

수리상수 산출을 위한 새로운 프랙탈(fractal) 모델의 기법

함세영 (한국자원연구소)

1. 서 언

현재까지도 많은 사람들이 균열암반내 양수시험분석에 근본적으로 균질의 공극성 대수층에만 적용이 가능한 “Theis” 식이나 “Jacob” 식을 이용하고 있다. 균열암반내 지하수 흐름은 균열을 따라서 흐르며, 따라서 균질의 분포 상태에 많은 영향을 받는다.

균열암반내 균열의 분포는 공간적으로 불규칙하기 때문에 균열암반내 양수시험 분석을 위해서는 균열암반내 지하수 흐름의 특성을 보다 합리적으로 설명할 수 있는 새로운 모델을 필요로 한다.

지난 30-40년간, 여러 학자들은 정상류 또는 비정상류의 이중공극모델 (Barenblatt et al, 1960; Warren and Root, 1963; Kazemi et al., 1969; Boulton and Streltsova, 1977 등)에 의해서 균열암반내 지하수 흐름을 모식화하였으나, 이들 모델들도 역시 자연상태의 균열암반을 대표하기에는 너무 단순하였다. 1980년대에, 몇몇 학자들이 물리학, 수학 등에 적용되어 왔던 프랙탈 이론(예를들면, Mandelbot, 1983)을 균열의 분포 연구에 적용시켰다(Allegre외, 1982; Thomas, 1987; Velde외, 1991). 몇몇 학자들(Barker, 1988; Chang과 Yortsos, 1988)이 이런 프랙탈 이론을 최초로 지하수 흐름에 적용시켰다. Bangoy et al. (1992)는 Barker의 프랙탈모델을 화강암과 석회암지역의 야외실험자료에 적용시켜 균열암반 지역에 대한 이 모델의 적용의 우수성을 입증하였다. 그러나 Barker의 모델은 균열암반내 양수시험분석을 위한 기존 모델들 보다 더 진보되고 합리적인 모델이기는 하지만, 자연 상태의 균열암반대수층에 적용시키기에는 다소 불충분한 점이 있다. 따라서, Hamm과 Bidaux(1994)는 누수를 포함한 프랙탈 모델을 제안하였다.

본 학술발표에서는 몇가지 새로운 프랙탈모델들(누수를 포함한 프랙탈 모델, 정상류 및 비정상류의 이중공극 프랙탈 모델)을 제주도의 몇몇 양수시험에 적용시킨 결과를 제시하고자 한다.

2. 누수를 포함하는 프랙탈 모델의 이론적인 배경

누수를 포함하는 프락탈 모델은 균열대수층위에 반투수층이 존재하며, 다시 이 반투수층위에 자유면대수층이 존재하는 지하수계를 모식화하는 것이다 (그림1). 이때 지하수흐름은 균열의 프락탈분포를 따라서 흐르며, 따라서 지하수흐름 또한 프락탈의 성질을 띄게 된다.

반투수층으로부터의 누수(Leakage)를 포함한 n차원의 지하수흐름의 미분방정식은,

$$\frac{K_f}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s}{\partial r} \right) = S_{sf} \frac{\partial s}{\partial t} - K \frac{s}{B^2} \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서,

n; 지하수흐름의 프락탈차원

K_f ; 대수층의 투수율 (LT⁻¹)

S_{sf} ; 대수층의 저유율 (L⁻¹)

B; 누수계수 (L)

r; 유선상을 따라서 양수정으로부터 관측점까지의 거리 (L)

s; 수위강하 (L)

t; 양수시간 (T)

양수정으로부터의 양수에 따른 유량보존의 법칙 및 Darcy의 법칙에 의하여 다음과 같은 식들이 성립된다:

$$W_s \frac{\partial s_w}{\partial t} = Q + K_f b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-1} \left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (2)$$

$$s_w(t) = s_w(r_w, t) - S_f r_w \left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (3)$$

여기서,

W_s ; 저장계수 (L²)

s_f ; 우물손실계수 (비차원)

s_w ; 양수정내 수위강하 (L)

Q; 양수량 (L³T⁻¹)

b; 흐름면에 수직방향의 대수층의 범위 (L)

r_w ; 양수정의 반경 (L)

$$\alpha_n = 2\pi^{n/2} / \Gamma(n/2)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$$

