

단계양수시험 해석시 우물상수 산정 방법이 우물효율에 미치는 영향

정상용¹ · 김병우^{2*} · 김규범² · 권해우³

¹부경대학교 환경지질학과, ²한국수자원공사 K-water연구원, ³한국광물자원공사 탐사지원팀

Effects of Well Parameters Analysis Techniques on Evaluation of Well Efficiency in Step-Drawdown Test

Sang-Yong Chung¹, Byung-Woo Kim^{2*}, Gyoobum Kim² and Hae-Woo Kweon³

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University,

²K-water Institute, Korea Water Resources Corporation,

³Domestic Exploration Support Team, Korea Resources Corporation

다공질매질에 굴착된 2개의 관정과 단열암반층에 굴착된 2개의 관정으로 부터 단계양수시험이 실시되었다. Jacob(1947)이 제시한 $P = 2.0$ 값은 단계양수시험의 수위강하를 해석하기 위하여 다공질매질과 단열암반층에 모두 적용되고 있다. 단계양수시험 해석에 대한 선형 모델(Jacob's graphic method)의 문제점들을 파악하기 위하여, 선형과 비선형 모델(Labadie and Helweg's least-squares method)에서 산정된 우물상수(대수층손실상수(B), 우물손실상수(C) 및 우물손실지수(P))를 비교 분석하였다. 선형과 비선형 모델에서 산정된 C와 P값의 차이는 대수층의 투수성과 관정의 조건에 따라 다양하게 나타났다. 즉, 다공질매질에서 비선형 모델로 산정된 C값은 선형 모델로 산정된 C값에 비해 약 $10^0 \sim 10^{-2}$, 단열암반층에서는 약 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 배 낮게 나타났다. 비선형 모델을 통해 산정된 다공질매질의 P값은 2.124~2.775, 단열암반층은 3.459~5.635의 범위로 산정되었으며, 이때 비선형 모델에서 우물손실은 P값에 따라 크게 좌우되었다. 선형과 비선형 모델을 통해 산정된 우물효율성의 차이는 다공질매질에서 1.56~14.89%, 단열암반층에서 8.73~24.71%를 보여 모델의 선택에 따라 상당한 오차를 가지는 것으로 나타났다. 또한 비선형의 최소제곱법을 적용한 회귀분석 방법이 모든 대수층의 단계양수시험 해석에 있어 매우 유용함을 확인하였다.

주요어 : 단계양수시험, 우물손실, 우물효율, 최소제곱법, 비선형 모델

Step-drawdown tests were conducted at four pumping Wells, two in porous media and two in fractured rocks, respectively. In general, $P = 2.0$ suggested by Jacob (1947) is applied to porous media and fractured rocks in terms of drawdowns of step-drawdown test. In an attempt to review problems of linear model (Jacob's graphic method) in interpreting the step-draw down test, the outcomes of well parameters (aquifer loss coefficient (B), well loss coefficient (C) and well loss exponent (P)) calculated from linear and nonlinear model (Labadie and Helweg's least-squares method) were compared and analyzed. The values of C and P calculated from linear and nonlinear models differed according to permeability of aquifer and the conditions of pumping well. The value C obtained from nonlinear models in porous media and fractured rocks is about $10^0 \sim 10^{-2}$ and $10^{-3} \sim 10^{-6}$ times lower than in their linear models, respectively. The value P of porous media obtained from nonlinear model ranged from 2.123 to 2.775, while it ranged from 3.459 to 5.635 for fractured rocks. In case of nonlinear model, well loss highly depends on the value P. At this time, well efficiencies calculated from linear and nonlinear models were 1.56~14.89% for porous media and 8.73~24.71% for fractured rocks, showing a significant error according to chosen models. In nonlinear model, it was found that the regression analysis using the least squares method was very useful to interpret step-drawdown test in all aquifer.

Key words : step-drawdown test, well loss, well efficiency, least-squares method, nonlinear model

