

수직 지질구조에 의해서 지배되는 암반지하수 유동의 수리적 성질과 그 예

Hydraulic Property of Groundwater Flow Controlled by Vertical Geologic Structure and its Field Example

함세영(Se - Yeong Hamm)* · 김형찬(Hyung - Chan Kim)** · 임정웅(Jung - Ung Lim)

요 약 : 암반대수층의 수리적 특성은 지하수의 통로가 되는 지질구조에 의해서 크게 좌우된다. 본 연구에서는 수직 지질구조와 관련된 일차원 흐름의 이론들에 대해서 논하였다. 그리고, 경북 영일군 대송면 옥명리에서 행한 두 번의 양수시험(양수시험 1과 양수시험 2)에 대해서, 프락탈 모델을 적용하여 이 지역 수리 특성을 분석하였다. 양수시험분석에 의하면, 양수시험1(양수정: D9호공, 관측정: C3호공과 D7호공)의 시험공 주변은 무한한 길이의 그리고 무한소의 폭을 가지는 수직 지질구조에 의해서 지배되는 일차원 흐름으로 대표되나, 양수시험2의 양수정(D10호공) 주변은 이차원에 가까운 흐름(1.9~2차원)을 보인다. 이와 같이, 균열암반대수층의 특징은 공간적으로 또는 시간적으로 유동 차원이 달라지는 경우가 많다.

Abstract : Hydraulic property of fissured aquifers often depends on geologic structure which acts main channel of groundwater flow. We treated theories of linear flow related to vertical geologic structure. Then, we analyzed the result of two pumping tests conducted in Okmyeong-ri area (Kyeongbook province) using fractal model and found hydraulic characteristic of the fissured aquifer in this area. According to the pump test analyses, groundwater flow around the holes (pumping well D9; observation wells C3 and D7) of test 1 is linear and is controlled by vertical geologic structure with infinite length and infinitesimally small width. On the other hand, around the hole D10 (pumping well) of test 2, groundwater flow is pseudo-radial ($n=1.9$) or radial ($n=2$). Thus, the characteristic of fractured aquifer often shows variable groundwater flow spatially and temporally.

서 론

균열암반대수층내 지하수 유동은 주로 지질구조대(단층대, 균열대, 절리대 또는 파쇄대를 포함함)를 따라서 일어나므로 이들의 발달 방향과 크기 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 균열암반대수층내 지하수 유동이 수직의 주요 구조대에 의해서 규제될 때 보여주는 수리적 특성을 몇 가지 일차원 흐름 모델(무한한 길이의 수직 균열 모델, 유한한 길이의 수직 균열 모델, 프락탈 모델)을 이용하여 해석하는 방법에 대해서 다루고, 프락탈 모델을 경북 영일군 대송면 옥명리지역의 양수시험자료에 적용시켜 수직 지질구조에 의해서 지배되는 지하수 유동을 해석하였다.

양수시험지역(경북 영일군 대송면 옥명리)은 원래 지열수(온천수) 조사 목적으로 연구되었다. 이 지역의 지질은 중생대 옹회암 및 제3기 세일로 주로 이루어져 있으며, 암반지하수는 옹회암내에 발달되어 있는 주요 구조대를 따라서 유동하며, matrix 부분은 지하수를 저장하는 대수층 역할을 하고 있다(Figure 1).

이 지역의 주요 구조선은 북북동 방향과 동북동 방향 그리고 남북 방향으로 발달되어 있으나, 양수시험분석결과 N85.8°W 방향의 수직 균열대가 주요 지하수 통로 역할을 하고 있는 것으로 판단된다(Figure 2). N85.8°W 방향의 수직 균열대는 과거에 18~19°C의 지하수가 용출하였던 곳으로 과거에는 N80°W 방향인 것으로 추정되고 있었다.

포항지역을 포함하는 동해안의 제3기 분포지역은 우리나라에서 가장 높은 80 mW/m² 이상의 지열류를 보이고 있다. 따라서, 포항시로부터 약 10 km 동남쪽에 위치하는 본 연구지역도 지열수(우리 나라에서는 온천수로 통용되는 경우가 많음) 개발 가능성이 있는 지역으로 추정되어 지하온도 분포 및 수량이 연구되었다. 지열수는 일반적으로 지하 심부의 적어도 2 km보다 깊은 곳에서 상승하므로 구조적으로 물이 흐를 수 있는 통로가 양호하게 발달되어 있는 곳에서 산출된다. 따라서, 지열시대에서는 지하수 및 지열수 흐름이 지질구조에 지배되는 현상을 확실하게 볼 수 있는 경우가 많다.

이론적인 배경

무한한 길이의 수직균열 이론
무한한 길이의 수직균열 이론에 입각한 일차원 흐름은 과거

*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, Yuseung-Ku, Taejon 305-350, Korea)