양수전에 지하수위는 안정되어 있었으며, 대수층의 횡적인 범위가 무한하다고 가정하면,

$$\text{모든 거리에 대하여 } s_w(r,0) = s(r,0) = 0 \quad (4)$$

$$\text{모든 시간에 대하여 } s(\infty,t) = 0 \quad (5)$$

가 성립한다. 모든 식들을 비차원의 식들로 변환시키기 위하여 다음과 같은 비차원의 변수들을 도입한다:

$$t_D = \frac{4K_f t}{S_{sf} r_w^2}$$

$$r_D = r / r_w$$

$$B_D = B / r_w$$

$$s_D = \frac{4\pi^{n/2} K_f b^{3-n}}{Q r_w^{2-n}} s$$

$$W_{sD} = \frac{W_s}{\pi^{n/2} b^{3-n} r_w^n S_{sf}}$$

(1)에서 (3)식은 다음과 같은 비차원의 식들로 표현된다:

$$\frac{1}{r_D^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D^{n-1} \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right) = 4 \frac{\partial s_D}{\partial t_D} + \frac{\partial s_D}{\partial B_D^2} \quad (6)$$

$$W_{sD} \frac{\partial s_{wD}}{\partial t_D} = 1 + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \left(\frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (7)$$

$$s_{wD}(t_D) = s_D(1, t_D) - s_{sf} \left(\frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (8)$$

(6)에서 (8)식을 Laplace 변환시키고 난 후, \bar{s}_{wD} 해를 구하면,

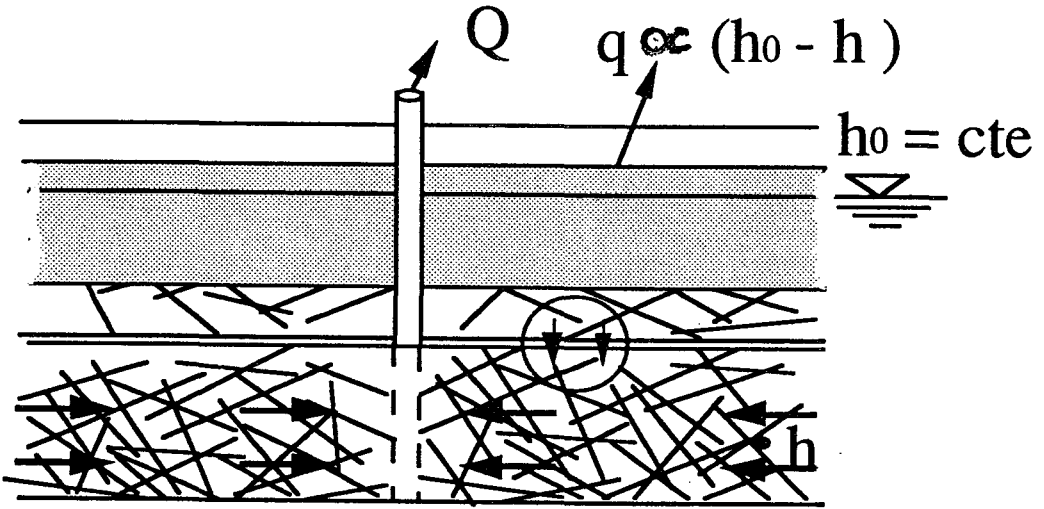


그림1. 누수를 포함하는 프락탈모델의 모식도

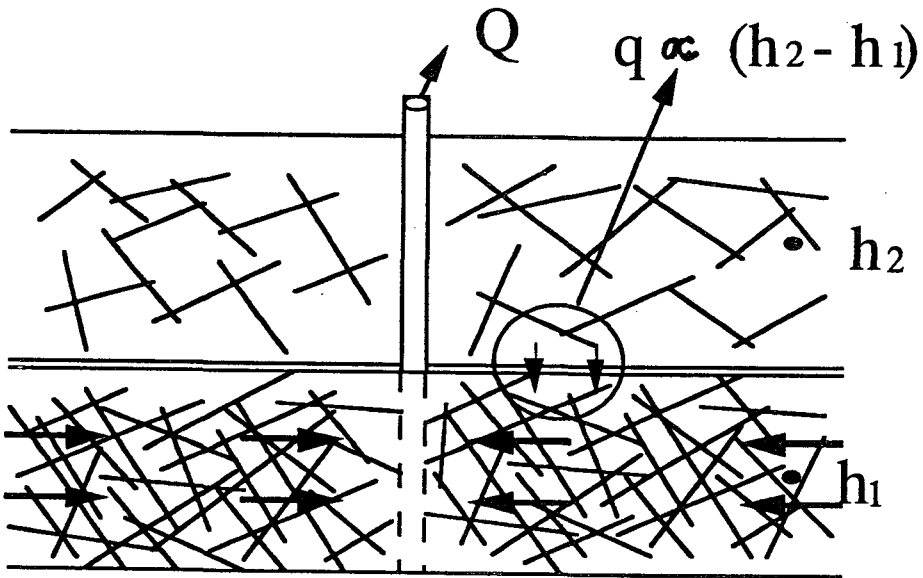


그림2. 정상류의 이중공극 프락탈모델의 모식도

$$\bar{s}_{wD} = \frac{1}{p \left[p W_{sD} + \frac{1}{2\Gamma(n/2) K_{v-1}^v(\sigma) + s_f} \right]} \quad (9)$$