*Corresponding author: bwkim@kwater.or.kr

서 론

대수층의 수리적 특성을 규명하기 위한 단계양수시험은 일정한 시간간격으로 양수량을 증가시켜가며 관정의 수위 변화와 수위강하(drawdown)를 관측함으로써, 관정의 효율과 대수층의 생산성을 평가할 수 있다(Kawecki, 1995; Kruseman and de Ridder, 1991). 이러한 단계양수시험은 관정 및 대수층에 관한 많은 정보들을 제공할 수 있기 때문에, Jacob(1947) 이후에도 많은 논문들이 발표되어 시험에 대한 여러 가지 해석과 기법들이 제시되어 왔다. 그 이후 Rorabough(1953)는 그래픽 접근방법을 이용하여 $s_w = BQ + CQ^2$ 의 해를 $s_w = BQ + CQ^P$ 으로 표현하였다. 그런데 Bruin and Hudson(1955)은 현실적으로 공학적 적용에 있어서 Jacob 방정식이 대부분 대수층에 매우 유용하다고 하였다. 그러나 두 방정식은 양극화되어 여전히 사용되어 왔으며, 다음과 같은 단계양수시험 해석 방법이 지속적으로 개발되어 왔다. 이러한 단계양수시험에 대한 해석은 그래픽, 산술연산, 수치 및 최적화 방법 그리고 반복법을 이용하고 있다. 즉, Jacob(1947), Rorabough(1953), Lennox(1966), Sheahan(1971), Birsoy and Summers(1980) 그리고 Kruseman and de Ridder(1991)는 그래픽 방법을 이용하였고, Bierschenk(1963)와 Kasenow(1996)는 산술연산 방법을 이용하였고, Labadie and Helweg(1975), Sheahan(1975), Gupta(1989), Singh(2002) 및 Shekhar(2006)는 수치 및 최적화 방법을 제시하였다. 그리고 Miller and Weber(1983)는 반복법을 이용하여 B, C 및 P값을 산정하는 방법을 개발하였다.

국내의 경우 이철우 외(2002)는 단열암반층내의 단열 특성이 유체의 속도를 지배하므로 정확한 P값의 산정은 단열암반층을 이해하는 중요한 인자가 된다고 하였다. 그리고 이진용 외(2005)는 단계양수시험 해석시 시간선택이 우물과 관련된 대수층 상수 등에 상당한 오차가 발생할 수 있다는 연구결과를 제시하였다.

일반적으로 단계양수시험 해석은 Jacob(1947)이 제시한 선형 함수를 가정한 식들이 다공질매질과 단열암반층에 적용되고 있다. 이러한 선형 모델은 관측된 수위강하의 값으로 수위강하를 예측하기 위해 사용되는 직선 그래프이다. 그러나 비선형 모델은 선형방정식에 비해 해(solution)의 성질이 더 복잡하며, 그 구성 요소에 더 근사적으로 접근하기 위한 성질을 가지고 있다. 흔히 선형의 그래픽 방법으로 우물상수가 획득된다면 해석에 문제가 없다는 인식이 있다. 하지만 단열암반층에서의 급격한 수위강하는 비선형의 형태를 보이기 때문에 선형 모델을 적용할 경우 상당한

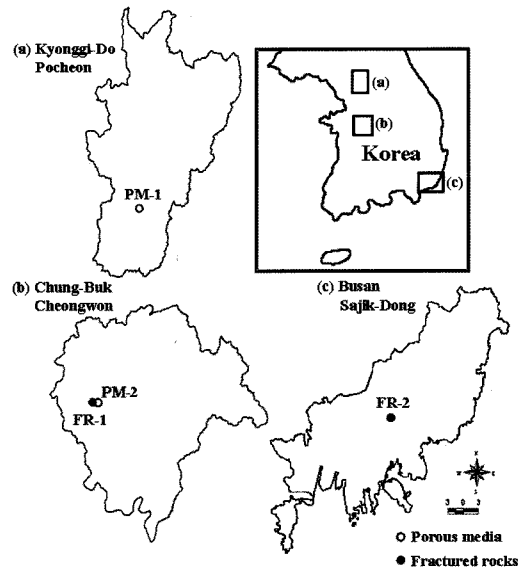


Fig. 1. Location of well sites ; (a) Pocheon, Kyonggi Province (b) Cheongwon, Chungbuk Province and (c) Sajikdong, Busan City.

오차가 발생하게 된다. 이렇게 적용된 해석기법은 우물효율 평가 저하의 직접적인 원인으로 될 수 있으며, 비선형 모델로 해석된 결과와 비교하여 상당한 오차를 가질 수 있다.

본 연구에서는 단계양수시험시 양수율에 따른 수위강하 값을 그래픽 방법(Jacob's graphic method)과 최소제곱법을 적용한 회귀분석 방법(Labadie and Helweg's least-squares method)을 이용하여 다공질매질과 단열암반층에서 단계양수시험 해석 방법이 우물효율에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 단열암반층에서 회귀분석 방법을 이용하여 선형 모델의 결점을 보완하고, 단계양수시험에 나타나지 않았던 수위강하를 이상적으로 예측하였다.

지질 및 시험 개요

본 연구에서는 충북 청원, 경기도 포천 그리고 부산 사직동 일원에 위치한 다공질매질과 단열암반층에서 단계양수시험이 실시되었다(Fig. 1). 경기도 포천지역은 준편마암류인 호상편마암, 반상변정질 편마암, 안구상 편마암, 화강편마암 및 기타 미그마타이트질 편마암으로 구성되어 있다. 간혹 흑운모흑니 석편암, 결정질석회암 및 규암 등을 협재하고 있으며, Fig. 2(a)의 PM-1호공은 충적층에 위치해 있다. 충북 청원 지역은 윤교리층과 주라기 대보화강암류인 화강류가 분포하고 있으며, Fig. 2(b)의 PM-2

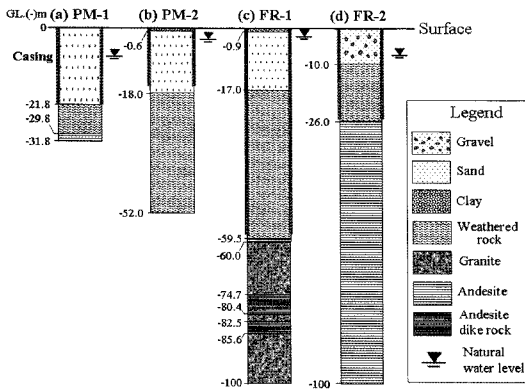


Fig. 2. Geological section of wells (PM-1 and 2 in porous media, FR-1 and 2 in fractured rocks).

