

균열암반대수층의 적정채수량 산정의 적용성 연구

A Study on the Determination of Optimal Yield from Fissured Aquifers

함세영(Se - Yeong Hamm)* · 임정웅(Jeong - Ung Lim)** ·

배두중(Doo - Jong Bae)** · 최위찬(Uee - Chan Chwae)**

요 약 : 우리나라에서는 최근에 암반지하수 개발이 늘어나고 있으나 과잉 양수에 의한 암반지하수 고갈 및 수질오염이 우려된다. 따라서, 암반지하수 보존을 위해서는 양수정의 적정채수량을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 양수정의 적정채수량 결정을 위해서는 먼저 그 지역의 수리지질 특성에 맞는 지하수 모델을 이용하여 정확한 수리상수를 계산하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 적합한 모델을 이용하여 암반대수층의 수리상수를 결정하고, 자연적인 함양량의 범위내에서 암반대수층의 적정채수량을 산정하는 방법을 제시하였으며, 이 적정채수량 결정방법을 부산시 금련산에서 수행한 5개 굴착공의 양수시험에 적용하여 그 적용성을 분석하였다.

Abstract : Groundwater exploitation from fissured bedrocks is increasing in Korea and over-withdrawn from a lot of production wells may cause exhaustion of groundwater in the fissured aquifer. To conserve groundwater resources, it is needed to exactly determine the optimal yield of production wells. The optimal yield of the production wells can be determined as using suitable aquifer models with appropriate hydraulic parameters and natural recharge of the region. We applied the technique for evaluating optimal yield to the pumping test conducted in Mountain Geumryeon of Pusan City and analyzed its applicability.

서 론

수년 전부터 우리나라에서는 각종 용수(농업용, 생활용, 공업용, 먹는 샘물용 등) 목적으로 지하 심부(보통 100 m 이상의 심도)의 암반지하수를 개발하는 사례가 많아지고 있다. 특히, 온천수 개발을 위한 개발공의 깊이는 이미 700 m내지 800 m에 달하고 있으며 어떤 경우에는 1000 m를 넘는 경우도 있다. 이와 같이 암반지하수 개발이 증대하고 있으나 적정채수량을 정확히 판단하여 이를 지키지 않으면, 암반지하수가 고갈될 가능성도 있다.

지하수의 적정채수량이란 지하수계의 동적인 평형상태를 유지시키면서 장기적으로 사용할 수 있는 채수량이다. 따라서, 적정채수량은 지하수의 함양량을 넘지 않는 범위에서 결정되어야 한다. 광역적인 범위의 지하수 함양량은 그 지역의 지하수위 변화를 관측하여 지하수위 변화량에 저류계수(피압대수층의 경우) 또는 비산출량(자유면대수층의 경우)과 면적을 곱하므로써 구할 수 있다. 또 다른 방법은 물수지분석에 의한 방법으로서 그 지역의 평균강수량에 지하수함양 및 면적을 곱해서 구하는 방법이다. 그러나, 암반지하수는 지하심부의 균열대를 따라

흐르므로 정확한 부존범위를 알 수 없는 경우가 많으며, 또한 지하수함양율을 정확하게 산정하기도 쉽지 않다.

충분한 수리지질 자료(수리상수, 대수층의 횡적·수직적 범위, 경계조건, 지하수위 변동, 강수량, 지표유출량, 증발산량, 지하수함양량 등)를 확보한 경우에는 수치적인 지하수 모델링에 의해서 지역적인 적정채수량과 공당 취수량 배분 결정도 가능하나, 이러한 수리지질자료가 불충분한 상태에서는 수치적인 지하수모델링의 오차의 확률이 높아지며, 따라서 장기적인 예측도 어렵게 된다.

본 연구에서는 암반대수층의 적정채수량 결정을 위한 방법을 제시하고 이를 실제 양수시험 지역에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 적정채수량 결정을 위해서는 먼저 그 지역의 수리지질 특성에 맞는 지하수 유동 모델을 이용하여 수리상수를 결정하고, 그 다음에는 자연적인 함양량의 범위내에서 우물의 적정채수량을 산정하게 된다.

적정채수량 산정방법은 부산 금련산 지역의 5개의 굴착공(1, 2, 3, 4, 5호공)에 적용되었으며, 적정채수량 결정을 위해서는 지질 및 수리지질자료와 양수시험자료를 이용하였다. 지질조사 자료, 굴착공의 시추 및 물리검층자료 그리고 양수시험자료에 의하면, 이 지역의 대수층은 지표로부터 크게 자유면대수층, 반투수층(semipermeable layer) 그리고 누수대수층(leaky aquifer)으로 구분된다. 따라서, 양수시험분석 모델은 Hantush(1956, 1960)의 누수성 대수층 모델(leaky aquifer model), Hamm과

*부산대학교 지질학과(Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

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

Bidaux(1994)의 모델, 함(1997)의 모델 그리고 Barker(1988)의 모델이 이용되었으며, 특히, 양수정에서는 우물저장효과 및 우물손실효과를 고려하여 수리상수를 산출하였다.

양수시험분석시에는 수위하강을 곡선을 수위하강곡선과 함께 도시하여 분석함으로써 지하수유동 특성을 보다 명확히 파악하였다. 수위하강을 곡선은 최초로 Bourdet 등(1983)이 제안하였으며 저류층내 유체의 유동연구분야에서는 현재 일반적으로 이용되고 있다. 함세영과 임정용(1994)은 1차원에서 3차원 사이(2차원 포함)의 분할차원의 피압대수층(confined aquifer) 및 누수대수층(leaky aquifer)에 대한 수위하강곡선의 표준곡선을 제시하였다. 이들 표준곡선에는 양수정의 수위하강을 곡선(우물저장효과와 우물손실효과 포함)과 관측정의 수위하강을 곡선(우물저장효과와 우물손실효과를 포함하지 않음)이 있다.

적정채수량 산정방법

이론적인 배경

적정채수량 적용지역인 부산 금련산 지역에 적용된 모델은 누수를 포함하는 프락탈모델들(Hamm and Bidaux, 1994; 함세영, 1997)이므로 이들 모델의 이론적인 배경을 간략하게 설명한다. 누수를 포함하는 프락탈모델은 누수성의 프락탈대수층 위에 반투수층이 존재하는 것을 모형화한 것이다. 지하수흐름은 균열의 프락탈 분포에 좌우되고 따라서 흐름의 차원(n)은 $0 < n \leq 3$ 이 된다. 프락탈대수층 상부에 존재하는 반투수층(semipermeable layer)은 반투수층 상부의 자유면대수층으로부터 공급되는 지하수를 프락탈대수층으로 전달하는 역할을 한다. 이때, 반투수층의 비저유율(S_s')이 0인 경우(Hamm과 Bidaux, 1994)와 반투수층의 비저유율(S_s)이 0보다 큰 경우(함, 1997)가 있다. 그러나, 반투수층으로부터 대수층으로 공급되는 지하수량은 자유면대수층내 저수량과 비교할 때 상당히 작은 규모라고 가정하고 따라서 자유면대수층의 수위(h_0)는 일정하게 유지되는 것으로 가정한다. 또한, 프락탈대수층으로 공급되는 지하수량은 h_0 과 대수층의 수위(h_1)의 차에 비례($S_s'=0$ 인 경우) 또는 반투수층의 수위(h_2)와 h_1 의 차에 비례($S_s' > 0$ 인 경우)한다.