여기서,

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

$$v = 1 - n/2$$

$$\lambda = \sqrt{4p+1/B_D^2}$$

p; Laplace 변수 (비차원)

$K_v(z)$; second kind의 v order의 modified Bessel function 이다.

W_{sD} 와 s_f 를 0으로 두었을때,

$$s_D(r_D, t_D) = r_D^{2v} G(-v, r_D^2/t_D, r_D/B_D) \quad (10)$$

여기서,

$$G(-v, u, \beta) = \int_0^\infty y^{-v-1} e^{-y-\beta^2/4y} dy \quad (11)$$

n = 2일 경우 (11)식은 Hantush(1956)의 식과 동일한 식이 되고, n = 1일 경우에는 Vandenberg(1977)의 식과 같아진다.

Stehfest 알고리즘(1970)을 이용하여 (9)식과 (10)식을 실수영역으로 변환하면, 우리는 각각 양수정과 관측정에서의 수위하강을 구할 수 있다.

3. 정상류의 이중공극 프락탈모델의 이론적인 배경

정상류의 이중공극 프락탈모델은 균열대와 블록으로 이루어진 균열지하수계를 모식화한 것이다(그림2). 이때 균열지하수계는 프락탈의 성질을 띤다. 균열대는 높은 투수율을 가지며, 낮은 저유율을 가진다. 반면에, 블록은 낮은 투수율을 가지며, 높은 저유율을 가진다. 또한, 블록으로부터 균열대로의 흐름 또는 균열대로부터 블록으로의 흐름은 정상류이다. 즉, 블록과 균열대

간의 흐름은 양자간의 수두차에만 비례한다.

정상류의 이중공극 프락탈모델의 블록내 지하수위하강 s_2 의 미분방정식은

$$\frac{K'}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s_2}{\partial r} \right) = S_s' \frac{\partial s_2}{\partial t} + v \quad (12)$$

로 표현된다. 여기서,

v ; 균열로부터 블록으로 향하는 흐름 (T-1)

K' ; 블록의 투수율 (LT-1)

S_s' ; 블록의 저유율 (L-1)

블록의 투수율은 매우 작으므로, (12)식은 다음과 같이 된다.

$$v = -S_s' \frac{\partial s_2}{\partial t} \quad (13)$$

정상류상태에서

$$v = \chi K' (s_2 - s_1) \quad (14)$$

이므로

$$\chi K' (s_2 - s_1) = -S_s' \frac{\partial s_2}{\partial t} \quad (15)$$

여기서, χ 는 블록의 기하학적 요소 (L-2)이다.

균열내 지하수위하강 s_1 의 미분방정식은

$$\frac{K_f}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s_1}{\partial r} \right) = S_{sf} \frac{\partial s_1}{\partial t} - v \quad (16)$$

로 표현된다. 누수를 포함하는 프락탈모델의 경우처럼, 정상류의 이중공극모델에서도 양수정으로부터의 양수에 따른 유량보존의 법칙 및 Darcy의 법칙을 조건으로 한다. 따라서, 다음과 같은 식들이 성립된다:

$$W_s \frac{\partial s_w}{\partial t} = Q + K_f b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-1} \left(\frac{\partial s_1}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (17)$$

$$s_w(t) = s(r_w, t) - S_f r_w \left(\frac{\partial s_1}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (18)$$

양수전에 지하수위는 안정되어 있었으며, 대수층의 횡적인 범위가 무한하다고 가정하면,

$$\text{모든 거리에 대하여 } s_w(r,0) = s_1(r,0) = s_2(r,0) = 0 \quad (19)$$

$$\text{모든 시간에 대하여 } s_1(\infty,t) = s_2(\infty,t) = 0 \quad (20)$$

가 성립한다. 모든 식들을 비차원의 식들로 변환시키기 위하여 다음과 같은 비차원의 변수들을 도입한다:

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

$$r_D = r / r_w$$

$$\lambda = \frac{\chi K' r_w^2}{K_f}$$

$$\omega = \frac{S_{sf}}{S_{sf} + S_s'}$$

$$s_{1D} = \frac{4\pi^{n/2} K_f b^{3-n}}{Q r_w^{2-n}} s_1$$

$$s_{2D} = \frac{4\pi^{n/2} K_f b^{3-n}}{Q r_w^{2-n}} s_2$$

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

(15)에서 (18)식은 다음과 같은 비차원의 식들로 표현된다.

$$4(1 - \omega) \frac{\partial s_{2D}}{\partial t_D} = \lambda (s_{1D} - s_{2D}) \quad (21)$$

$$\frac{1}{r_D^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D^{n-1} \frac{\partial s_{1D}}{\partial r_D} \right) = 4\omega \frac{\partial s_{1D}}{\partial t_D} + 4(1 - \omega) \frac{\partial s_{2D}}{\partial t_D} \quad (22)$$

$$W_{sD} \frac{\partial s_{wD}}{\partial t_D} = 1 + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \left(\frac{\partial s_{1D}}{\partial t_D} \right)_{t_D=1} \quad (23)$$

$$s_{wD}(t_D) = s_{1D}(1, t_D) - s_f \left(\frac{\partial s_{1D}}{\partial t_D} \right)_{t_D=1} \quad (24)$$

(21)에서 (24)식을 Laplace 변환시키고 난 후, \bar{s}_{wD} 해를 구하면,

$$\bar{s}_{wD} = \frac{1}{p \left[p W_{sD} + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \frac{1}{K_v^{\nu-1}(\sigma) + s_f} \right]} \quad (9)$$

와 같다. 여기서,

$$\sigma = \frac{4p[4p\alpha(1-\omega) + \lambda]}{4p(1-\omega) + \lambda} \quad (25)$$

W_{sD} 와 s_f 를 0으로 두었을때, 균열내의 수위하강은

$$\bar{s}_{1D} = \frac{2\Gamma(n/2)}{p} \frac{r_D^\nu K_\nu(\sigma r_D)}{\sigma K_{\nu-1}(\sigma)} \quad (26)$$

으로 표현된다. 그리고 블록내의 수위하강은

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\lambda}{4p(1-\omega) + \lambda} \bar{s}_{1D} \quad (27)$$

으로 표현된다. $n = 2$ 일 경우 (26)식과 (27)식은 Warren과 Root(1963)의 식과 동일한 식이 된다.

Stehfest 알고리즘(1970)을 이용하여 (9), (26), (27)식을 실수영역으로 변환하면, 우리는 각각 양수정과 관측정에서의 수위하강을 구할 수 있다. 특히, $K_\nu(z)$ 의 계산에는 Amos(1986)의 알고리즘을 이용하였다.

3. 비정상류의 이중공극 프랙탈모델의 이론적인 배경

비정상류의 이중공극 프랙탈모델도 균열대와 블록으로 이루어진 균열지하

수계를 모식화한 것이다(그림3). 이때 균열지하수계는 프락탈의 성질을 띤다. 균열대는 높은 투수율을 가지며, 낮은 저유율을 가진다. 반면에, 블록은 낮은 투수율을 가지며, 높은 저유율을 가진다. 비정상류의 이중공극모델의 경우에는 정상류의 이중공극모델과는 달리 블록으로부터 균열대로의 흐름 또는 균열대로부터 블록으로의 흐름이 비정상류이다. 다시 말하면, 블록과 균열대간의 유량과 수두차는 시간과 블록내 위치에 따라서 변한다.

비정상류의 이중공극 프락탈모델의 블록내 지하수위하강 s_2 의 미분방정식은

$$\frac{\partial^2 s_2}{\partial z^2} = \frac{S_s'}{K'} \frac{\partial s_2}{\partial t} \quad (28)$$

로 표현된다. 여기서,

v ; 균열로부터 블록으로 향하는 흐름 (T⁻¹)

K' ; 블록의 투수율 (LT⁻¹)

S_s' ; 블록의 저유율 (L⁻¹)

z ; 블록내에서 지하수흐름방향으로 균열과의 접촉면으로부터의 거리 (L)

균열내 지하수위하강 s_1 의 미분방정식은

$$\frac{K_f}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s_1}{\partial r} \right) = S_{sf} \frac{\partial s_1}{\partial t} - v \quad (29)$$

으로 표현된다. 여기서,

$$v = \frac{K'}{b'} \left(\frac{\partial s_2}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (30)$$