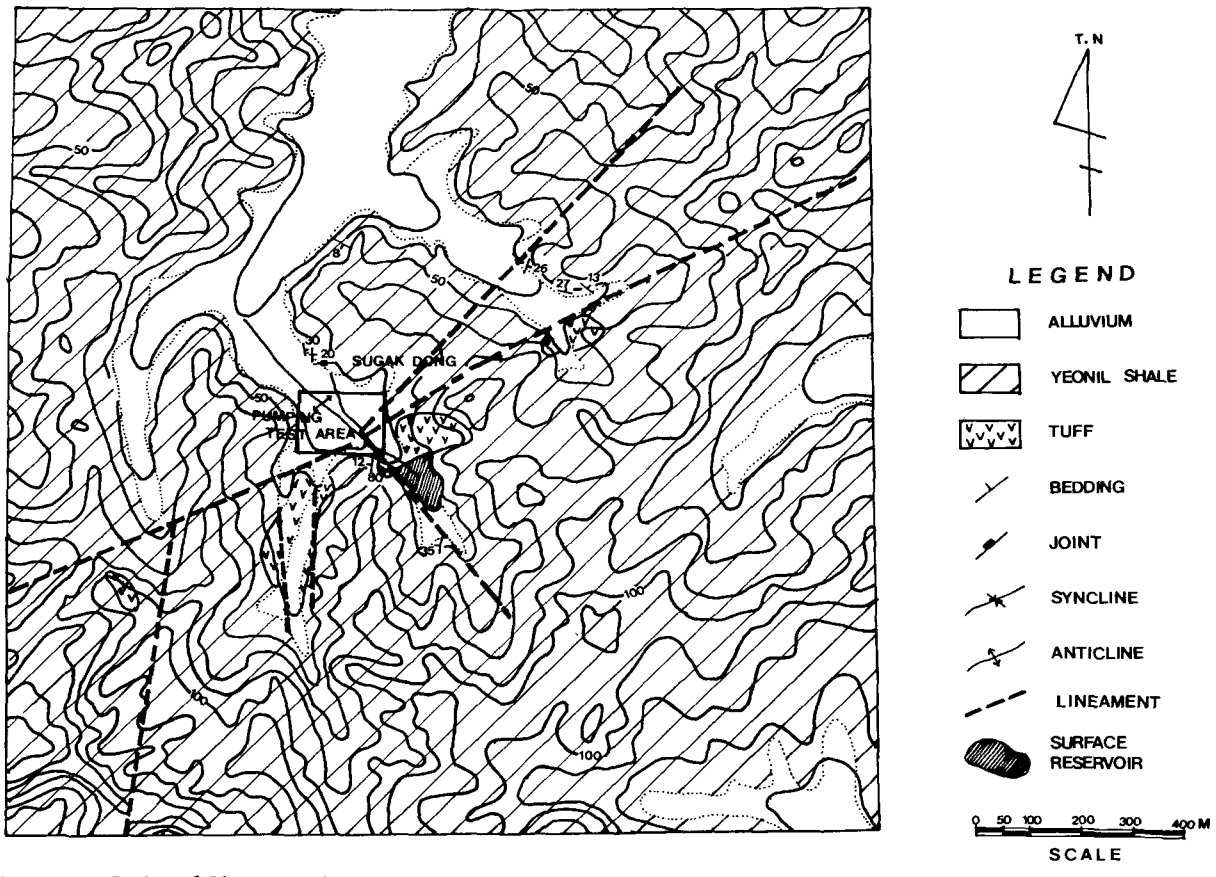


Figure 1. Geology of Okmyeong-ri area.

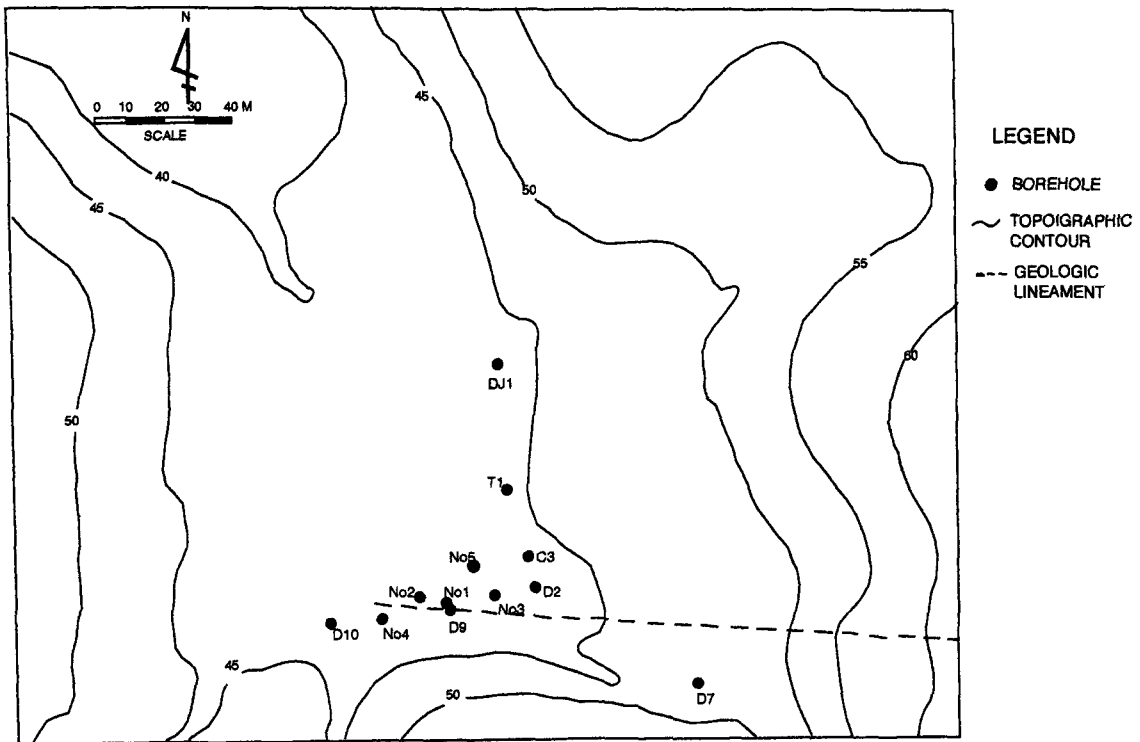


Figure 2. Site of the pumping tests.

에 여러 학자들(예를 들면, Carslaw and Jaeger, 1959; Ferris *et al.*, 1962; Walton, 1970; Schneebeli, 1978; Jenkins and Prentice, 1982)에 의해서 연구되었다. 이 이론은 프락탈 모델(Barker, 1988; Bangoy *et al.*, 1992; Hamm과 Bidaux, 1994a, 1994b; Hamm과 Bidaux, 1996, 1997; 함, 1997)에 의하면 지하수 유동차원 중 일차원 흐름식으로 풀이될 수 있다.

일차원 흐름에서는 지질구조대가 하나의 연장된 우물(extended well)의 역할을 하며 대수층에서 지질구조대쪽으로 직각 방향으로 지하수의 선상의 흐름이 일어나게 된다(Figure 3). 이때 지질구조대의 연장은 무한하고, 대수층을 완전 관통하고 있다고 가정한다. 또한, 구조대내에서는 지하수 흐름의 마찰 저항이 없다고 가정한다. 구조대의 저류계수는 0이며 따라서 구조대 내에서는 양수정쪽으로 흐름이 없다. 대수층은 피압상태에 있으며, 무한대이고, 균질하고, 등방성이다(Jenkins and Prentice, 1982). 지질구조대의 폭은 무한소로 가정하거나(Jenkins and Prentice, 1982), 폭을 가지는 것으로 가정할 수 있다(Sen, 1986). 프락탈 모델에서는 일정한 공경을 가지는 양수정내의 우물저장효과와 우물손실효과를 고려할 수 있다(만약, 지질구조대의 폭이 무한소라면 양수정의 우물저장효과와 우물손실효과는 양수정자체의 효과이고, 지질구조대가 일정 폭을 가진다면 그 지질구조대의 연장된 우물의 우물저장효과와 우물손실효과를 나타냄).

프락탈 모델로부터 일차원 흐름의 평형방정식은

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

와 같다. 여기서, K 는 대수층의 수리전도도(LT^{-1}), S_s 는 대수층의 비저유율(L^{-1}), s 는 대수층내 수위강하(L), r 는 구조대와 직각 방향으로 양수정과 대수층의 임의의 점사이의 거리(L)이다.