대수층내에서 양수정으로 향하는 지하수흐름을 생각할 때, 양수정으로부터의 거리 r 과 흐름의 단면적 $A(r)$ 은 흐름의 차원 n 에 좌우된다. 이를 식으로 나타내면

$$A(r) = b^{3-n} \alpha_n r^{n-1} \quad (1)$$

과 같이 표현된다. 여기서, b 는 지하수 흐름면에 수직 방향으로의 흐름의 범위이고, $\alpha = 2\pi^{n/2}/\Gamma(n/2)$ 이고 $\Gamma(n/2)$ 는 감마함수이다. 반투수층의 비저유율이 0일 때($S_s'=0$), 누수대수층내 지하수흐름의 평형방정식은

$$\frac{K}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s}{\partial r} \right) = S_s \frac{\partial s}{\partial t} + K \frac{s_1}{B^2} \quad (2)$$

와 같다. 여기서 K , S_s 는 각각 누수대수층의 수리전도도(LT^{-1})와 비저유율(L^{-1})이고, B 는 반투수층의 누수계수(L)이며, s_1 와 t 는 각각 양수정으로부터의 거리 $r(L)$ 의 누수대수층내 수위강하(L)와 양수정과시간이다. 2차원의 경우에 B 는 $(Tb'/K')^{1/2}$ 로 표

현된다. 여기서, K' 는 반투수층내 지하수 유동방향의 수리전도도(LT^{-1})이고, b' 는 반투수층내에서 지하수의 유동방향으로 반투수층의 범위(L)로 규정된다(2차원의 경우에 b' 는 반투수층의 두께에 해당된다). 양수정에서의 우물저장효과(well storage effect)를 고려할 때는

$$W_s (ds_w/dt) = Q + K b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-1} (ds_1/dr)_{r=r_w} \quad (3)$$

과 같은 식이 성립한다. 여기서 Q 는 양수량(L^3T^{-1}), s_w 는 양수정에서의 수위강하(L), r_w 는 양수정의 반경(L), b 는 지하수의 흐름에 직각 방향의 누수대수층의 범위(L), W_s 는 우물저장계수(L^2)이다. 또한 양수정의 우물손실효과를 고려하면

$$s_w(t) = s(r_w, t) - s_f r_w (ds_1/dr)_{r=r_w} \quad (4)$$

이 성립한다. 여기서 s_f 는 우물손실계수로서 무차원이다. 초기조건과 경계조건을 적용하면

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

$$\lim_{r \rightarrow \infty} s_1(r, t) = \lim_{r \rightarrow \infty} s_2(r, t) = 0 \quad (6)$$

과 같다. 여기서 s_2 는 반투수층내 수위강하(L)이다.

반투수층의 비저유율이 0보다 클 때($S_s' > 0$), 누수대수층내의 수위하강식은

$$\frac{K}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial s_1}{\partial r} \right) = S_s \frac{\partial s_1}{\partial t} + v \quad (7)$$

와 같다. 여기서 K 는 누수대수층의 수리전도도(LT^{-1}), S_s 는 누수대수층의 비저유율(L^{-1}), s_1 는 누수대수층의 수위강하(L), r 은 지하수 유동방향을 따라 양수정에서 누수대수층의 1개 점까지의 거리(L), v 는 반투수층으로부터 공급되는 단위체적당 지하수량(T^{-1}), n 은 지하수 유동차원으로서 $0 \leq n \leq 3$ 의 임의의 실수값이

다. 그리고, $v = -\frac{K'}{b'} \left(\frac{\partial s_2}{\partial z} \right)_{z=0}$ 와 같이 표현된다. b' 는 반투수층

내에서 지하수의 유동방향으로 반투수층의 범위(L)로 규정된다. 그리고 K' 는 반투수층내 지하수 유동방향의 수리전도도(LT^{-1})이다. 또한, 반투수층의 수위하강식은

$$\frac{\partial^2 s_2}{\partial z^2} = \frac{S_s'}{K'} \frac{\partial s_2}{\partial t} \quad (8)$$

와 같다. 여기서 S_s' 는 반투수층의 비저유율(L^{-1}), s_2 는 반투수층내의 수위강하(L), z 는 지하수 유동방향을 따라 반투수층의 한 점으로부터 누수대수층의 경계까지의 거리(L)이다.

(2)~(8)식에 아래와 같이 무차원의 매개변수들을 대입하고:

$$t_D = \frac{4Kt}{(S_s + S_s')r_w^2} \quad (9)$$

$$r_D = r/r_w \quad (10)$$

$$B_D = B/r_w \text{ (Hamm과 Bidaux(1994)의 경우에만 고려함)} \quad (11)$$

$$z_D = r/b'$$

(Hamm과 Bidaux(1994)의 경우에는고려하지 않음) (12)

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

(Hamm과 Bidaux(1994)의 경우에는고려하지 않음) (13)

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

(Hamm과 Bidaux(1994)의 경우에는고려하지 않음) (14)

$$s_{iD} = \frac{4\pi^{n/2}Kb^{3-n}}{Qr_w^{2-n}} s_i$$

(i=1(누수대수층), 2(반투수층), w(양수정)) (15)

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

(Hamm과 Bidaux(1994)의 경우에는 S_s'=0임) (16)

Laplace domain에서 양수정의 수위강하를 구하면

$$\bar{s}_{wD} = 1/p \left(pW_{sD} + \frac{1}{2I(n/2)} \times \frac{1}{s_f + K_v(\sigma)/(\sigma K_{v-1}(\sigma))} \right)$$
 (17)

와 같다. 여기서 p는 Laplace변수이고, K_v는 2종 v개의 수정베셀함수이다. v와 σ는

$$v = 1 - n/2$$
 (18)

$$\sigma = \sqrt{4p + 1/B_D^2} (S_s'=0인 경우)$$
 (19)

$$\sigma = \left[4p\omega + \lambda \eta \coth(\eta) \right]^{1/2} (S_s'>0인 경우)$$
 (20)

와 같다. 여기서 η² = $\frac{4p(1-\omega)}{\lambda}$ 이다.