호공은 충적층에 위치해 있다. 그 중에 화강암류는 주라기 화강암으로서 청주화강암, 보은화강암, 흑운모화강암, 복운모화강암 등이 있는데, Fig. 2(c)의 FR-1호공이 위치한 암상은 청주화강암이다. 부산 사직동 일원은 백악기

해양층군에 속하는 퇴적암층인 이천리층, 유천층군의 안산암류이다. 그리고 이들을 후기에 관입한 화강섬록암으로 구성되어 있으며, Fig. 2(d)의 FR-2호공이 위치한 암상은 안산암류이다. 이와 같이 각 관정이 위치한 지질특성은 상부 충적층(모래, 자갈, 점토), 풍화대 그리고 하부에는 단열이 발달된 암반층으로 분류된다.

다공질매질에 굴착된 2개의 관정과 단열암반층에 굴착된 2개의 관정에서 단계양수시험이 실시되었다(건설교통부 외, 2006; 건설교통부, 2004; (주)대우건설, 2004). 각 관정의 제원은 Table 1과 같다. 단계양수시험의 양수량은 V-notch로 측정하였으며, 양수 단계는 각 지점으로 부터 최소 4단계에서 최대 6단계로 실시되었으며, 단계양수 시험의 결과는 Fig. 3에 도시되었다.

이론적 배경

단계양수시험

Jacob(1947)은 단계양수시험시 총 수위강하(s_T)는 총류

Table 1. Dimensions of pumping wells in porous media and fractured rocks. (Unit: m)

Aquifer/well No.	Well depth	Well diameter	Casing depth	Submersible pump depth
Porous media	PM-1	31.8	0.2	21.45
	PM-2	52	0.2	43
Fractured rocks	FR-1	100	0.2	90
	FR-2	100	0.2	80

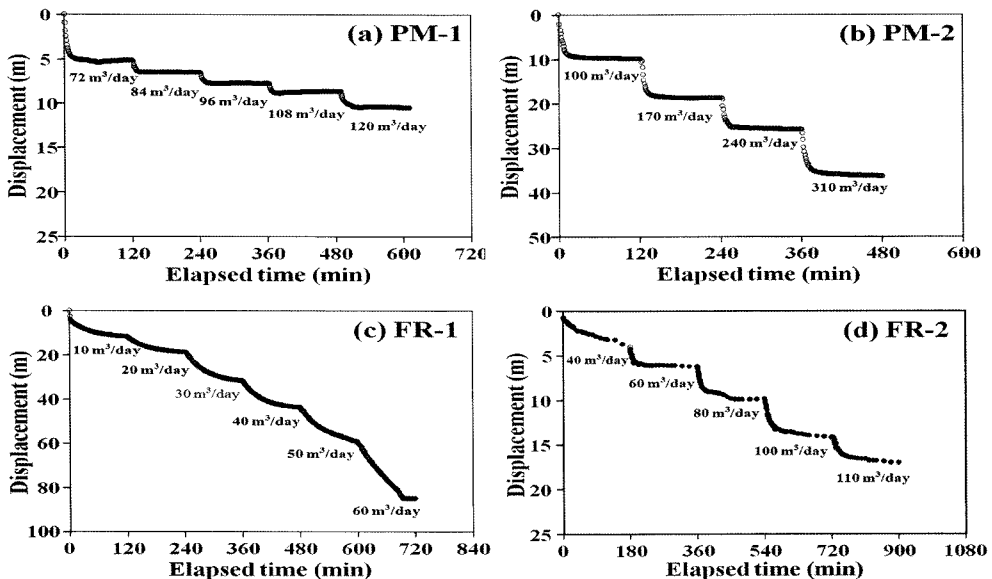


Fig. 3. Step-drawdown test in porous media (a, b) and fractured rocks (c, d).

Table 2. Determination of well parameters (B, C and P).