우물내의 저장량의 변화는

$$W_s \frac{\partial s_w}{\partial t} = Q + 2Kb^2 \left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (2)$$

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(L), b 는 지하수 흐름에 직각 방향의 대수층의 범위(L)이다. 프락탈 모델의 b^2 은 Jenkins와 Prentice(1982)에 의하면 eW 와 같다. 여기서, W 는

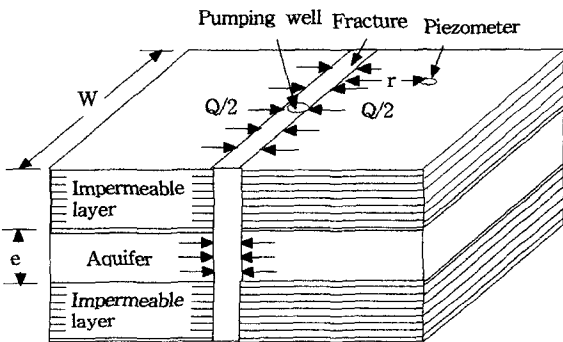


Figure 3. Model of groundwater flow in confined aquifer with infinite vertical fracture.

균열대의 길이가 무한할 때, 이것의 어떤 구간을 나타내고, e 는 대수층의 두께(L)이다. 무한한 길이의 수직 균열대에 직각 방향의 일차원 흐름에서는 어떤 구간 W 의 양쪽 경계는 불투수 경계와 같다.

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

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

여기서, s_f 는 우물손실상수(무차원)이다.

초기조건은 양수정으로부터 모든 거리에 대해서

$$s_w(r, t=0) = s(r, t=0) = 0 \quad (4)$$

이고, 경계조건은 양수시작후 임의의 시간 t 에 대해서

$$s(r=\infty, t) = 0 \quad (5)$$

이다.

상기 식들에 다음과 같은 무차원의 매개변수를 도입하자.

$$t_D = \frac{4Kt}{S_s r_w^2} \quad (6)$$

$$r_{sD} = r/r_w \quad (7)$$

$$s_D = \frac{4\pi^{1/2}Kb^2}{Q r_w} s \quad (8)$$

$$s_{wD} = \frac{4\pi^{1/2}Kb^2}{Q r_w} s_w \quad (9)$$

$$W_{sD} = \frac{W_s}{\pi^{1/2}b^2 r_w S_s} \quad (10)$$

따라서, (1), (2), (3)식을 (6)~(10)의 무차원 매개변수로 표현하면

$$\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D^2} = 4 \frac{\partial s_D}{\partial t_D} \quad (11)$$

$$W_{sD} \frac{\partial s_{wD}}{\partial t_D} = 1 + \frac{1}{2\pi^{1/2}} \left(\frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (12)$$

$$s_{wD}(t_D) = s_D(1, t_D) - s_f \left(\frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (13)$$

과 같이 표현된다. (11), (12), (13)식을 Laplace 변환시키면,

$$\frac{\bar{d}s_D^{15}2}{dr_D^2} = 4p \bar{s}_{1D} \quad (14)$$

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

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

이 된다. Laplace domain에서 양수정(우물저장효과와 우물손실효과를 고려함)과 대수층내의 수위강하(우물저장효과와 우물손

실효과를 고려하지 않음)의 일반해는 Barker식(1988)의 수위하강을 구하는 과정과 같으므로

$$\bar{s}_{wD} = \left\{ p \left[pW_{sD} + \frac{1}{2\pi^{1/2}} \frac{1}{K_{-0.5}^{0.5}(\sqrt{4p}) + s_f} \right] \right\}^{-1} \quad (17)$$

$$\bar{s}_D = \left\{ p \left[pW_{sD} + \frac{1}{2\pi^{1/2}} \frac{1}{K_{-1/2}^{1/2}(\sqrt{4p}) + s_f} \right] \right\}^{-1} \frac{r_D^{1/2} K_{1/2}(r_D \sqrt{4p})}{K_{1/2}(\sqrt{4p}) + s_f \sqrt{4p} K_{-1/2}(r_D \sqrt{4p})} \quad (18)$$

이 된다. 여기서, $K_\nu(z)$ 는 2종 ν 계 변형베셀함수(modified Bessel function of second kind and order ν)이고,

$$K_{-1/2}^{1/2}(z) = \frac{K_{1/2}(z)}{z K_{-1/2}(z)} \quad (19)$$

이다. (18)식에서 양수정의 우물저장효과와 우물손실효과를 무시하고, 양수정의 우물반경에 비해서 양수정과 관측정 사이의 거리가 충분히 클 때, (18)식을 선원해(infinitesimal source solution)로 고칠 수 있다.

$$\bar{s}_D = \frac{2^{1.5}}{p} \frac{K_{1/2}(\sqrt{4p})}{(4p)^{1/4}} \quad (20)$$

이다. 이 때, 우리가 관심을 가지는 것은 관측정에서의 수위하강 값이므로 무차원 변수에서 양수정의 반경보다는 관측정과 양수정간의 거리를 고려하는 것이 더 낫다. 따라서, 무차원 변수 (6)과 (8)을

$$t_D = \frac{4Kt}{S_s r^2} \quad (21)$$

$$s_D = \frac{4\pi^{1/2} K b^2}{Qr} s \quad (22)$$

로 수정할 수 있다. (17), (18), (20)식은 Stehfest algorithm (1970)에 의해서 실수영역으로 변환시킬 수 있으며, $K_{1/2}(z)$ 는 Abramowitz and Stegun(1972)을 이용하여 계산된다. 식 (20)의 실수해는

$$s_D = r_D^{2\nu} \int_0^\infty y^{-3/2} e^{-y} dy \quad (23)$$

이다. (22)식은

$$s_D = r_D^{2\nu} 2 \left(\frac{e^{-\sqrt{u}}}{\sqrt{u}} - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \sqrt{u} \right) \quad (24)$$

로 표현될 수 있다(Barker, 1988).

양수정의 우물저장효과와 우물손실효과를 고려한 양대수방안지의 표준곡선을 보면, 우물저장효과가 나타나는 양수초기에는 곡선의 기울기가 1을 나타내고 양수 후기로 가면서 기울기는 1/2이 된다(Figure 4). 우물저장효과(W_{sD})가 클수록 양수초기의 수위하강이 더 작게 나타나며, 우물저장효과의 지속시간

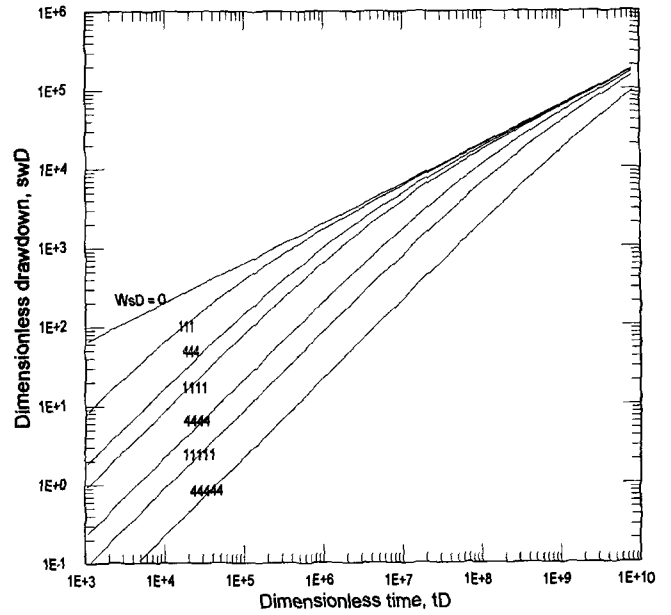


Figure 4. Selective type curves of linear flow with different wellbore storages at a pumping well.