관측공에서의 수위강하는

$$\bar{s}_{iD} = \frac{2I(n/2)}{p \left[1 + 2I(n/2)p W_{sD} K_{v-1}(\sigma) \right]} \frac{r_D^v K_v(\sigma_D)}{\sigma K_{v-1}(\sigma)}$$
 (21)

과 같다. 여기서 $K_{v-1}(\sigma) = \frac{K_v(z)}{zK_{v-1}(z)}$ 이다. S_s'=0인 경우에 (21)

식의 선원(line source)의 실수해는

$$s_{iD}(r_D, t_D) = r_D^{2v} G(-v, r_D^{2v}/t_D, r_D/B_D)$$
 (22)

와 같다. 여기서, u=r_D^{2v/t_D}, β=r_D/B_D라 두면

$$G(-v, u, \beta) = \int_0^{+\infty} y^{-v-1} e^{(-y-\beta^{2/4}y)} dy$$
 (23)

과 같이 표현된다. S_s'>0인 경우에 반투수층내의 수위하강식은

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{iD} \sinh[(1-z_D)\eta]}{\sinh(\eta)}$$
 (24)

와 같다.

수위하강곡선 분석

양대수방한지에 도시한 수위하강을 곡선은 수위하강곡선보다 수위변화를 뚜렷이 보여주므로, 지하수유동이 어떤 모델에

더 잘 맞는지를 알아내는데 유용하게 쓰일 수 있다. 양수정의 경우에 수위하강을 $\Delta s_{wD}/\Delta \ln t_D$ 로 표현되고 관측정의 경우에는 $\Delta(s_D/r_D^{2n})/\Delta(\ln t_D/r_D^2)$ 로 표현된다. 이때 수평축은 t_D/r_D^2 가 된다. 누수대수층의 수위하강을 곡선의 특징은 관측정의 경우에는 어느 정도 양수시간이 경과한 후에 곡선이 급하게 아래로 처지는 형태를 보인다. 양수정의 경우에는 양수초기에는 우물저장효과와 우물손실효과 때문에 위로 볼록한 형태를 보이 나 어느 정도 양수시간이 경과한 후에 곡선이 아래로 처지는 형태를 보인다. S_s'=0인 누수대수층의 경우에는 B_D가 작으면 작을 수록 그리고 S_s'>0인 누수대수층의 경우에는 λ가 크면 클수록 수위하강을 곡선이 더 급격히 아래로 처진다.

Barker 모델에서 관측정의 수위하강을 곡선의 기울기는 1차원은 1/2, 1.5차원은 1/4 그리고 2차원은 0.08의 값을 가진다. 양수정의 경우는 양수 초기에는 우물저장과 우물손실 효과 때문에 수위하강을 곡선의 형태가 위로 볼록한 형태를 보이나, 양수 후기에는 관측정의 경우와 같은 기울기를 가진다.

매개변수의 결정 및 적정채수량 산정

양수정에서 우리가 구하고자 하는 변수는 K, S_s, K', S_s', W_s, s_f, B, b, b'이고 관측공의 경우에는 일반적으로 W_s, s_f를 구할 필요가 없다(물론, 공경이 큰 관측정이 양수정에 가까이 위치할 때는 우물저장 효과와 우물손실효과가 일어날 수 있다). 앞에서 열거한 수리적 매개변수(hydraulic parameters)인 K와 b, S_s와 b'는 서로 연관되어 있다. Kb³⁻ⁿ이 일정하다고 할 때 K가 커지면 b는 감소하고, 반대로 b가 커지면 K는 감소한다. 이와 마찬가지로 S_s와 b도 단일 매개변수인 S_sb³⁻ⁿ로 표현될 수 있다. Kb³⁻ⁿ는 일반화 투수량계수(generalized transmissivity)라 하고 S_sb³⁻ⁿ는 일반화 저류계수(generalized storativity)이다(함세영, 1995). n=2(이차원)인 경우에, Kb³⁻ⁿ는 투수량계수(T)가 되고, S_sb³⁻ⁿ은 저류계수(S)가 된다. 마찬가지로, 비저유율을 가지는 반투수층에서는 K'b³⁻ⁿ와 K'/S_s'를 구할 수 있다. 따라서, 양수정에서 우리가 구하고자 하는 수리상수는 Kb³⁻ⁿ, S_sb³⁻ⁿ, W_s, s_f, K'b³⁻ⁿ, K'/S_s'(S_s'>0인 경우) 또는 Kb³⁻ⁿ, S_sb³⁻ⁿ, W_s, s_f, B(S_s'=0인 경우)이고, 관측정의 경우에는 W_s와 s_f를 고려하지 않는다. W_s는 우물의 반경과 비슷한 경우가 많으므로 먼저 우물의 반경을 대입하여 반복 계산과정을 거쳐서 결정된다. s_f의 계산 역시 시행착오 과정을 거쳐서 결정된다. s_f는 일반적으로 관측정과 양수정의 수리상수 값이 서로 일치하거나 거의 일치하는 범위내에서 결정하는 것이 합리적이다.

이와 같이 양수시험분석으로 구한 수리상수를 이용하고, 장기적인 지하수위변동 자료나 지하수함량률에 의해서 그 지역의 자연적인 함양량을 참고하여 상당히 합리적인 적정채수량을 구할 수 있을 것이다. 그러나, 이와 같이 굴착공의 개발 초기에 구한 적정채수량도 장기적인 지하수 개발에 따른 지하수 유동범위 및 공간적인 수리지질 특성변화에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 지하수 채수와 함께 양수정과 관측정(감시정)에서 동시에 지속적인 지하수위 관측이 실시되어야 한다. 특히, 양수정에서의 수위변화 관측은 관측정의 수위측정보다 오히려 중요성을 가질 수도 있다. 장기적인 수위변화 자료를 분석하여 초기에 산정된 적정채수량이 합리적이었는지를 검증할 수 있다.

적정채수량 산정방법의 적용

지질 및 지질구조

부산 금련산 지역의 5개 굴착공(1, 2, 3, 4, 5호공)이 양수시험공으로 이용되었으며(Figure 1) 이들 공의 적정채수량이 상기 적정채수량 산정방법에 의해서 결정되었다. 지질은 백악기 유천층군에 속하는 상위의 퇴적암류(회색, 암회색, 암록색, 갈회색 셰일, 실트스톤 및 사암)와 하위의 화산암류(유문암질암, 안산암 및 안산암질 응회암) 그리고 화산암류를 관입한 불국사 화강암(각섬석 화강섬록암)으로 구성되어 있다(임정웅외, 1995). 시추결과에 의하면, 화산암류는 하부로부터 유문암질암, 안산암질 응회암, 안산암의 순서로 놓여 있다.

굴착공의 약 3.2 km 서측에는 N15°E의 주향을 갖는 동래단층이 위치하고 있으며, 동래단층으로부터 파생된 NS주향의 정단층이 굴착공의 약 800 m 서쪽에 위치한다(임정웅외, 1995). 이와 함께 여러 조의 NS주향의 소규모 단층들도 나타나고 있다(Figure 1). 굴착공의 약 340 m 서쪽에는 주향 N30°E, 75°NW의 비교적 큰 규모의 단층이 발달되어 있다. 이 지역에서 최후기의 단층방향은 N40~50°W, 75°NE이고, 단층의 간격이 50~100 m 정도로서 그 빈도가 NS방향이나 N30°E보다 우세하다(Figure 1). 이러한 균열 및 단층의 발달상태는 지하수의 유동방향과 범위, 투수성 및 저류성과 밀접한 관련성을 가질 것이다.