이며, b' 는 블록내에서 지하수흐름의 범위 (L)이다. 누수를 포함하는 프락탈모델과 정상류의 이중공극 프락탈모델의 경우처럼, 양수전에 지하수위는 안정되어 있었으며, 대수층의 횡적인 범위가 무한하다고 가정하면,

$$\text{모든 거리에 대하여 } s_w(r,0) = s_1(r,0) = s_2(r,0) = 0 \quad (19)$$

$$\text{모든 시간에 대하여 } s_1(\infty,t) = s_2(\infty,t) = 0 \quad (20)$$

가 성립한다. 모든 식들을 비차원의 식들로 변환시키기 위하여 정상류의 이

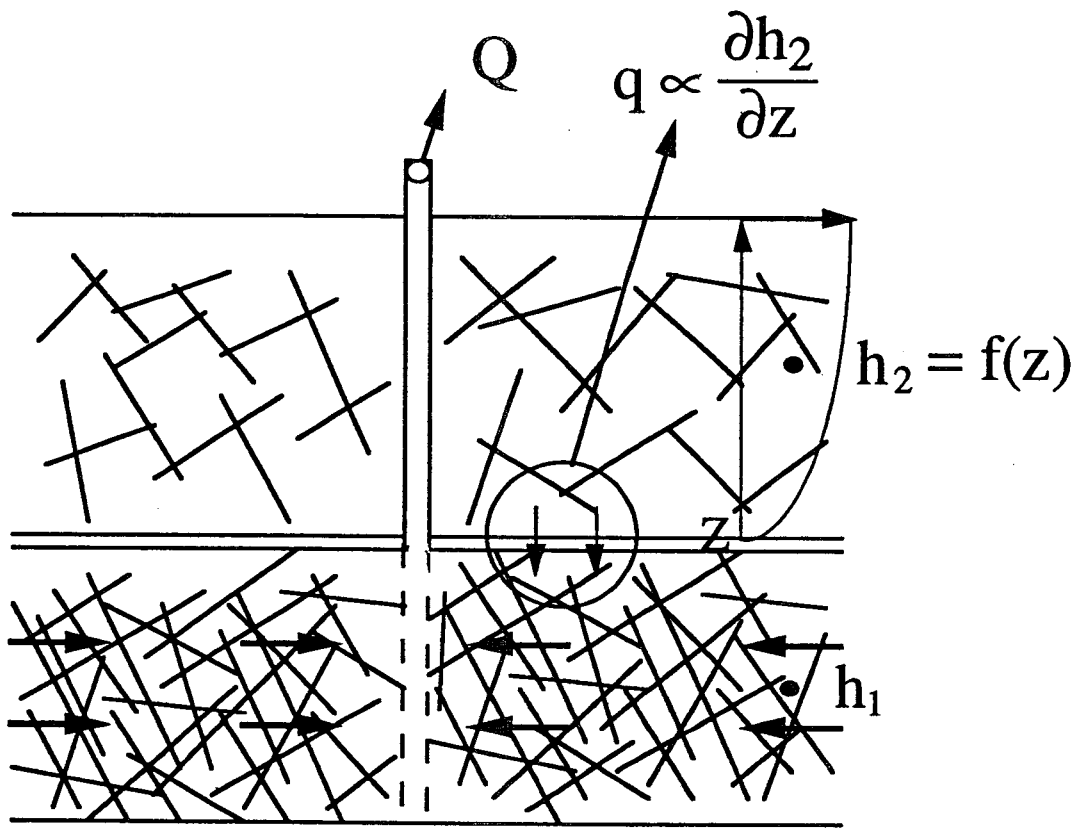


그림3. 비정상류의 이중공극 프랙탈모델의 모식도

중공극 프락탈모델의 비차원의 변수들이외에 다음과 같은 비차원의 변수들을 도입한다:

$$z_D = z/b'$$

$$\lambda = \frac{K' r_w^2}{K_f b'^2}$$

(28), (29)식은 다음과 같은 비차원의 식들로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 s_{2D}}{\partial z_D^2} = \frac{4(1-\omega)}{\lambda} \frac{\partial s_{2D}}{\partial t_D} \quad (31)$$

$$\frac{1}{r_D^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D^{n-1} \frac{\partial s_{1D}}{\partial r_D} \right) = 4\omega \frac{\partial s_{1D}}{\partial t_D} - \lambda \left(\frac{\partial s_{2D}}{\partial z_D} \right)_{z_D=0} \quad (32)$$

여기서,

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

만약 균열과 블록사이에 skin이 존재한다면,

$$s_2 = s_1 + b' S_F \left(\frac{\partial s_2}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (33)$$