Method	Model	Function	Solution	Well parameters
Jacob (Graphic)	Linear	$s_w = BQ + CQ^2$	$s_w/Q = B + CQ$	B, C
Labadie-Helweg (Least-squares)	Nonlinear	$s_w = BQ + CQ^p$	$E(P) = \text{Min}_{B,C} \sum_{i=1}^N [s_{r_i} - (BQ_i + CQ_i^p)]^2 = 0$ $\frac{\partial E(P)}{\partial B} = \sum_{i=1}^N [s_{r_i} - (BQ_i + CQ_i^p)] Q_i = 0$ $\frac{\partial E(P)}{\partial C} = \sum_{i=1}^N [s_{r_i} - (BQ_i + CQ_i^p)] P C Q_i^{p-1} = 0$	B, C, P

(s_{ka})로 인한 수위강하와 난류(s_{na})로 인한 수위강하(s_{wa})의 합을 식 (1)에서와 같이 대수층손실과(BQ) 우물손실(CQ^2)의 합으로 표현하였다. Rorabaugh(1953)는 식 (2)를 변형하여 식 (3)의 방정식으로 제시하였으며, 이때 저양수(low pumping)에서 P값은 2.43~2.82의 범위를 갖는다고 하였다.

$$s_r = s_{la} + s_{na} = BQ + CQ^2 \tag{1}$$

$$s_w = BQ + CQ^2 \tag{2}$$

$$s_w = BQ + CQ^p \tag{3}$$

정상류 조건의 Thiem(1906) 방정식과 부정류 조건의 Theis (1935) 방정식에서 수위강하는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$s_w = \frac{\ln(r_0/r_w)Q}{2\pi T} \quad \text{and} \quad s_w = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \left[\frac{2.25Tt}{r^2 S} \right] \tag{4}$$

(Steady-state condition) (Unsteady-state condition)

여기서 r_0 은 영향반경[L], r_w 는 관정반경[L], Q는 양수율[L³/T], T는 투수량계수[L²/T], t는 양수시간[T], r은 관측점까지의 거리[L] 그리고 S는 저류계수[-]이다. 이와 같이 수위강하(s_w)는 양수율(Q)과 선형관계를 가지고 있으며, 이는 우물손실이 없는 상태에서의 수위강하이므로, B는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$B = \frac{\ln(r_0/r_w)}{2\pi T} \quad \text{and} \quad B = \frac{2.30}{4\pi T} \log \left[\frac{2.25Tt}{r^2 S} \right] \tag{5}$$

평형상태에서는 B가 일정한 상수이지만 비평형상태에서는 양수시간(t)과 거리(r)의 함수로 나타난다. 이러한 단계양수시험을 통해 B, C 및 P를 결정할 수 있으며, 또한 B와 C를 알게 되면 특정하게 주어진 양수시간(t)과 양수율(Q)에 대한 관정에서의 수위강하를 예측할 수 있다.

산정 방법

다공질매질과 단열암반층의 단계양수시험 해석으로부터 최적의 우물상수(B, C 및 P)를 산정하기 위하여 선형 모델의 그래픽 방법(Jacob's graphic method)과 비선형 모델의 최소제곱법을 적용한 회귀분석 방법(Labadie and Helweg's least-squares method)을 이용하였다(Table 2). Jacob의 그래픽 방법은 단계양수시험 자료를 분석하기 위한 가장 일반적인 그래픽 기법이다(Batu, 1998; Todd, 1980). 이러한 그래픽 방법은 식 (2)에서 우물손실지수 P가 2일 때, $s_w = BQ + CQ^2$ 에서 양변을 Q로 나누면, s_w/Q 가 비수위강하량이 된다.

Labadie and Helweg(1975)는 B, C 및 P를 산정하기 위하여 최소제곱법을 이용한 수치해석 방법으로, 오차 (E(P))가 최소가 되는 B, C 및 P값을 산정하게 된다. 식에 대하여 B와 C에 대한 편미분으로 최소 제곱값을 산정하기 위한 연립방정식으로 산정할 수 있다. B, C 및 P 값들을 산정하기 위하여 Labadie and Helweg's(1975)가 개발한 FASTEP 프로그램 코드를 이용하였다.

난류에 의한 우물손실

일반적으로 양수에 의한 수위강하는 지하수 유속과 부가적인 요인(케이싱, 스크린에 의한 영향 등)에 의하여 수리경사가 관정에서 크게 발생하게 되며, 지하수위는 가파르게 강하한다(Kasenow, 1996). 이러한 단계양수시험에서의 수위강하는 Fig. 4(a)에서와 같이 대수층손실과 우물손실의 합으로 표현된다. 이때 다공질매질에서의 우물손실은 케이싱 및 스크린, 시추시 공벽 변형 등의 다양하고 복합적인 원인에 의해서 우물손실이 발생하게 된다. 단열암반층에 개발된 관정은 Fig. 4(b)에서와 같이 지표로부터 풍화대까지 케이싱을 설치하며, 그 이후 구간은