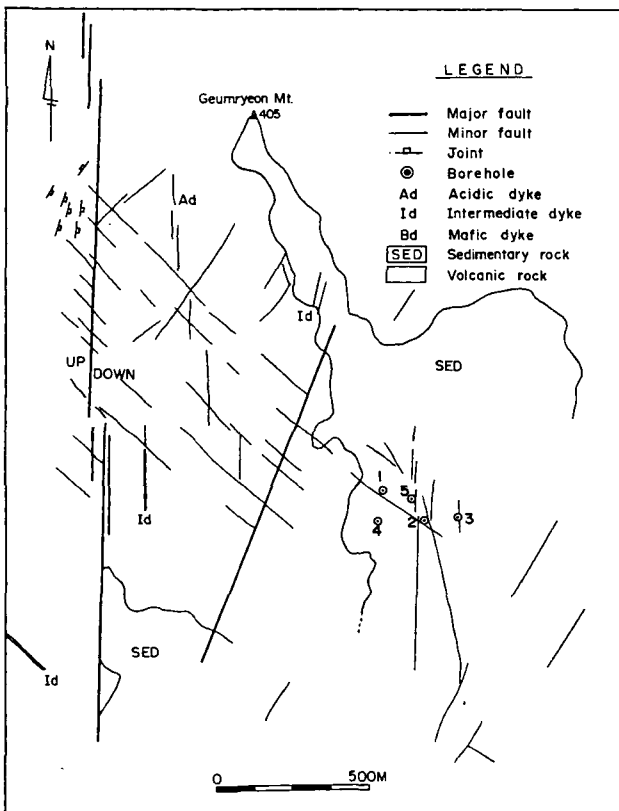


Figure 1. Geology of Mountain Geumryeon area.

굴착공 주변의 수리지질

연구지역의 최상부에 위치하는 충적층 및 풍화대는 자유면대 수층이다. 그 하부에 위치하는 유천층군의 퇴적암류(주로 셰일 질 사암, 셰일 및 실트스톤의 호층으로 구성됨)에는 균열대가 잘 발달되어 있지 않으므로 양호한 대수층이 아닌 것으로 판단된다. 그러나, 최하위지층인 화산암류 내에는 2차공극(균열대, 파쇄대, 단층대 등)의 발달에 의한 균열대수층(fissured aquifer)이 존재하는 것으로 판단된다.

물리검층(자연감마선 검층 및 온도검층)자료 및 시추당시 기록에 의하면 1호공의 경우에는 420 m 부근, 2호공은 560~580 m 구간, 3호공은 560 m 부근, 4호공은 510~520 m 구간 그리고 5호공은 575 m 부근이 주요한 대수층인 것으로 판단된다. 따라서, 굴착공의 주 대수층 발달구간은 전체적으로 500~600 m 사이로 나타난다(임정웅외, 1995).

이 지역의 주 단층들인 NS, N30°E, N40~50°W 방향의 단층은 대수층의 범위를 결정하는 중요한 요인이 되며, 1호공과 2호공을 통과하는 N40~50°W 방향의 단층, 4호공과 1호공의 서쪽에 위치하는 N30°E 방향의 단층, 2호공과 5호공을 단속적으로 연결하는 NS방향의 단층은 주요한 지하수 통로 역할을 하는 것으로 판단된다. 또한, 3호공과 2호공사이에 위치하는 남북방향의 단층은 불투수경계인 것으로 판단된다. 그러나, 전체적으로 볼 때는 굴착공주변의 단층 및 파쇄대의 공간적 분포가 비교적 균일하며, 이것은 본 지역의 투수성이 비교적 균일하다는 것을 암시한다.

4개 굴착공(1, 2, 4, 5호공)의 해발고도로 환산된 자연수위는 해발 2 m에서 4.5 m 사이에 분포하고 있다. 이렇게, 조사공들의 지하수두가 거의 해수준면에 가까이 위치하는 이유는 조사공들의 상부 대수층을 케이싱과 그라우팅으로 처리하여 심부 대수층만의 수두를 나타내기 때문인 것으로 생각된다.

양수시험분석

양수시험은 금련산의 5개의 굴착공(1, 2, 3, 4, 5호공)에 대해서 이루어졌으며(Figure 1) 그 심도는 629 m에서 729 m 범위에 있다(Table 1). 양수시험은 5차례 실시되었으며 하나의 굴착공을 양수정으로 할 때 다른 공들은 관측공으로 이용하였다. 양수시험의 시작시에 모든 공들은 자연수위를 유지하도록 하였으며, 유량측정은 오리피스를 사용하였고, 수동식 수위측정기를

Table 1. Description of test holes

Hole no.	Longitude Latitude	Hole dia. (inch)	Hole depth (m)	Casing
1	129° 6' 1.2" 35° 7' 46.5"	6	629	0~430 m
2	129° 6' 3.24" 35° 7' 45.94"	6	729	0~580 m
3	129° 6' 4.68" 35° 7' 46.07"	8	634	0~120 m
4	129° 6' 1.41" 35° 7' 45.92"	8	632	0~115 m
5	129° 6' 2.88" 35° 7' 46.99"	6	640	0~588 m

사용하여 양수에 따른 수위변화를 측정하였다.

지질조사자료와 굴착공의 시추 및 물리검층자료에 의하면, 연구지역의 암반대수층은 크게 자유면대수층, 반투수층(semi-permeable layer) 그리고 누수 균열대수층(leaky fissured aquifer)으로 구분될 수 있다. 또한, 양수시험시 양수 경과 얼마후에 수위가 안정화되는 현상은 반투수층으로 부터의 누수(leakage)에 의한 것임을 암시한다. 왜냐하면 이 지역에는 함양경계(recharge boundary) 등의 함양원이 존재하지 않기 때문이다. 조사공들은 모두 반투수층 최하부까지 케이싱 처리를 하고 그 하부에서 채수하는 관계로 양수시험의 대상은 바로 반투수층 하부의 암반대수층이다. 균질 등방 대수층에 설치한 관측공의 경우에는 Hantush의 누수성 대수층 모델(leaky aquifer model)을 이용하면 되나, 대구경의 양수정에서는 우물저장효과 및 우물손실효과를 고려하여야 하므로 원칙적으로는 Hantush의 식을 적용시키는 것이 불합리하다. 그러므로, 본 연구에서는 앞에서 언급한 대로 누수를 포함하는 프락탈모델(Hamm and Bidaux, 1994; 함, 1997)를 이용하여 수리상수를 산출하였다. 그러나, 3호공은 나머지 4개공과 달리 누수현상을 보여주지 않으므로 Barker의 모델을 이용하여 수리상수를 산출하였다.

1호공의 양수시험분석

1호공의 양수시험은 2,880분간 실시하였으며 이때 양수량은 350 m³/day였다. 양수시험 동안 양수정(1호공), 114 m 떨어진 4호공 그리고 105 m 떨어진 5호공에서 수위변화가 관측되었다.