여기서, $S_F = K' b_s / K_s b'$, 즉 균열의 skin(비차원)이고, K_s 와 b' 는 각각 skin의 투수율(LT⁻¹)와 skin의 두께(L)이다(그림3). 균열과 블록사이에 skin이 없다면,

$$\bar{s}_{2D} = \bar{s}_{1D} \quad (34)$$

(31), (32), (23), (24)식을 Laplace변환시키고 난 후, \bar{s}_{wD} 해를 구하면,

$$\bar{s}_{wD} = \frac{1}{p \left[p W_{sD} + \frac{1}{2\Gamma(n/2)} \frac{1}{K_{v-1}^V(\sigma) + s_f} \right]} \quad (9)$$

와 같다. 여기서,

$$\sigma^2 = 4p\omega + \frac{\lambda \eta \tanh(\eta)}{1 + S_F \eta \tanh(\eta)} \quad (35)$$

W_{sD} 와 s_f 를 0으로 두었을때, 균열내의 수위하강은

$$\bar{s}_{1D} = \frac{2\Gamma(n/2)}{p} \frac{r_D^v K_v(\sigma r_D)}{\sigma K_{v-1}(\sigma)} \quad (26)$$

으로 표현된다. 그리고 블록내의 수위하강은

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D} \tanh(\eta)}{\eta [1 + S_F \eta \tanh(\eta)]} \quad (36)$$

으로 표현된다. $n = 2$ 일때, 만약 균열의 skin이 없을 경우에는 (26)식과 (36)식은 Boulton과 Streltsova(1977)의 식과 동일한 식이 되고, 균열의 skin이 존재하는 경우에는 Moench(1984)의 모델과 같아진다.

Stehfest 알고리즘(1970)을 이용하여 (9), (26), (36)식을 실수영역으로 변환하면, 우리는 각각 양수정과 관측정에서의 수위하강을 구할 수 있다. 특히, $K_v(z)$ 의 계산에는 Amos(1986)의 알고리즘을 이용하였다.

5. 수리상수 산출방법

양수시험분석으로부터 우리가 구할 수 있는 수리상수들은 $K_f b^{3-n}$ (균열의 일반화 투수량계수, $L^{4-n}T^{-1}$), K_f/S_{sf} (균열의 수리분산계수, L^2T^{-1}), $K' b'^{3-n}$ (블록의 일반화 투수량계수, $L^{4-n}T^{-1}$), $K'/S_{s'}$ (블록의 수리분산계수, L^2T^{-1}), ω , λ , B , s_f (양수정의 우물손실계수), W_s (양수정의 저수계수) 그리고 n 이다. 일반적으로 W_s 는 양수정의 단면적과 일치한다. 계산을 보다 간편하게 하기 위하여 우리는 S_{sf} 를 $5 \times 10^{-6} m^{-1}$, 그리고 $S_{s'}$ 를 $5 \times 10^{-5} m^{-1}$ 으로 고정하였다(Walton, 1970). 이들 수리상수로 부터 우리는 양수정의 비산출량을 계산하고 장기적인 수위강하를 정확히 예측할 수 있다. 비산출량은

$$PI = Q/s_w \quad (37)$$

로 표현된다.

또한, 양수시험분석에서 우리는 시간에 따른 수위하강율을 양대수방안지에 도시하였다. 이것은 각 모델에 따른 특징적인 수위하강율곡선을 찾아내어 보다 용이하게 적합한 모델을 선정하는데 유용하기 때문이다(Bourdet et al., 1983, 1984).

6. 프락탈모델들의 야외자료에 대한 적용

위의 프락탈모델들을 북제주지역에서 실시된 양수시험자료(임정웅외, 1990a; 임정웅외, 1990b)에 적용시켰다. 북제주군 구좌읍 세화리의 양수시험(임정웅외, 1990a)은 680m 심도의 양수정에 대하여 300m²/일의 양수량으로 실시되었으며, 수중모터는 40마력 30단으로 617m에 설치되었다. 관측정이 존재하지 않으므로, 수위관측은 양수정에서만 이루어졌다. 양수정에서의 지질은 0-260m까지가 현무암, 260-440m까지가 해성퇴적층 그리고 440-680m까지는 응회암으로 되어있다 (배두종외, 1992). 케이싱은 440m 심도까지 설치되어 있으므로, 본 공에서의 지하수유입은 대부분이 440-680m사이에서 일어난다고 할 수 있다. 여러 모델을 비교분석한 결과, 본 양수시험분석에서는 정상류의 이중공극 프락탈모델을 적용시켰다. 양수시험분석 결과는 그림4와 표1에 제시되어 있다. 양수시험분석에서 결정된 프락탈차원은 $n = 1.9$ 로서 2차원의 방사상흐름에 매우 가까운 것으로 나타났다.