이 길어진다. $W_{sD}=0$ 일 때는 처음부터 기울기 1/2의 직선으로 나타난다. Figure 5a는 흐름차원(n)이 1, 1.5, 2일 때의 표준곡선($n=1$ 일 때는 (23)식 또는 (24)식에 의한 표준곡선임)을 나타낸 것이다. $n=1$ 과 $n=2$ (방사상 흐름)의 수위변화를 비교해 보면, 양수초기에는 $n=1$ 이 $n=2$ 보다 수위하강율이 낮게 나타나지만 한계점을 넘어서면 수위가 급격하게 떨어지는 현상을 보인다. 표준곡선을 반대수방안지에 그려보면, $n=1$ 의 곡선의 기울기가 시간이 경과할수록 급해지는 것을 볼 수 있다(Figure 5b).

일차원 흐름의 경우에 투수량계수는 $T=Kc$ 로 나타낼 수 있으나, 균열암반 대수층의 경우에는 대수층의 두께와 균열대의 연장도 정확히 알 수 없는 경우가 많다. 따라서, 일차원의 경우에도 수리상수를 일반화 투수량계수(Kb^2)와 일반화 저류계수(S_b^2)로 나타내는 것이 좋을 것이다(합세영, 1995; Hamm and Biduax, 1996).

유한한 길이의 수직균열 이론

유한한 길이의 수직균열 이론에 입각한 지하수 흐름(예를 들면, Gringarten and Witherspoon, 1972; Gringarten and Ramey, 1973, 1974; Cinco-Ley and Samaniego-V., 1981; Sen, 1986)은 양수시간의 경과에 따라 흐름차원이 달라진다. Gringarten과 Witherspoon(1972)의 이론은 피압대수층내에 유한한 길이의 수리전도도가 매우 큰 수직균열이 존재할 때의 지하수 흐름에 관한 것이다(Figure 6). 이때 수직 균열은 유한한 길이로 연장된 우물과 같다. 이 이론의 조건으로는 대수층이 균질하고, 등방성이며, 두께는 일정하다. 그리고 대수층의 횡방향의 범위는 무한하며, 대수층의 상하는 불투수층으로 되어 있다. 지하수 배출과 동시에 지하수위가 하강하며, 양수정은 대수층을 완전 관통하고 있으며, 균열대의 중간에 위치하고 있고, 양수정의 공경은 무한소이고, 양수량은 일정하다. 또한 균열대의 폭은 무한소이

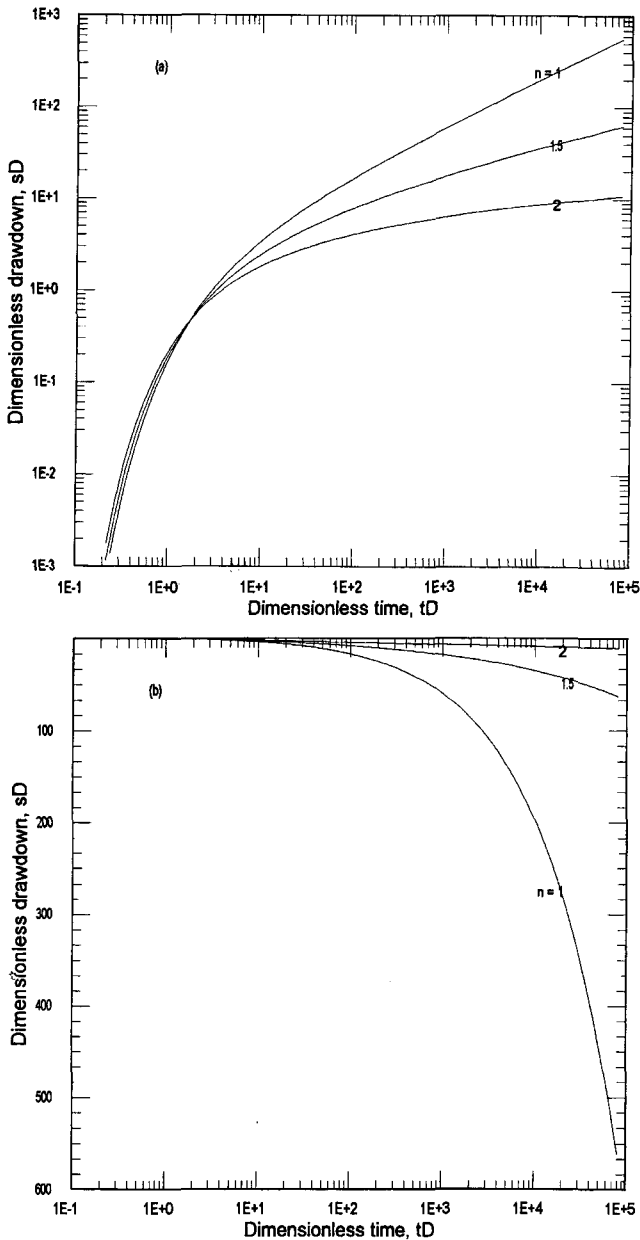


Figure 5. Type curves of flow dimension $n=1, 1.5$ and 2 .

며 대수층을 완전관통하고 있는 것으로 가정한다.

Cinco-Ley와 Samaniego-V.(1981)의 이론은 피압대수층내에 유한한 길이의 어떤 크기의 수리전도도를 가지는 수직균열이 존재할 때의 지하수 흐름에 관한 것이다(Figure 6). 이 이론의 조건으로는 대수층이 균질하고, 등방성이며, 두께는 일정하다. 그리고 대수층의 횡방향의 범위는 무한하며, 대수층의 상하는 불투수층으로 되어 있다. 지하수 배출과 동시에 지하수위가 하강하며, 양수정은 대수층을 완전 관통하고 있으며, 균열대의 중간에 위치하고 있고, 양수정의 공경은 일정한 크기를 가지고, 양수량은 일정하다. 또한 균열대의 폭은 일정한 크기를 가지며 대수층을 완전관통하고 있는 것으로 가정한다. 따라서, 균열대의 저류성(storage capacity)이 고려된다. Cinco-Ley와 Samaniego-V.(1981)의 이론에서는 수위강하의 양상이 4단계로 바뀐

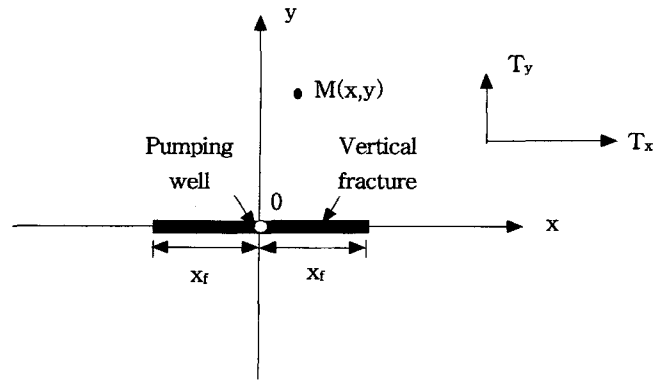


Figure 6. Model of groundwater flow in confined aquifer with finite vertical fracture (Gringarten and Witherspoon, 1972).