1, 4, 5호공의 수위관측자료를 누수대수층의 모델(Hamm과 Bidaux, 1994; 함, 1997)을 이용하여 분석한 결과(Table 2, Figure 2, Figure 3), 양수정(1호공)의 투수량계수와 저류계수가 가장 높게 나타났으며, 관측정(4, 5호공)의 투수량계수와 저류계수는 서로 비슷한 값을 보이고 있다. 관측정에서는 Ss' = 0인 경

우의 누수대수층 모델을 적용하면 이론곡선과 측정값이 잘 일치함을 보여주고 있다(Figure 2). 이때 누수계수 B는 모든 공에서 1000 m를 나타내고 있다. 그러나, 양수정에서는 S_s'>0인 경우의 누수대수층 모델이 S_s'=0인 경우보다 더 좋은 결과를 보여주므로 적정채수량 산정에는 S_s'>0인 경우의 누수대수층 모델을 적용하였다(Figure 3). 이때 누수대수층의 투수량계수와 저류계수는 S_s'=0인 경우와 동일하다. 반투수층의 K'/Ss'는 0.002 m²/sec으로서 누수대수층의 K/Ss 7.01 m²/sec보다 1/3505배 정도의 값을 가진다.

2호공의 양수시험분석

2호공에서의 양수시험은 2890분간 실시되었으며 양수량은 500 m³/day이었다. 관측정은 양수정(2호공)으로부터 각각 180 m, 126 m, 87 m 거리에 위치한 1호공, 4호공, 5호공을 이용하였다.

2, 1, 4, 5호공의 수위관측자료를 누수대수층의 모델(Hamm과 Bidaux, 1994; 함, 1997)을 이용하여 분석한 결과(Table 2, Figure 2, Figure 3), 2호공의 투수량계수와 저류계수가 상대적으로 높게 나타났다. 또한, 2호공은 5개 굴착공 중에서 가장 높은 수리상수값을 보여주고 있다. 이것은 2호공 주변이 상대적으로 주요한 대수층을 형성하고 있음을 나타낸다. 관측공인 1호공과 5호공의 투수량계수는 서로 비슷한 값을 보이고 있으나 4호공의 투수량계수는 이보다 낮게 나타나고 있다. 관측정(1, 4, 5호공)에서는 S_s'=0인 경우의 누수대수층 모델을 적용하면 이론곡선과 측정값이 잘 일치함을 보여주고 있다(Figure 2). 누수계수 B는 1호공에서는 1000 m를 나타내고 있으나 2, 4, 5호공에서는 500 m를 나타낸다. 이는, 1호공보다 2, 4, 5호공부근에서 누수효과가 더 크다는 것을 나타낸다. 양수정에서는 S_s'>0인 경우의 누수대수층 모델이 S_s'=0인 경우보다 더 나은 결과를 보여

Table 2. Analysis result for the pumping test

Pumped well	Obs. well	$Kb^{3-n}, m^{4-n}s^{-1}$	$S_s b^{3-n}, m^{4-n}$	$K'b^{3-n}, m^{4-n}s^{-1}$	$K'/S_s, m^2s^{-1}$	W_s, m^2	s_r	B, m	n	Model
1	1	3.33×10^{-4}	4.75×10^{-5}	2.0×10^{-5}	0.002	1.0	0.3		2	*Leaky2
1	1	3.33×10^{-4}	4.75×10^{-5}			1.0	0.3	1000	2	*Leaky1
1	4	2.25×10^{-4}	3.75×10^{-5}					1000	2	*Leaky1
1	5	2.28×10^{-4}	3.25×10^{-5}					1000	2	*Leaky1
2	2	5.12×10^{-4}	6.10×10^{-5}	3.0×10^{-6}	0.002	3.5	0.3		2	*Leaky2
2	2	5.12×10^{-4}	6.10×10^{-5}			3.5	0.3	500	2	*Leaky1
2	1	1.70×10^{-4}	1.70×10^{-5}					1000	2	*Leaky1
2	4	1.22×10^{-4}	2.65×10^{-5}					500	2	*Leaky1
2	5	1.67×10^{-4}	5.75×10^{-5}					500	2	*Leaky1
3	3	6.47×10^{-5}	2.26×10^{-5}			0.034	0.75		1.8	*Baker
4	4	1.64×10^{-4}	3.90×10^{-5}	1.65×10^{-5}	0.002	0.03	3.7		2	*Leaky2
4	4	1.64×10^{-4}	3.90×10^{-5}			0.03	3.7	1000	2	*Leaky1
4	1	2.28×10^{-4}	3.80×10^{-5}					1000	2	*Leaky1
4	5	1.64×10^{-4}	3.90×10^{-5}					500	2	*Leaky1
5	5	3.40×10^{-4}	7.65×10^{-5}	1.3×10^{-5}	0.002	0.2	1.15		2	*Leaky2
5	5	3.40×10^{-4}	7.65×10^{-5}			0.2	1.15	1000	2	*Leaky1
5	1	2.17×10^{-4}	3.10×10^{-5}					1000	2	*Leaky1
5	2	1.73×10^{-4}	5.95×10^{-5}					500	2	*Leaky1
5	4	1.60×10^{-4}	3.80×10^{-5}					500	2	*Leaky1

*Leaky1: leaky fractal model with S_s'=0; *Leaky2: leaky fractal model with S_s'>0; Barker: Barker's model.

