsch. Gesell., Essen, Germany.
- Kazemi, H., 1969, Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distributions, Trans. Soc. Pet. Eng. AIME, 246, p. 451-462.
- 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., 1994, 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. Geophy. Res., 65(11), p. 3713-3725.
- Huyakorn, P. S., Lester, B. H. and Faust, C. R., 1983, Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers, Water Resour. Res., 19(4), p. 1019-1035.
- Jenkins, D. N. and Prentice, J. K., 1982, Theory for aquifer test analysis in fractured rocks under linear (nonradial) flow conditions, Ground Water, 20(1), p. 12-21.
- Sen, Z., 1986, Aquifer test analysis in fractured rocks with linear flow pattern, Ground Water, 24(1), p. 72-78.
- Sen, Z., 1992, Unsteady-ground-water flow toward extended wells, Ground Water, 30(1), p. 61-67.
- Stehfest, H., 1970, Algorithm 368, Numerical inversion of Laplace transforms, Commun. ACM, 13(1), 47-49.
- Warren, J. E. and Root, P. J., 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs, SPEJ, 3(2), p. 245-255.