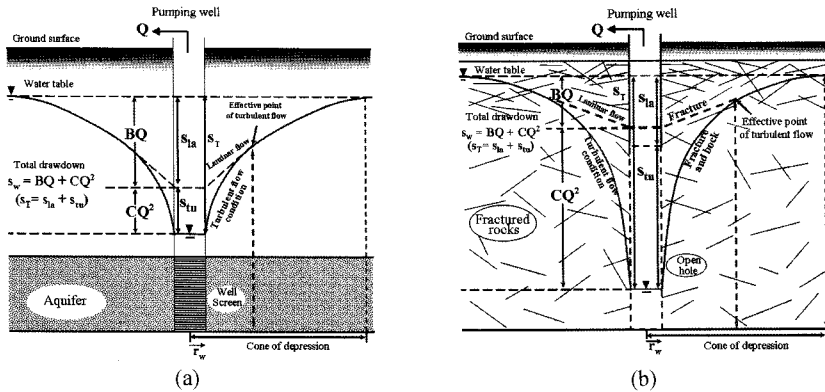


Fig. 4. Components of drawdown in a pumping well; (a) curve types showing laminar and turbulent flow with an increase in the pumping, (b) fractured-rocks response to pumping (modified from Kasenow, 1996).

Table 3. Similarity of pumping wells between porous media and fractured rocks.

Well conditions	Porous media (soil)	Fractured media (rock)
Flow of an inner well during pumping test	Flow through screen (Aperture, spacing, friction, etc.)	Flow through fractures (Properties of fractures; aperture, spacing, roughness, connection, etc.)
During core logging	Deformation of well wall	Damage of fractures
The vicinity of the well	Unconsolidated soil	Rock matrix

나공(open hole) 상태이다. 이때 시추시의 충격으로 관정 내의 공벽에서 단열이 손상되거나 확장되는 경향이 있으나, 크게 영향은 받지 않는다. 이와 같이 단열압반층에서의 우물손실은 단열 특성에 의한 영향이 대부분일 것으로 판단된다. 관정을 향하는 단열들은 좁은 단열의 통로를 따라 지하수 흐름이 발생하게 되며, 이때 단열의 특성(단열 길이, 틈, 연결성, 거칠기 등)에 따라 지하수 유속이 변하게 된다(이철우, 2002). 즉, 지하수 유속의 변화에 따라 층류 및 난류가 발생하게 되는데, 이러한 기하학적인 두 흐름은 레이놀즈 수(Reynolds number)에 의하여 판별되기도 한다. 층류는 점성력이 지배적인 유동으로서 레이놀즈 수가 낮고, 평탄하면서도 일정한 유동의 특징이 나타난다. 반면에 난류는 관성력이 지배적인 유동으로서 레이놀즈 수가 높고, 불규칙적인 와류(eddy)나 기타 유동 변동(flow perturbation)의 특징이 나타난다. 이와 같이 다공질매질과 단열압반층에 관통된 관정의 특성은 Table 3과 같이 정리할 수 있다.

우물효율

단계양수시험 해석법을 통하여 우물상수 B, C 및 P의 값을 산정할 수 있으며, 이것을 토대로 관정에서의 우물 효율 및 우물특성을 알 수 있게 된다. 여기서 양수율과

수위강하사이의 관계는 대수층의 생산력을 표현하는 우물의 비양수량(specific capacity, Q/s_w)으로 표현할 수 있다. 또한 B, C 및 P의 값으로부터 우물효율(E_w)은 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$E_w = \left\{ \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \right\} \times 100\% \tag{7}$$

결 과

우물상수 산정

다공질매질과 단열압반층에서 실시된 단계양수시험은 선형 모델의 그래픽 방법과 비선형 모델의 최소제곱을 적용한 회귀분석 방법을 이용하여 우물상수(B, C 및 P)를 산정하였다(Table 4). 다공질매질과 단열압반층에서 두 모델로 산정된 결과와 비교할 때 선형 모델을 통해 산정된 B값은 약간 낮고, C값은 높게 나타났다. 즉, 선형 모델의 경우 양수량(Q)에 따른 비수위강하량(s_w/Q)의 관계는 직선의 기울기로 표현된다. 이때 산발적으로 나타난 비수위강하량에 대한 직선의 기울기는 통계적 관계(statistical relation)를 가지게 된다. 따라서 비수위강하량이 직선의 기울기에 영향을 미치게 되는데, 이때 통계적 관계에서 얻어진 B값

Table 4. Value of B, C, P, RMSE and R².

Well site	Model	Method	B (day/m ²)	C (day ^P /m ^{3P-1})	P	RMSE ⁽¹⁾	R ⁽²⁾	
Porous media	PM-1	Linear	Graphic	5.193E-02	2.842E-04	2.000	0.2214	0.9911
		Nonlinear	Least-squares	6.371E-02	5.050E-06	2.755	0.2197	0.9912
	PM-2	Linear	Graphic	9.250E-02	7.693E-05	2.000	0.8213	0.9964
		Nonlinear	Least-squares	9.418E-02	3.512E-05	2.124	0.8139	0.9965
Fractured rocks	FR-1	Linear	Graphic	9.442E-01	5.696E-03	2.000	4.1540	0.9813
		Nonlinear	Least-squares	1.025E+00	2.185E-09	5.639	1.1808	0.9985
	FR-2	Linear	Graphic	6.379E-02	7.852E-04	2.000	0.4046	0.9957
		Nonlinear	Least-squares	9.369E-02	5.825E-07	3.459	0.1458	0.9994

Remark) (1) Root-mean-square-errors, (2) Coefficient of determination

은 함수적 관계(functional relation)의 비선형 모델과 비교할 때 낮게 나타난다. 선형 모델의 기울기 또한 직선 형태로 나타나기 때문에 최소제곱법을 적용한 회귀곡선의 비선형 모델과 비교할 때 C값은 높게 나타난다.