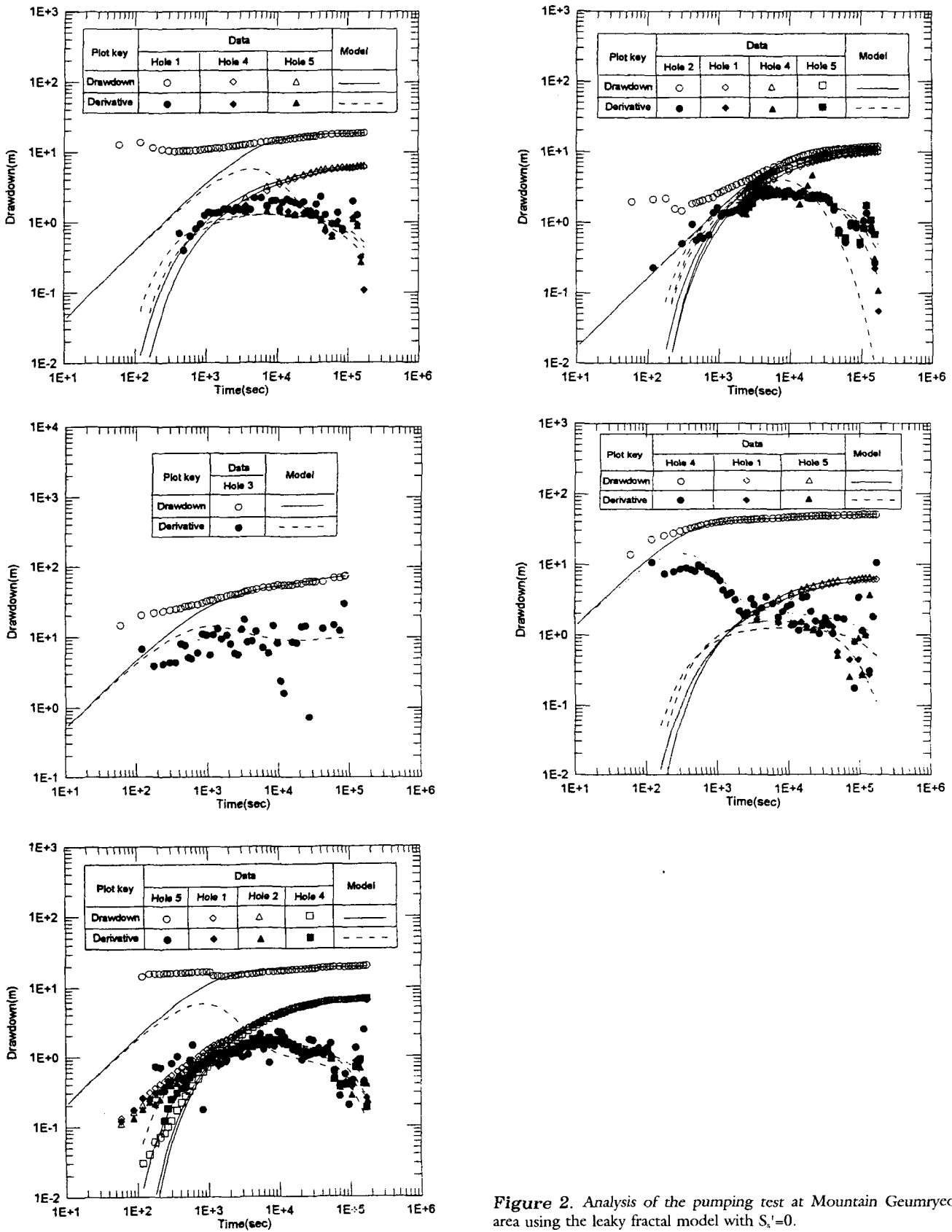


Figure 2. Analysis of the pumping test at Mountain Geumryeon area using the leaky fractal model with $S_{i'}=0$.

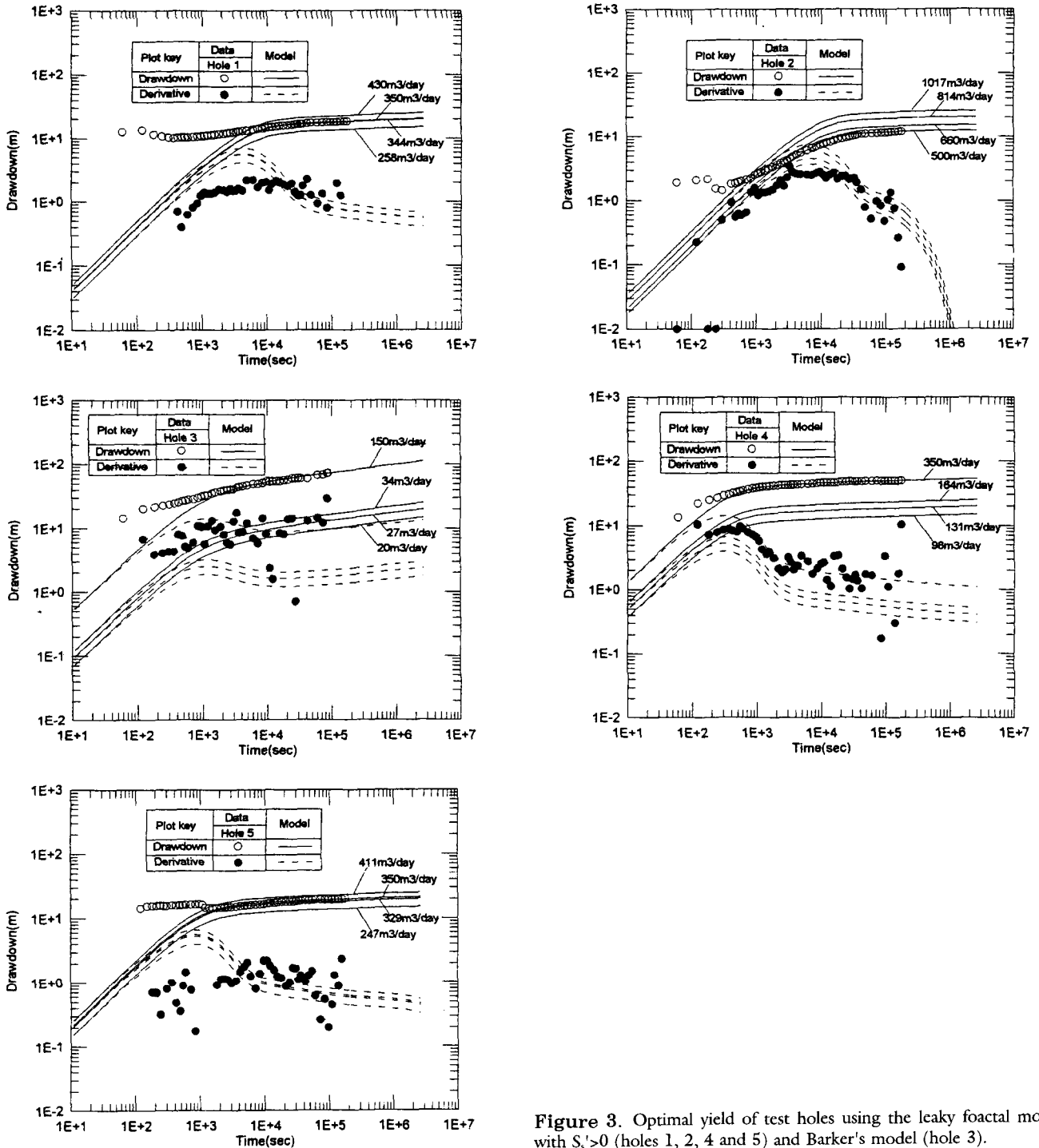


Figure 3. Optimal yield of test holes using the leaky foactal model with $S_v > 0$ (holes 1, 2, 4 and 5) and Barker's model (hole 3).

주요로 적정채수량 산정에는 $S_v > 0$ 인 경우의 누수대수층 모델을 적용하였다(Figure 3). 이때 누수대수층의 투수량계수와 저류계수는 $S_v = 0$ 인 경우와 동일하다. 반투수층의 K'/S_v 는 $0.002 \text{ m}^2/\text{sec}$ 이고 누수대수층의 K/S_v 는 $8.39 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로서 2호공의 K/S_v 가 1호공보다 크다.