또 다른 양수시험은 북제주군 구좌읍 종달리에서 실시되었다(임정웅외, 1990b). 양수정의 심도는 701m이고, 그라우팅은 251m까지 실시되었다. 수중모터는 40마력 30단으로 500m깊이에 설치되었다. 본 지역에서도 관측정은 존재하지 않는다. 본 지점의 지질도 상부로부터 현무암, 해성퇴적층 그리고 응회암으로 구성되어 있으나, 각각의 정확한 두께는 불명확하다. 여러 모델을 비교분석한 결과, 본 양수시험분석에서는 비정상류의 이중공극 프락탈모델을 적용시켰다. 양수시험분석 결과는 그림5와 표1에 제시되어 있다. 양수시험분석결과 구해진 프락탈차원은 $n = 2$ 로서 방사상흐름과 동일한 것으로 나타났다. 따라서, 상기 2건의 양수시험분석으로부터, 이 지역의 프락탈차원은 $n = 2$ 에 매우 가깝다는 것을 암시한다. 물론, 앞으로의 양수시험자료축적에 따라 이 값은 달라질 수 있다. 또한 상기 두개공의 비산출량을 비교하면, 세화리 공의 비산출량이 10배정도 높은 것으로 나타난다.

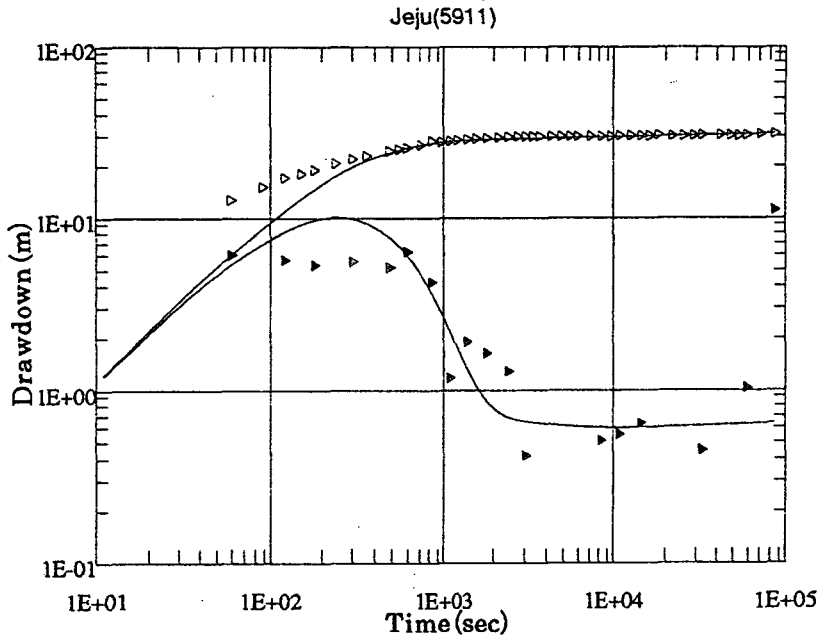


그림4. 세화리 공의 수위하강관측값과 이론적인 수위강하곡선 (▲는 수위하강관측점이고, ▲는 시간에 따른 수위하강율이다. 이들에 대응하는 곡선들은 각각 이론적인 수위하강곡선과 이론적인 수위하강율 곡선이다.)

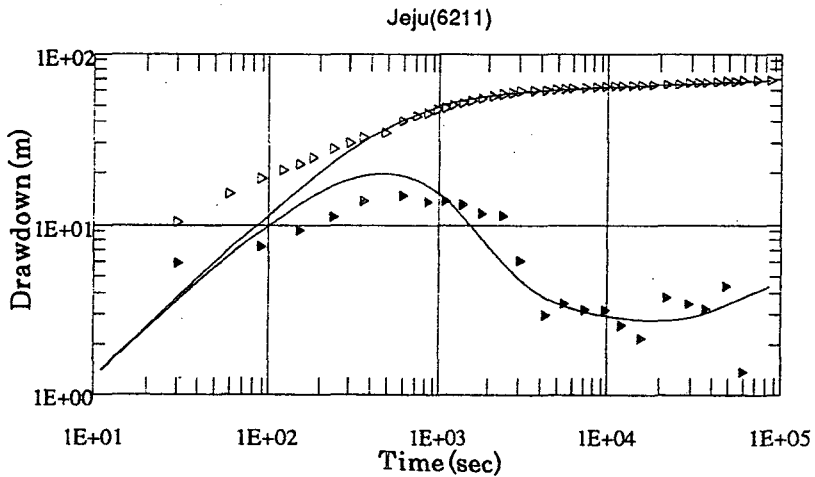


그림5. 종달리 공의 수위하강관측값과 이론적인 수위강하곡선 (▲는 수위하강관측점이고, ▲는 시간에 따른 수위하강율이다. 이들에 대응하는 곡선들은 각각 이론적인 수위하강곡선과 이론적인 수위하강율 곡선이다.)