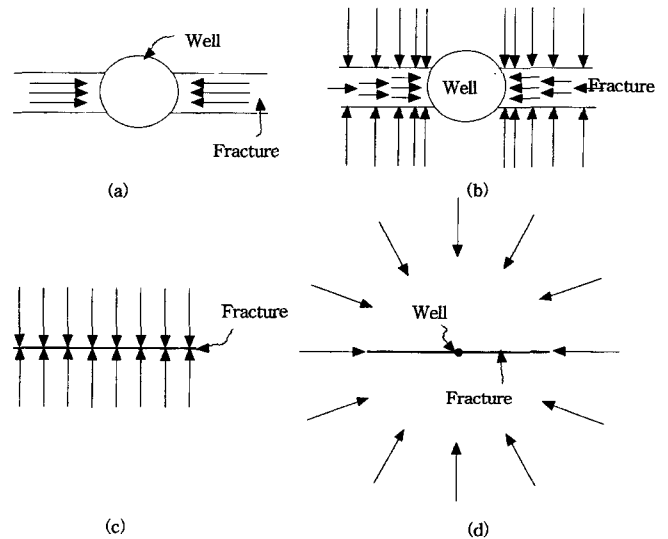


Figure 7. Model of vertically fractured well with storage capacity (Cinco-Ley와 Samaniego-V., 1981).

다(Figure 7). 양수초기인 첫 번째 단계에서는 우물로 들어오는 대부분의 지하수는 균열대로부터 공급되며, 일차원의 흐름(양대수방안지상에서의 기울기가 $1/2$ 임)을 보인다(Figure 7a). 두 번째 단계에서는 지하수가 균열대와 대수층에서 동시에 공급되며 이중적인 직선흐름(bilinear flow)을 나타낸다(Figure 7b). 1.5 차원의 흐름(양대수방안지상에서의 기울기가 $1/4$ 임)에 해당한다. 세 번째 단계에는 균열대에 직각방향의 일차원 흐름이 나타난다(Figure 7c). 마지막 단계에는 균열대를 중심으로 준방사상 흐름이 나타난다(Figure 7d).

적용 예

수리지질

연구지역(경북 영일군 대송면 옥명리)의 지질은 백악기의 응회암(안산암질, 석영안산암질 및 유문암질 응회암), 초기 내지 중기 마이오세의 연일세일 그리고 층적층으로 이루어져 있다(Figure 1). 응회암의 수직적인 분포를 보면, 최상부에 유문암질 응회암이 나타나며, 하부로 가면서 안산암질 응회암으로 변한

다. 응회암의 구성입자의 크기는 화산재(1/16~2 mm)에서부터 화산암괴(64 mm 이상)까지 다양하게 나타난다. 본 암석은 연구지역의 최하부에 위치하며, 연일세일과는 부정합관계를 가진다. 이러한 부정합관계는 대송면 옥명리 수각동 마을 북쪽 노두와 문덕동 가마골 마을 남쪽 약 500 m 지점에서 확인된다. 본 응회암은 일반적인 제3기 응회암보다 더 고화되어 있어서 백악기 유천층군에 속하는 것으로 보인다. 응회암내에 발달하는 대표적인 절리의 방향은 N50E, 80SE 그리고 N80W, 70SW의 두 방향이며, 이 중에서 지하수 유동방향과 관련되는 절리의 방향은 N80W 방향인 것으로 보인다. 이것은 양수시험분석결과 N 85.8W 방향이 주요한 지하수 통로 역할을 하는 것으로 나타났기 때문이다. 이 지역의 암반대수층은 응회암내에 발달되어 있으며 응회암내 균열대는 암반대수층 역할을 하고, 수직의 지하수 통로는 N85.8W 방향으로 발달된 수직구조대인 것으로 판단된다.

연일층군의 상부에 속하는 연일세일은 녹회색 세일, 실트스톤, 사암 및 이암으로 구성되며, 이들 암석은 호층을 이루면서 나타나고 있다. 그리고 응회암과의 접촉부에서는 어느 곳에서도 최하부에 녹회색 세립사암이 나타남이 특징적이다. 본 지역의 연일세일은 저각도의 배사 및 향사구조를 보여주고 있으나 광역적으로는 응회암의 침식면 위에 거의 평탄하게 퇴적되었을 것으로 보인다. 연일세일층은 양호한 대수층 역할을 하지 못하는 것으로 판단된다.

연구지역의 충적층은 연일세일로부터 유래하는 점토질 및 세립사 등의 퇴적물로 구성되어 있으며 간혹 응회암편도 들어 있다. 충적층은 보통 5~6 m의 두께를 가지고 있다.

양수시험 1

양수시험 1은 양수정 D9호공에서 실시되었으며 C3호공(중앙공)과 D7(태광2호공)은 관측점으로 이용되었다(Figure 2). D9호공의 심도는 44 m이고, C3호공의 심도와 양수정으로부터의 거리는 각각 288 m와 27.4 m, 그리고 D7호공의 심도와 양수정으로부터의 거리는 각각 300 m와 74.8 m이다.

양수정(D9호공)에서는 지표에서 10 m까지는 충적층과 세일로 되어 있으며, 그 보다 깊은 구간은 응회암으로 이루어져 있다.

C3호공(중앙공)의 감마선검층 자료에 의하면, 지표에서 13 m까지는 충적층과 세일로 되어 있으며, 그 이하부터 공저(288 m)까지는 응회암으로 구성되어 있다(임정웅외, 1987). 200 m까지는 케이싱의 영향으로 감마선 강도의 특별한 변화가 보이지 않으나, 221 m 부근과 270~280 m 구간에 균열대 또는 풍화대가 발달되어 있는 것으로 보인다.

D7호공(태광2호공)의 지질검층 자료에 의하면, 지표로부터 11 m까지는 충적층과 세일로 이루어져 있으며, 그 이하에서는 응회암(라필리 응회암, 각력질 응회암, 결정질 응회암, 응회질 세일)이 나타난다. 특히, 응회질 세일은 117.6~121 m, 297~300 m에서 비교적 큰 규모로 나타나고, 83.2 m, 85 m, 89.4 m, 167 m에서는 10~20 cm 두께로 협재되어 있다. 암석의 풍화도는 142 m 심도에서 커지며, 절리의 빈도는 180 m에서 커진다. 특히, 180~200 m 사이에는 중정도의 균열대(Moderately fractured zone)가 발달되어 있는데, 온도검층(임정웅외, 1987)

에 의하면 이 구간에서 온도가 급격히 떨어지는 현상을 보여주므로 지하수 유동대임을 지시한다.