3호공의 양수시험분석

3호공의 양수시험은 $150 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 1455분간 실시되었다. 이때 1, 2, 4, 5호공에서 수위관측을 시도하였으나 수위변화가 일어나지 않았다. 따라서, 지질조사 결과 밝혀진 남북방향의 단층이 3호공과 1, 2, 4, 5호공 사이에 불투수대 역할을 하고 있는 것으로 판단된다. 3호공은 반투수층의 누수영향을 보여주지 않으므로 누수대수층 모델을 이용하지 않고 Barker의 모델을 이용하였다(Figure 2). 수위하강을곡선에서 보여주듯이 부분적으로

값이 분산되기도 하지만 전체적으로는 수위하강율이 상승하는 경향성을 보여주고 있으며 2차원보다 작은 1.8차원의 유동차원을 나타낸다. 그러므로, 3호공이 위치하는 대수층은 양수시간이 경과하면 할수록 수위하강이 더 가속화될 것으로 판단된다.

4호공의 양수시험분석

4호공의 양수시험은 2880분간 실시하였으며 양수량은 350 m³/day이었다. 관측정은 1호공, 5호공이며 양수정(4호공)으로부터 각각 114 m, 111 m 거리에 위치한다.

4, 1, 5호공의 수위관측자료를 누수대수층의 모델(Hamm과 Bidaux, 1994; 함, 1997)을 이용하여 분석한 결과(Table 2, Figure 2, Figure 3), 4호공과 5호공의 투수량계수와 저류계수가 같은 값을 보이고, 1호공의 투수량계수는 이보다 높게 나타난다. 양수정이 4호공일 때 관측정 1호공의 수리상수와 양수정이 1호공일 때 관측정 4호공의 수리상수값이 거의 같고, 양수정이 4호공일 때 관측정 5호공의 수리상수와 양수정이 5호공일 때 관측정 4호공의 수리상수값도 거의 같다. 또한, 양수정이 1호공일 때 관측정 5호공의 수리상수와 양수정이 5호공일 때 관측정 1호공의 수리상수값도 거의 같다. 이는 1, 4, 5호공이 동일한 대수층에 위치하고 있으나 1-4호공, 4-5호공, 1-5호공간의 수리적 성질에 약간 차이가 있음을 지시하는 것이다. 관측정(1, 5호공)에서는 S_w'=0인 경우의 누수대수층 모델을 적용하면 이론곡선과 측정값이 잘 일치함을 보여주고 있으며(Figure 2) 누수계수 B는 1호공에서는 1000 m를 나타내고 있으나 5호공에서는 500 m를 나타낸다. 그러나, 양수정에서는 S_w'>0인 경우의 누수대수층 모델이 S_w'=0인 경우보다 더 나은 결과를 보여주므로 적정채수량 산정에는 S_w'>0인 경우의 누수대수층 모델을 적용하였다(Figure 3). 이때 누수대수층의 투수량계수와 저류계수는 S_w'=0인 경우와 동일하다. 반투수층의 K'/S_w'는 0.002 m²/sec로서 1, 2호공과 동일하나, 누수대수층의 K/S_w는 4.205 m²/sec로서 1, 2호공보다 작다.

5호공의 양수시험분석

5호공의 양수시험은 2880분간 실시하였으며, 이때 양수량은 350 m³/day로 하였다. 수위변화는 양수정뿐만 아니라 양수정(5호공)으로부터 각각 105 m, 87 m, 111 m가 떨어진 거리에 위치한 1호공, 2호공, 4호공에서도 관측되었다.

5, 1, 2, 4호공의 수위관측자료를 누수대수층의 모델(Hamm과 Bidaux, 1994; 함, 1997)을 이용하여 분석한 결과(Table 2, Figure 2, Figure 3), 양수정(5호공)의 투수량계수와 저류계수가 가장 높은 값을 보이고, 1, 2, 4호공의 수리상수는 서로 다르게 나타난다. 양수정이 5호공일 때 2호공의 수리상수와 양수정이 2호공일 때 5호공의 수리상수값이 거의 같게 나타나고 있다. 이는 5호공과 2호공이 동일한 대수층에 위치하고 있음을 지시하는 것이다. 관측정(1, 2, 4호공)에서는 S_w'=0인 경우의 누수대수층 모델을 적용하면 이론곡선과 측정값이 잘 일치함을 보여주고 있으며(Figure 2) 누수계수 B는 1호공에서는 1000 m를 나타내고 있으나 2호공과 4호공에서는 500 m를 나타낸다. 그러나, 양수정에서는 S_w'>0인 경우의 누수대수층 모델이 S_w'=0인 경우보다 더 나은 결과를 보여주므로 적정채수량 산정에는 S_w'>0인 경우

Table 3. Optimal yield of test holes

Drawdown, m	Optimal yield, m ³ /day					
	Hole 1	Hole 2	Hole 3	Hole 4	Hole 5	Total
15	258	660	20	98	247	1283
20	344	814	27	131	329	1645
25	430	1017	34	164	411	2056

의 누수대수층 모델을 적용하였다(Figure 3). 이때 누수대수층의 투수량계수와 저류계수는 S_w'=0인 경우와 동일하다. 반투수층의 K'/S_w'는 0.002 m²/sec로서 1, 2, 4호공과 동일하지만, 누수대수층의 K/S_w는 4.444 m²/sec로서 1, 2호공보다 낮다.

적정채수량 산정

앞에서 언급한바와 같이 각 공별 적정채수량은 함(1997)의 모델을 이용하여 산정하였다. 이 지역의 적정채수량은 장기적인 수위변화 관측과 물수지 평형을 고려하여, 양수정의 수위하강을 어느 정도로 유지시킬 것인가를 결정하면 이에 따라 각 공의 적정채수량이 결정될 수 있다. 그러나, 현재까지는 이 지역의 정확한 자연 함양량이 알려져 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 각 공에서 30일간 양수시에 수위하강이 15 m, 20 m, 25 m일 때, 적정채수량을 산정하였다. Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 모든 공에서 25 m의 수위하강에 해당하는 채수량을 보면, 2호공이 1017 m³/day로서 가장 많고, 1, 5, 4, 3호공의 순이다. 특히, 3호공의 적정채수량은 34 m³/day 밖에 되지 않으며, 따라서, 3호공의 지하수 산출능력은 매우 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 수위하강을 15m로 할 때의 총 채수량은 1645 m³/day이고, 10 m일 때는 1283 m³/day로서 수위하강이 작을수록 채수량이 줄어들어서 지하수 보존의 차원에서는 더 유리한 조건을 가진다.

결론 및 토의

균열암반대수층의 적정채수량산출을 위해서는 먼저 정확한 수리상수를 도출하는 것이 중요하다. 정확한 수리상수를 도출하기 위해서는 대상지역의 수리적 특성에 적합한 모델을 선정하여야 한다. 적합한 모델은 수리지질, 지질구조, 경계조건, 시추자료, 물리검층자료 등을 참고하여 양수시험분석을 통하여 결정될 수 있다. 양수시험분석시에는 수위하강 측정값 뿐만 아니라 수위하강을 값도 이용하여 모델을 결정하는 것이 좋다. 이와같이 하여 수리상수가 결정되면, 수문평형상태의 지하수위변동자료를 이용하여 지하수 함양량을 산출하고 이 함양량을 초과하지 않는 범위내에서 각 공별 적정채수량을 결정할 수 있다.