표1. 계산된 수리상수

공변	$K_f b^{3-n}$ (L ⁴⁻ⁿ T ⁻¹)	K_f/S_{sf} (L ² T ⁻¹)	$K' b'^{3-n}$ (L ⁴⁻ⁿ T ⁻¹)	K'/S_s' (L ² T ⁻¹)	S_F	λ	n	s_f	W_s	PI (L ²) (L ² T ⁻¹)
세화리	8.1E-4	3.32	5.4E-6	1.5E-3		2.3E-6	1.9	40.5	0.03	5E-4
종달리	6.0E-5	1.58	7.1E-7	1.0E-3	9E-2	9.0E-2	2.0	3.6	0.031	5E-4

7. 결 론

누수를 포함하는 프락탈모델, 정상류 이중공극 프락탈모델, 그리고 비정상류 이중공극 프락탈모델에 의하여 균열암반대수층의 수리지질학적 특성을 보다 합리적으로 설명할 수 있으며, 비산출량 및 장기적인 수위강하를 보다 정확히 판단할 수 있다. 그러나, 제주도 전체의 암반대수층의 지하수유동의 특성을 파악하기 위해서는 앞으로 더 많은 야외자료분석을 필요로 한다.

참 고 문 헌

배두종외, 1992. 제주(세화, 송당)지구 온천자원조사보고서, No. 95, 한국자원연구소, p.194.

임정웅외, 1990. 북제주(세화리)지구 온천공조사보고서, No. 59, 한국동력자원연구소, p.61.

임정웅외, 1990. 북제주(종달리)지구 온천공조사보고서, No. 62, 한국동력자원연구소, p.73.

Allegre, C. J., le Mouel, J. L. et Provost, A., 1982. Scaling

rules in rock fractures and possible implications for earthquake prediction, *Nature*, 297, 47-49.

Amos, D. E., 1986. Algorithm 664 : A portable package for Bessel functions of a complex argument and nonnegative order, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 12(3), 265-273.

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. *Jour. Hydr.*, 138, 77-88.

Barenblatt, G. E., Zheltov, I. P. et 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), 1286-1303.

Barker, J. A., 1988. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resour. Res.*, 24(10), 1796-1804.

Boulton, N. S. et Streltsova, T. D., 1977. Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation. *Jour. Hydr.* 35, 257-269.

Bourdet, D., Whittle, T. M., Douglas, A. A. and Pirard, Y. M., 1983. A new set of type-curves simplifies well test analysis, *World Oil*, 95-106

Bourdet, D., Ayoub, J. A. and Pirard, Y. M., 1984. Use of pressure derivative in well test interpretation, SPE 12777, Annual California Regional Meeting, Long Beach, California, April 11-13.

Chang, J. et Yortsos, Y. C., 1988. Pressure transient analysis of fractal reservoirs. SPE 18170, 1-14.

Hamm, S. Y. et Bidaux, P., 1994. Ecoulements transitoires en geometrie fractale avec drainance: theorie et application. C. R. Acad. Sci. Paris, 318, serie II, no. 2, 227-233.

Hantush, M. S., 1956. Analysis of data from tests in leaky aquifers. Trans. Am. Geophys. Union, 37(6), 702-714.

Kazemi, H., Seth, M. S. et Thomas, G. W., 1969. The interpretation of interference tests in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution. Soc. Pet. Eng. Jour., 463-472.

Mandelbrot, B. B., 1983. The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman, New York, 468p.

Moench, A. F., 1984. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. Water Resour. Res., 20(7), 831-846.

Stehfest, H., 1970. Numerical inversion of Laplace transforms, Commun. ACM, 13(1), 47-49.

Thomas, A., 1987. Structure fractale de l'architecture des champs de fractures en milieu rocheux. C. R. Acad. Sci. Paris, 304, serie II, 181-186.

Vandenberg, A., 1977. Type curves for analysis of pump tests in leaky strip aquifers. Jour. of Hydr., 33, 15-26.

Velde, B., Dubois J., Moore D. et Touchard J., 1991. Fractal

patterns of fractures in granites, Earth and Planetary Science Letters, 104, 25-35.

Walton, W. C., 1970. Groundwater Resource Evaluation. McGraw-Hill, Tokyo, 664p.

Warren, J. E. et Root, P. J., 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs. SPEJ, 3(2), 245-255.