PM-1호공의 경우 양수량 증가에 따른 총 수위강하는 케이싱 범위 내에 있어, 양수시 우물손실은 케이싱 및 스크린의 영향 등에 의해서 증가하게 된다. 따라서 선형 모델에 제시된 P=2.0으로 산정된 C값은 비선형 모델을 통해 산정된 P=2.755 보다 높게 나타나는데, 이때 우물손실은 C값으로 인하여 과대평가 된다. PM-2호공의 경우 총 수위강하는 케이싱 밖에 있으며, 우물손실에 의한 영향은 적으므로 선형과 비선형 모델을 통해 산정된 우물상수들은 모두 근사한 값을 보였다. 또한 단열암반층의 FR-1, 2호공은 P값이 2로 지정된 선형 모델과 달리 비선형 모델을 통해 산정된 P값은 양수시 수위강하 구간의 특성에 따라 폭넓게 나타났다.

단열암반층에서의 우물손실은 다공질매질에서의 케이싱 및 스크린의 영향 등과 달리 단열에 의한 지하수 흐름이 대부분일 것으로 판단된다. 이러한 선형 및 비선형 모델에서 산정된 C와 P값의 차이는 다공질매질과 단열암반층의 투수성, 양수량 그리고 관정의 조건에 따라 다양하게 나타났다. 이와 같이 다공질매질에서의 C값은 선형과 비선형 모델에서 산정된 결과와 비교하였을 때 약 10⁰~10⁻², 단열암반층은 약 10⁻³~10⁻⁶배의 차이를 보였다. 즉, 선형 모델에 제시된 P=2.0 값은 다공질매질과 단열암반층의 우물손실지수에 고정되므로, 우물손실의 C값에 따라 우물손실이 크게 좌우하게 된다. 이와 마찬가지로, 비선형 모델에서는 C와 P값에 따라 우물손실이 크게 좌우된다. 이처럼 P값이 크면 양수량 증가에 따라 수위강하 구간이 상대적으로 크게 증가하게 된다. 이러한 다공질매질에서

산정된 P값은 2.124~2.775, 단열암반층은 3.459~5.635의 범위로 수리특성이 매우 다양한 것임을 알 수 있다.

관측수위강하와 추정수위강하의 비교

관정에서 양수시 수위강하는 대수층손실과 우물손실의 합으로 표현된다. 다공질매질의 Fig. 5(a), (b)에서와 같이 PM-1, 2호공은 선형과 비선형 모델에서 산정된 C와 P값은 비교할 때 큰 차이를 보였으나, 관측 및 추정된 수위강하는 매우 근소한 차이를 나타낸다. 그리고 단열암반층의 FR-1, 2호공에서 양수량 증가 시 선형모델로 추정된 수위강하는 Fig. 5(c), (d)에서와 같이 과소추정되며, 비선형 모델로 추정된 수위강하는 관측된 수위강하와 일치하였다. 이때 비선형 모델로 산정된 제곱근평균제곱오차(RMSE)의 값은 선형 모델보다 낮은 값들을 보여(Table 4), 다공질매질과 단열암반층에서 비선형 모델이 모두 적합함을 알 수 있었다.

우물효율 평가

단계양수시험 해석시 우물상수 산정 기법에 따라 우물효율 평가에 영향을 미치게 된다. 따라서 우물상수 산정 기법이 우물효율 평가에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 단계에서 산정된 우물효율의 평균값을 Table 5에 정리하였다. 선형과 비선형 모델의 적용결과, 선형모델에서는 우물효율이 저평가되는 것으로 나타났다. 이때 다공질매질에서의 선형 및 비선형 모델의 우물효율 차이는 1.56~14.89%, 단열암반층에서는 8.73~24.71%를 보여, 단열암반층에서 우물상수 산정 방법의 선택에 따라 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같이 두 모델을 이용하여 산정된 우물상수 값을 적용한 결과 선형 모델의 우물효율이 1.56~24.71% 정도 과소추정되는 것으로 나타났다. 따라서 어떤 모델을 적용하느냐에 따라 크게 달라질 수 있다.