양수시험시 양수정은 D9호공이고, 양수정으로부터 각각 27.4 m와 74.8 m 떨어진 C3호공(중앙공)과 D7(태광2호공)에서 수위를 관측하였다(Table 1과 Table 2). 그러나, 양수정에는 수위 측정관이 설치되지 않아서 수위변화가 관측되지 못했다. 양수시

Table 1. Field data at hole C3

Elapsed time (min)	Depth to water level (m)	Drawdown (m)	Elapsed time (min)	Depth to water level (m)	Drawdown (m)
1	0.570	0.005	45	0.678	0.113
1.5	0.577	0.012	50	0.687	0.122
2	0.578	0.013	55	0.695	0.130
3	0.580	0.015	60	0.701	0.136
4	0.580	0.015	70	0.715	0.150
5	0.584	0.019	80	0.731	0.166
6	0.585	0.020	90	0.745	0.180
7	0.587	0.022	100	0.760	0.195
8	0.590	0.025	110	0.768	0.203
9	0.595	0.030	120	0.780	0.215
10	0.600	0.035	150	0.810	0.245
12	0.603	0.038	180	0.835	0.270
14	0.610	0.045	240	0.882	0.317
16	0.618	0.053	300	0.923	0.358
18	0.620	0.055	400	0.984	0.419
20	0.625	0.060	500	1.043	0.478
25	0.635	0.070	600	1.085	0.520
30	0.645	0.080	800	1.060	0.495
35	0.657	0.092	1000	1.073	0.508
40	0.668	0.103	1186	1.103	0.538

Table 2. Field data at hole D7

Elapsed time (min)	Depth to water level (m)	Drawdown (m)	Elapsed time (min)	Depth to water level (m)	Drawdown (m)
1	2.360	0.000	45	2.470	0.110
1.5	2.361	0.001	50	2.480	0.120
2	2.362	0.002	55	2.487	0.127
3	2.363	0.003	60	2.495	0.135
4	2.365	0.005	70	2.510	0.150
5	2.370	0.010	80	2.520	0.160
6	2.373	0.013	90	2.535	0.175
7	2.378	0.018	100	2.550	0.190
8	2.380	0.020	110	2.560	0.200
9	2.385	0.025	120	2.570	0.210
10	2.390	0.030	150	2.600	0.240
12	2.393	0.033	180	2.630	0.270
14	2.400	0.040	240	2.675	0.315
16	2.405	0.045	300	2.705	0.345
18	2.410	0.050	400	2.775	0.415
20	2.415	0.055	500	2.830	0.470
25	2.425	0.065	600	2.875	0.515
30	2.437	0.077	800	2.860	0.500
35	2.445	0.085	1000	2.865	0.505
40	2.460	0.100	1186	2.893	0.533

험은 1190분간 실시되었으며, 양수량은 초기 600분간은 1063 m³/day(=1.23×10⁻² m³/sec)로 그리고 그 후 590분간은 550 m³/day(=6.36×10⁻³ m³/sec)로 유지하였다. C3공과 D7공과 양수정간의 거리가 서로 다름에도 불구하고, 양수 종료시(1186분)의 수위하강값은 0.54 m로 같은 값을 나타낸다. 이는 두 관측공과 양수정 사이의 수리적 성질이 방사상 흐름으로 설명될 수 없음을 나타낸다. 수위하강곡선을 양대수 방안에 도사해 본 결과, 양수정과 후기의 수위하강율이 0.6이며(Figure 8), 이는 양수지역 대수층이 일차원 흐름 모델로 대표될 수 있음을 나타낸다. 아울러서 이 지역에서 과거에 N80°W(양수시험 분석 결과 N85.8°W인 것으로 밝혀졌음)의 구조대를 따라서 샘이 용출하였다는 것이 알려져 있다(임정웅외, 1987). 이러한 사실을 종합해 볼 때, 본 지역의 지하수 유동은 방사상 흐름이 아닌 일차원 흐름으로 해석해야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 위의 사실들과 아울러 양수정과 관측정의 위치를 고려할 때, 균열대의 방향은 N85.8°W이며, 균열대에 직각 방향으로 C3공은 균열대의 북쪽에 그리고 D7공은 균열대의 남쪽에 각각 15.8 m 지점에 위치하고 있음을 알 수 있다(Figure 2). 또한, 이 지역의 수직 균열대는 동쪽으로 D7호공을 지나서 연장되는 것으로 보이나 동쪽의 연장 길이는 명확하지 않다. 따라서, 양수정(D9호공)은 수직 균열대의 연장의 중심보다 좌측에 위치하고 있으므로 Gringarten과 Witherspoon 모델(1972)이나 Cinco-Ley와 Samaniego-V. 모델(1981)로 해석하는 것이 부적당하다.

양수정의 심도(44 m)는 관측정에 비해서 알고 대수층을 불완전 관통하고 있다고 볼 수 있으나, 관측정이 대수층을 관통하고 있으며, 양수정이 위치하는 지점에 지하 심부까지 균열대가 발달하고 있으므로 양수정의 불완전 관통에 의한 효과는 나타나고 있지 않다.

양수시험 결과에 의하면, Kb²=KWe=1.685 m³/sec이고 Sb²=SWe=2.926 m로 계산되었다(Table 3). Figure 8은 관측정의 관측된 수위하강곡선과 일차원 흐름의 이론곡선 및 균열대의 폭이 무한소일 때의 양수정의 일차원 흐름 이론곡선을 도시한 것이다. 관측된 수위하강곡선은 일차원 흐름의 이론곡선과 잘 일치한다. 또한 양수정의 이론곡선은 양수초기부터 기울기 1/2의 직선으로 나타난다.

Figure 9a는 C3호공의 수위하강을 기준으로 했을 때, 양수정으로부터 27.4 m와 74.8 m 지점의 방사상 흐름의 이론곡선을 그린 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 C3호공의 수위하강 관측값과 이론곡선이 잘 일치하지 않으며, 74.8 m의 이론곡선과 D7호공의 수위하강 관측값은 전혀 맞지 않는다. D7호공의 수위하강을 기준으로 했을 때, 양수정으로부터 74.8 m 지점의 방사상 흐름의 이론곡선과 D7호공의 수위하강 관측값도 서로 잘 일치하지 않으며, 27.4 m의 이론곡선과 C3호공의 수위하강 관측값은 전혀 맞지 않는다(Figure 9b). Table 3에서 알 수 있는 바와 같이, Theis의 이론곡선에 의하면, 관측정 C3와 D7의 일반화 투수량계수는 거의 비슷하게 계산되지만, 일반화 저류계수는 D7호공이 C3호공보다 작게 나타난다. 이는 지형적인 거리를 고려했기 때문에 발생하는 결과이며, 일차원 흐름으로 해석할 때는 똑같이 15.8 m이다. 이와 같이 수리지질학적인 특성을 고려하지 않은 채, 단순히 방사상 흐름을 적용하여 수리상수를 구하면 실제 상황과는 다른 큰 오차를 범할 수 있다.