적정채수량 산정을 위한 적용지역은 부산시 금련산 지역으로서 이 지역에 위치하는 5개 굴착공의 각 공별 적정채수량을 산정하였다. 이 지역의 최상부에 위치하는 충적층 및 풍화대는 자유면대수층을 이루고 있으며, 그 하부에 위치하는 유전충군 퇴적암류는 주로 세립질 사암, 세일 및 실트스톤의 호층으로 구성되어 있으며 지하수 통로가 될 수 있는 주요한 파쇄대가 발달되어 있지 않으므로 양호한 대수층 역할을 할 수 없으며 반투수층(semi-confining layer)를 이루고 있다. 그러나, 최하위층인 화

산암류 내에는 2차공극(균열대, 파쇄대, 단층대)의 발달에 의한 누수 균열대수층(leaky fissured aquifer)이 존재하는 것으로 판단된다. 따라서, 적용대상 지역에는 누수를 포함하는 프락탈모델(Hamm and Bidaux, 1994; 함, 1997)을 이용하여 수리상수를 구하였다. 그러나, 3호공은 나머지 4개공과 달리 누수현상을 보이지 않으므로 Barker의 모델을 이용하여 수리상수를 구하였다.

양수시험 결과에 의하면, 2호공의 대수층 수리상수가 가장 크게 나타나고, 그 다음으로는 5호공, 1호공, 4호공, 3호공의 순으로 나타난다. 1호공과 5호공의 경우에는 대수층의 수리상수는 5호공이 1호공보다 더 커지만, 반투수층의 수리상수는 1호공이 상대적으로 더 크고 또한 5호공의 우물손실효과가 1호공보다 커기 때문에 총 수위하강은 5호공이 1호공보다 더 크다. 4호공은 1, 2, 5호공보다 상대적으로 수리상수도 더 작고, 우물손실도 커기 때문에 총 수위하강도 더 크게 일어난다.

1, 2, 4, 5호공간 수리적인 연결성을 보면, 4호공(양수정)-1호공(관측정)의 수리상수와 1호공(양수정)-4호공(관측정)의 수리상수값이 거의 같고, 4호공(양수정)-5호공(관측정)의 수리상수와 5호공(양수정)-4호공(관측정)의 수리상수값도 거의 같다. 또한, 1호공(양수정)-5호공(관측정)의 수리상수와 5호공(양수정)-1호공(관측정)의 수리상수값도 거의 같다. 이는 1-4호공간과 1-5호 공간이 각각 동일한 대수층 층준에 위치하고 이들 공간의 파쇄대 및 균열대의 발달상태가 비교적 균질하기 때문에 판단된다. 또한, 5호공(양수정)-2호공(관측정)의 수리상수와 2호공(양수정)-5호공(관측정)의 수리상수값도 거의 같게 나타나고 있다. 이는 2-5호공간이 동일한 대수층에 위치하고 있으며 이들 굴착공간의 수리적 성질이 균일함을 지시하는 것이다. 굴착공들간의 공간적인 수리적특성을 보면, 2-5호공간이 가장 높은 저류계수를 가지며, 투수량계수는 1-5호공간과 1-4호공간에서 높게 나타난다.

3호공의 수리상수는 다른 공들에 비해서 작고, 3호공 양수시에 다른 공들에서 수위하강이 일어나지 않는 것으로 보아 2호공과 3호공 사이에 거의 남북방향으로 발달하는 단층이 불투수 경계 역할을 하는 것으로 판단된다. 또한 3호공 주변에서는 대수층의 발달범위가 소규모로 한정되어 있어서 유동차원도 2차원보다 낮은 1.8차원으로 나타난다.

이 지역의 적정채수량은 장기적인 수위변화 관측과 물수지평형을 고려하여, 양수정의 수위하강을 어느 정도로 유지시킬 것인가를 결정하면 이에 따라 각 공의 적정채수량이 결정될 수 있지만, 현재까지는 정확한 자연 함양량이 알려져 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 함(1997)의 모델을 이용하여 각 공에서 30일간 양수시에 수위하강이 15 m, 20 m, 25 m일 때, 적정채수량을 산정하였다. 모든 공에서 15 m, 20 m, 25 m의 수위하강에 해당하는 채수량을 보면, 2호공이 가장 많고, 그 다음이 1, 5, 4, 3호공의 순이다. 이와 같이 공간적인 수리적 특성에 따라 각각의 양수정의 적정채수량이 다르게 나타나므로, 공별 적정채수량

을 정확히 산정하고 개발자는 적정채수량을 준수함으로써 대수층으로부터 장기적이고 안정적으로 지하수를 채수할 수 있다.

우리 나라에서는 암반지하수 개발이 점점 더 늘어나고 있으나, 양수정의 적정채수량을 결정하는 데는 아직도 어려움이 많다. 또한, 앞으로 지하수공들간의 간섭현상에 의한 영향권문제도 생길 수 있으므로, 지하수공의 산출능력에 맞게 지하수 사용량을 적절하게 분배하는 것이 필수적이다. 따라서, 이 연구는 암반대수층의 수리지질특성을 정확히 파악하여 적정채수량을 산정하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 연구의 일부는 부산대학교 기성희비지원으로 그리고 일부는 한국자원연구소 지원으로 이루어졌으며 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사드린다. 아울러서 논문심사를 맡아주신 심사위원께도 감사드린다.

참고문헌

- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도(1:50,000), 동래 · 월내도폭 및 설명서, 자원개발연구소, 27p.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도(1:50,000), 부산 · 가덕도폭 및 설명서, 한국동력자원연구소, 22p.
- 임정웅, 최위찬, 함세영, 배두중, 김복철, 1995, 부산(대연)지구 온천자원 평가조사보고서, 한국자원연구소, 235p.
- 함세영, 1997, 일정수두 상부경계를 가지는 이중공극 대수층내 부정류에 관한 프락탈 모델, 지하수환경학회지, 4(2), p. 95-102.
- 함세영, 1995, 프락탈 모델에 의한 한국의 균열대수층의 수리특성 (I), 지질학회지, 31(4), p. 467-481.
- 함세영, 임정웅, 1994, 누수를 포함하는 지하수유동의 프락탈 모델 적용에 의한 균열 암반 대수층의 수리상수 산출, 지질공학회지, 4(2), p. 219-229.
- Barker, J. A. 1988, A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, Water Resour. Res., 24(10), p. 1796-1804.
- 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, p. 95-106.
- Hamm, S.-Y. and Bidaux, P., 1994, Ecoulements transitoires en géométrie fractale avec drainance : théorie et application, C. R. Acad. Sci. Paris, 318, série II, n.2, p. 227-233.
- 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.