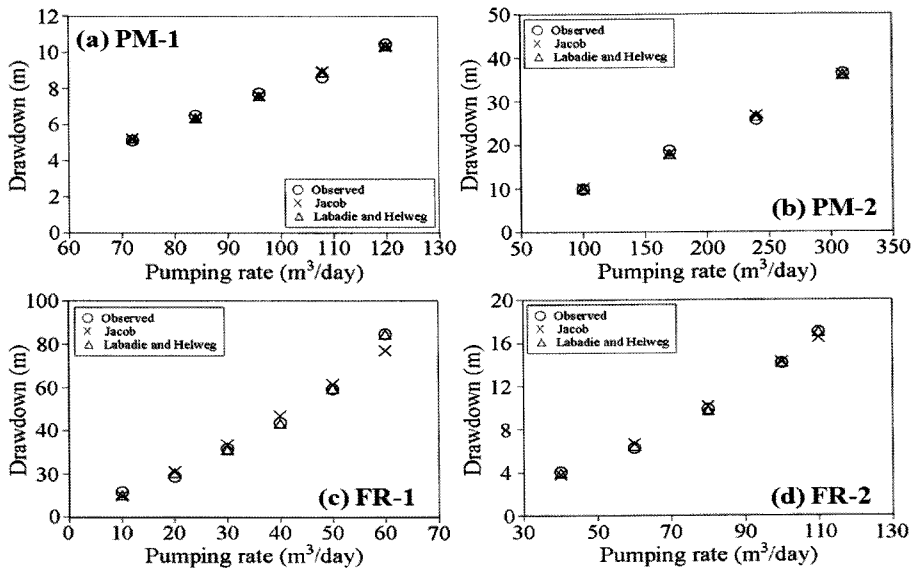


Fig. 5. Comparison between observed and calculated drawdowns; (a) PM-1, (b) PM-2, (c) FR-1 and (d) FR-2.

Table 5. Well efficiency calculation from the step-drawdown tests. (Unit: %)

Type	Site	Well efficiency (E_w) ⁽¹⁾		
		Graphic method (A)	Least-squares method (B)	Difference between (A) and (B)
Porous media	PM-1	65.80	80.69	14.89
	PM-2	85.70	87.26	1.56
Fractured rocks	FR-1	83.17	91.90	8.73
	FR-2	52.44	77.15	24.71

Remark) (1) E_w (well efficiency) was defined by average of $BQ/(BQ+CQ^P)$ at a particular step

토 의

관정에서 양수시 우물손실의 증가에 따라 수위강하는 완만하거나 매우 급격히 나타난다. 다공질매질에서의 선형과 비선형 모델에서 추정된 수위강하 값과 관측된 수위강하 값들은 거의 일치하였다. 그러나 단열암반층에서는 비선형 모델에서 추정된 수위강하와 관측된 수위강하 간의 오차가 선형 모델보다 작게 나타났다. 일반적으로 선형모델 $P=2.0$ 의 값이 다공질매질과 단열암반층에 많이 적용되고 있으며, 여기서 산정된 우물상수를 이용하여 관정의 효율성과 대수층의 생산성을 평가하고 있다. 그러나 단계양수시험시 관측된 수위강하의 분포가 비선형의 분포를 나타낼 경우에는 Labadie and Heweg의 최소제곱법 모델이 Jacob의 선형 모델 보다 훨씬 정밀한 결과를 만들 수 있다. 따라서 적합한 모델을 선택하게 된다면, 최적의 결과

값들로 대수층의 생산성 및 효율성을 정확히 평가할 수 있을 것이다. 때로는 양수량에 따라 그 결과는 달라질 수 있다. 또한 단열암반층에서의 우물손실은 대수층의 특성과 관련되므로 우물손실의 C와 P값의 관계를 파악하게 되면 대수층의 수리 특성을 더 잘 파악할 수 있게 된다.

결 론

다공질매질에 굴착된 2개의 관정과 단열암반층에 굴착된 2개의 관정으로 부터 단계양수시험이 실시되었다. 이를 선형 모델의 그래픽 방법(Jacob's graphic method)과 비선형 모델의 최소제곱법을 적용한 회귀분석 방법(Labadie and Hewelg's least-squares method)을 이용하여 우물상수(B, C 및 P)를 산정하였으며, 또한 두 모델의 선택이 우물효율에 미치는 영향을 분석하였다.