양수시험 2

양수시험 2는 경북 영일군 대송면 옥명리 산 170번지내에 위치하는 굴착공에서 수행되었다(임정웅외, 1990). 양수시험공

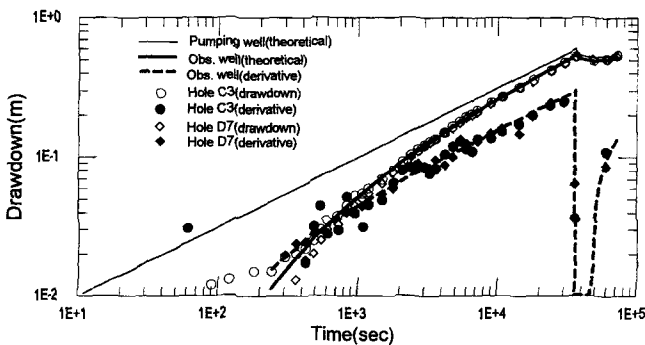


Figure 8. Analysis of the pumping test at Okmyeong-ri area using linear flow model.

Table 3. Analysis result for the pumping test

Pumped well	Obs. well	Kb ³⁻ⁿ , K ⁴⁻ⁿ s ⁻¹	Ssb ³⁻ⁿ , m ²⁻ⁿ	K/S _s , m ² s ⁻¹	W _s , m ²	S _f	r (m)	η
D9	C3	1.685	2.926	0.576			15.8	1
D9	C3	4.27×10 ⁻³	4.37×10 ⁻²				27.4	2
D9	D7	1.685	2.926	0.576			15.8	1
D9	D7	4.21×10 ⁻³	6.09×10 ⁻³				74.8	2
D10	D10	1.14×10 ⁻²	9.50×10 ⁻⁴	12.0	0	16.43	0.1	2
D10	D10	1.38×10 ⁻²	1.83×10 ⁻³	7.54	0	21.90	0.1	1.9

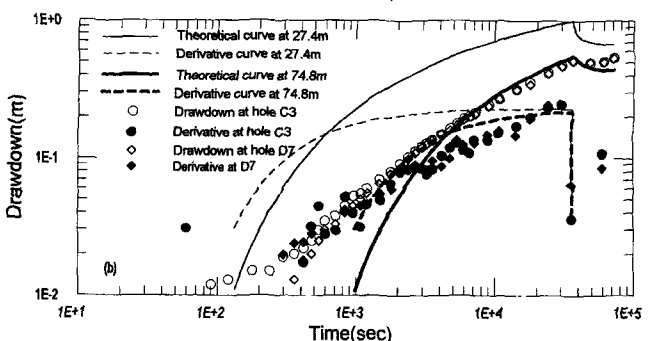
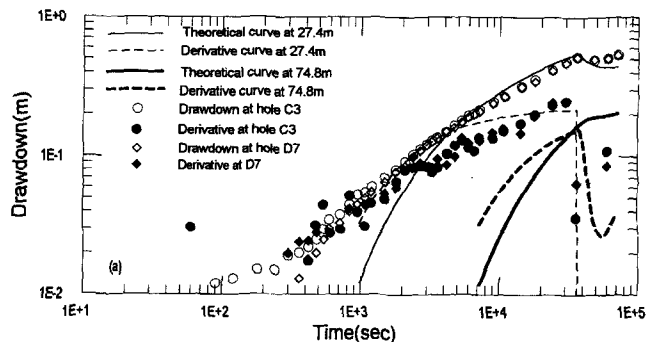


Figure 9. Analysis of the pumping test at Okmyeong-ri area using radial flow model.

(D10)은 양수시험1의 양수정인 D9호공으로부터 35 m 서쪽에 위치하며(Figure 2), 심도는 448 m이다. D10호공의 지질은 지표에서 10 m까지 층적층과 세일로 이루어져 있으며 10 m부터 공저까지는 옹회암으로 되어 있다. D10호공 부근의 수리지질을 보면, 108~114 m, 134~140 m, 144~152 m, 156~170 m, 230~242 m, 250~264 m, 276~284 m, 290~342 m, 360~366 m, 440~448 m 구간에 비교적 큰 대수층이 발달되어 있는 것으로 나타난다(임정웅외, 1990).

양수시험은 24시간동안 실시되었는데 양수경과 1000분까지는 양수량 720 m³/day, 그 다음 180분간은 600 m³/day, 마지막 260분간은 500 m³/day으로 양수하였다. 초기수위는 11.58 m였다. 수위하강은 양수정에서 측정되었다.

양수시험분석은 최초 1000분까지의 자료만 이용하였다. 수위하강곡선을 양대수방안지에 그려보면, 양수 후기의 곡선의 기울기는 0.03 정도가 된다(Figure 10). Figure 10은 n=2일 때와 n=1.9일 때의 양수시험분석 결과를 보여준다. 그림에서 n=1.9 일때가 n=2보다 약간 나은 결과를 보여주고 있으나 큰 차이는 보이지 않는다. 이것은 양수정 부근의 지하수 흐름이 일차원 흐름이 아닌 이차원 흐름에 가깝다는 것을 나타낸다. 따라서, 이 양수정은 N85.8°W 방향의 구조대의 영향이 거의 미치지 않

는 지점에 있으며, 즉, D10호공까지는 N85.8°W 방향의 구조대가 연장되지 않음을 의미한다.

결론 및 토의

균열암반대수층내 지하수유동 특성은 수리지질학적 특성과 현장 수리지시험분석에 의해서 이해할 수 있다. 본 연구에서는 수직적인 지질구조에 지배되는 일차원 지하수 유동의 이론적인 배경에 대해서 다루고, 이를 경북 영일군 대송면 옥명리에서 행한 양수시험(양수시험 1과 양수시험 2)에 적용하였다.