Jacob의 선형 모델이 대부분의 대수층에 매우 유용하다고 하였으나, 단열암반층에서 우물상수 C는 상당한 오차를 보였다. 이때 다공질매질에서 비선형 모델로 산정된 C값은 선형 모델로 산정된 C값에 비해 약 $10^0 \sim 10^{-2}$, 단열암반층은 약 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 배나 낮게 나타났다. 이때 비선형 모델에서 산정된 다공질매질의 P값은 2.124~2.775, 단열암반층은 3.459~5.635의 범위로 산정되었다. 따라서 우물손실은 선형 모델에 제시된 $P=2.0$ 값과 비선형 모델의 P값에 따라 크게 좌우된다. 그리고 다공질매질과 단열암반층에서 비선형 모델을 통해 추정된 수위강하와 관측된 수위강하는 서로 일치함을 확인할 수 있었으며, 특히 단열암반층에서의 RMSE는 선형 모델 보다 더 낮은 값을 보였다. 또한 우물효율성은 선형과 비선형 모델을 통해 산정된 결과를 비교하였을 때, 다공질매질에서 1.56~14.89%, 단열암반층에서 8.73~24.71%의 차이를 보여, 단계양수시험 해석 시 모델의 선택에 따라 상당한 오차를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 비선형 모델로 산정된 우물상수들은 대부분의 모든 대수층에서 매우 유용할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구지원(과제번호: 3-2-3)에 의해 수행되었으며, 연구지원 기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 한국수자원공사, 대한광업진흥공사, 2004, 포천지역 지하수 기초조사 보고서, 정부간행물 등록번호(11-1500000-001408-01), 10-9.
- 건설교통부, 한국수자원공사, 대한광업진흥공사, 2006, 청주청원 지역 지하수 기초조사 보고서, 정부간행물 등록번호(11-1500000-001810-01), 7-7.
- 이진용, 송성호, 이강근, 2005, 단계양수시험 해석 시 시간선택이 해석결과에 미치는 영향, 한국지하수토양환경학회, 10(2), 59-65.
- 이철우, 이대하, 정지근, 김구영, 김용제, 2002, 양수시험 시 방사상흐름을 보이는 균열암반 대수층에서의 우물손실, 한국지하수토양환경학회, 7(4), 17-23.
- (주)대우건설, 2004, 경부고속철도 제14-2공구 사갱설치에 따른 국가기록원 부산지원 지하서고 안전영향 및 사갱도 설치 적정성 검토 보고서, 752p.
- Batu, V., 1998, Aquifer Hydraulics -A comprehensive guide to hydrogeologic data analysis, John Weley & sons, New York, 113-627.
- Bierschenk, W. H., 1963, Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests, International Association of Scientific Hydrology, 64, 494-507.
- Birsoy, Y. K. and Summers, W. K., 1980, Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data, Ground Water, 18(2), 137-146.
- Bruin, J. and Hudson, H. E. Jr., 1955, Selected methods for pumping test analysis, Illinois Water Survey, Report of Investigations, 25, 29-37.
- Gupta, A. D., 1989, On analysis of step-drawdown data, Ground Water, 27(6), 874-881.
- Helweg, O. J., 1994, A General Solution to the Step-drawdown Test, Ground Water, 3(3), 363-366.
- Jacob, C. E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well, Transactions, ASCE, 112, 1047-1070.
- Kasenow, M.C., 1996, Production Well Analysis: New Methods and a computer program in well hydraulics. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, 355p.
- Kawecki, M. W., 1995, Meaningful interpretation of step-drawdown tests, Ground Water, 33(1), 23-32.
- Kruseman, G. P. and de Ridder, N. A., 1991, Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd edition, International institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, the Netherlands, 378p.
- Labadie, J. W. and Helweg, O. J., 1975, Step-drawdown test analysis by computer, Ground Water, 13(5), 438-444.
- Miller, C. T. and Weber, W. J., 1983, Rapid solution of the nonlinear step-drawdown equation, Ground Water, 21(5), 584-588.
- Rorabaugh, M. I., 1953, Graphical and theoretical analysis of step-drawdown tests of artesian wells, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, 79, 362p.
- Sheahan, N. T., 1971, Type-curve solution of step-drawdown test, Ground Water, 9(1), 25-29.
- Sheahan, N. T., 1975, Discussion of step-drawdown test analysis by computer, Ground Water, 13(5), 445-449.
- Shekhar, S., 2006, An approach to interpretation of step drawdown tests, Hydrogeology Journal, 14, 1018-1027.
- Singh, S. K., 1998, Optimization of confined aquifer parameters from variable rate pump test, Journal of Hydraulic Engineering, 4(1), 61-70.
- Theis, C. V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Transactions, American Geophysical Union, 16, 519-524.
- Thiem, G., 1906, Hydrologische methoden; Leipzig, Gebhardt, 56p.
- Todd, D. K., 1980, Groundwater Hydrology, John Wiley & Sons, New York, 111-163.

2008년 12월 16일 원고접수, 2009년 3월 24일 게재승인

정상용

부경대학교 환경지질과학과

608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

Tel: 051-629-6626

Fax: 051-629-6623

E-mail: chungsy@pknu.ac.kr

김병우

한국수자원공사 K-water연구원
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1
Tel: 042-870-7647
Fax: 042-870-7629
E-mail: bwkim@kwater.or.kr

권해우

한국광물자원공사 탐사지원팀
156-706 서울특별시 동작구 시흥대로 79
Tel: 02-840-5748
Fax: 02-840-5664
E-mail: kweon@kores.or.kr

김규범

한국수자원공사 K-water연구원
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1
Tel: 042-870-7640
Fax: 042-870-7629
E-mail: gbkim@kwater.or.kr