양수시험 1의 양수정은 D9호공이며 관측정은 C3호공(양수정으로 부터의 거리: 27.4 m)과 D7호공(양수정으로 부터의 거리: 74.8 m)이다. 양수시험1(양수정: D9호공)의 분석 결과, N 85.8°W 방향의 균열대에 직각 방향으로 C3공은 균열대의 북쪽에 그리고 D7공은 균열대의 남쪽에 각각 15.8 m 지점에 위치하고 있으며 균열대에 직각 방향으로 일차원 유동이 일어나고 있음을 알 수 있었다. 물론, 양수시험 1에서, 만약 C3와 D7이 같은 균열대로 연결되어 있다고 해도, C3호공과 D7호공의 수위강하가 똑같이 일어날 수 있으나, 이미 C3와 D7 사이에 약 N80°W 방향의 선상을 따라 샘들이 용출한 것이 확인되었고(임정웅외, 1987), 지질조사에서도 N80°W, 70°SW 방향의 절리 발달이 N85.8°W 방향의 수직적인 구조대의 발달을 암시하고 있다. 각종 물리검층이나 추적자시험 등을 통하여서 C3호공과 D7호공간의 지하수유동에 대한 보다 정확한 정보를 얻을 수 있을 것이나, 본 연구에서는 이에 대한 자세한 정보는 얻을 수 없었고, 다만 C3호공의 자연감마선검층과 D7호공의 시추코어검층 자료로는 C3호공과 D7호공이 구조적으로 직접 연결되어 있을 가능성은 낮은 것으로 보인다.

양수시험 2는 D9호공으로부터 서쪽으로 35 m 떨어진 D 10호공에서 실시되었으며 수위하강은 양수정에서만 관측되었다. 양수시험분석 결과, 이차원에 가까운 흐름차원(1.9~2차원)을 보여주고 있으며(Figure 10), 이는 N85.8W 방향의 균열대가 D10호공까지 연장되지 않음을 나타내는 것이다. 그러나, N 85.8W 방향의 균열대가 동쪽으로는 얼마만큼 연장되는지는 확인되지 않았으며, 이는 보다 상세한 지질구조분석과 함께 밝혀질 수 있을 것이다. 이와 같이, 균열암반내 지하수유동은 지질구조대의 분포 양상에 따라 지하수유동 차원이 시간적으로 또는 공간적으로 달라질 수 있다.

양수시험 1과 양수시험 2를 종합적으로 분석할 때, 수직 지질구조대의 연장은 서쪽으로는 D10호공까지는 미치지 못하고 동쪽으로는 D7호공을 지나서 연장되는 것으로 보이거나 동쪽의 연장 길이는 명확하지 않다.

지하수를 개발할 때, 균열암반 대수층내 지하수 유동이 방사상 유동차원(이차원)이 아닌 분할 유동차원을 보여주는 경우에는 개발초기에는 다량의 지하수가 산출하지만, 양수시간의 경과와 함께 어느 한계를 넘어서면, 수위가 급격하게 떨어지는 현상을 보인다. 이차원의 수위곡선을 양대수방안지에 도시하면, 기울기가 0에 접근하지만 이차원보다 작은 분할차원인 경우에는 기울기가 더 크다(Figure 5a 참조. 일차원의 경우에는 1/2, 1.5차원의 경우에는 1/4임). 또한, 편대수방안지에서는 이차원

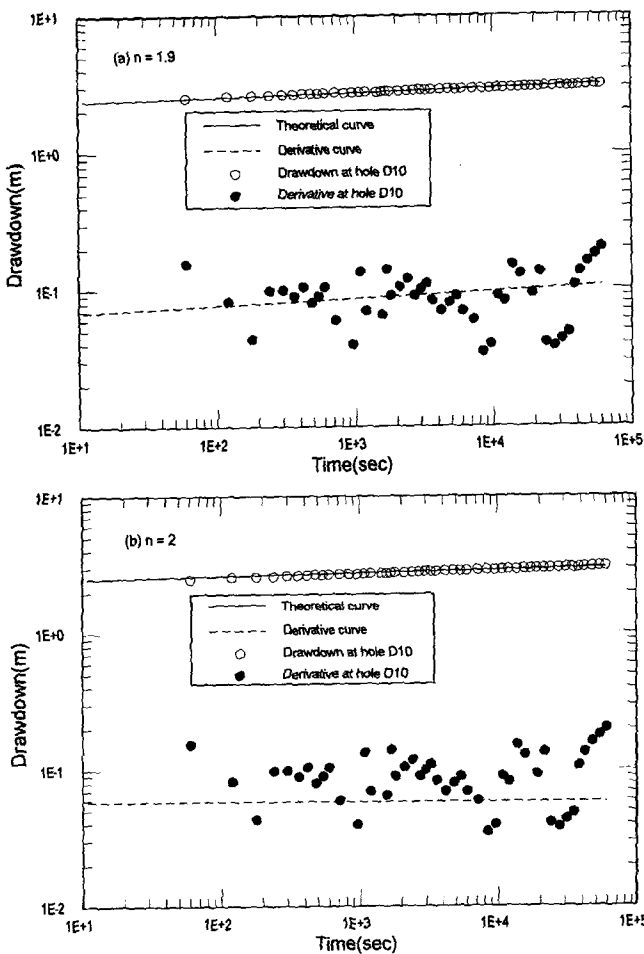


Figure 10. Analysis of the pumping test 2 at Okmyeong-ni area using (a) fractional flow and (b) radial flow models.

인 경우에는 직선으로 나타나지만, 이 보다 작은 분할차원인 경우에는 시간의 경과와 함께 기울기가 점점 더 급해지는 양상을 보인다(Figure 5b). 이러한 기울기 변화는 뚜렷한 불투수경계에 의해서 나타나는 것과는 다르며, 오히려 균열의 발달상태의 공간적인 변화에 따른 점이적인 수리전도도 변화에서 유래하는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 균열암반 대수층으로부터 지하수나 지열수를 개발할 때는 반드시 균열대의 발달범위를 파악하고, 수위하강곡선을 면밀히 분석하여 적정양수량을 결정하여야 한다. 이는 그 지역에서 장기적인 지하수 개발과 이용에 필수적인 조건이다.

사 사

이 연구는 한국자원연구소의 지원으로 이루어졌으며 연구를 지원해주신 관계기관에 감사드린다. 아울러서 논문심사를 맡아 주신 심사위원께도 감사드린다.

참고문헌

- 임정용, 김형찬, 함세영, 1987, 옥명지구 온천조사보고서, 한국동력자원연구소, 161p.
- 임정용, 함세영, 김형찬, 권영인, 김상연, 1990, 영일·옥명지구 온천공조사보고서, 온천 공조사보고서 90-2(No.41), 한국동력자원연구소, 58p.
- Abramowitz and Stegun, 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., Plégar, R. and Pistre, S., 1992, A new method of characterizing fissured media by pumping tests with observation wells, *J. Hydrol.*, 138, 77-88.
- Barker, J. A. 1988, A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, *Water Resour. Res.*, 24(10), p. 1796-1804.
- Cinco-Ley, H. and Samaniego-V., F., 1981, transient pressure analysis for fractured wells, *Jour. Pet. Tech.*, 33(Sept.), 1749-1766.
- 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, 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.*, 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.*, 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, p. T3B1-T3B6, Dtsch. Gesell., Essen, Germany.
- 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.
- 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), 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), 61-67.