

단계양수시험 해석시 시간선택이 해석결과에 미치는 영향

이진용^{1*} · 송성호² · 이강근³

¹지오그린21, ²농업기반공사 농어촌연구원, ³서울대학교 지구환경과학부

Effects of Selected Time on Analysis Results in Step-Drawdown Tests

Jin-Yong Lee^{1*} · Sung-Ho Song² · Kang-Kun Lee³

¹GeoGreen21 Co., Ltd.

²Rural Research Institute, KARICO

³School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

Step-drawdown test has been generally conducted to evaluate productivity or efficiency of both aquifer and well. In general step-drawdown test, pumping with a low constant discharge rate is conducted in the first stage until the drawdown within the well stabilizes. And then the groundwater is pumped with a higher rate in the next step until the drawdown stabilizes once more. This process is repeated at least three times (steps), with the equal duration. In this paper, we tried to review some critical problems related to the step-drawdown test, which were revealed in the process of field practices and analyses. The problems, referred in this paper, are mainly associated with the incorrect conceptual approach for analysis and incomplete data collection in the field test.

Key words : Step-drawdown test, Well loss, Aquifer loss, Productivity, Well efficiency, Pumping duration

요 약 문

단공 수리시험으로서의 단계양수시험은 일반적으로 대수층 및 우물의 생산성 혹은 효율을 평가하기 위해 수행되어 왔다. 단계양수시험은 기본적으로 초기에 저양수량으로 양수를 하며 양수관정의 수위가 안정되면 다음 단계의 고양수량으로 다시 수위가 안정될 때까지 양수를 지속한다. 이러한 과정은 최소 3단계 이상 반복되며 각 단계별 양수지속시간을 동일하여야 한다. 본 기술자료에서는 그 동안 국내에서 수행된 단계양수시험의 해석과 관련하여 몇 가지 문제점들을 살펴보았다. 그 결과 단계양수시험에 대한 부적절한 해석결과는 주로 잘못된 해석개념 및 불완전한 현장 양수자료와 관계가 큰 것으로 파악되었다.

주제어 : 단계양수시험, 우물손실, 대수층 손실, 생산성, 우물 효율, 양수지속시간

1. 서 론

단계양수시험은 단공시험으로 일정한 시간간격으로 양수량을 증가시켜가며 관정의 수위변화 혹은 수위강하를 관측함으로써 관정의 효율과 대수층의 생산성을 평가할 수 있다(이철우 외, 2002; 한정상, 1998; Dawson and Istok, 1991; Hantush, 1964; Kawecki, 1995; Kruseman

and de Ridder, 1991). 단계양수시험을 수행할 때 각 단계에서 관정내 지하수위가 안정될 때까지 양수하는 경우(pseudo steady-state, 기본적으로 안정수위를 확보하도록 권장하며 각 단계의 양수시간은 다를 수 있음)도 있지만 안정되지 않은 천이(transient)상태에서 다음 양수량 단계로 넘어가기도 한다. 이와 같은 현장 실무행위는 많은 경우 시간과 비용에 의해 지배된다.

*Corresponding author : hydrolee@empal.com

원고접수일 : 2004. 3. 11 게재승인일 : 2005. 2. 03

질의 및 토의 : 2005. 6. 30 까지

그런데 단계양수시험 자료를 이용하여 우물상수 혹은 우물효율을 평가할 때 몇 가지 신중히 고려해야 할 사항이 있다. 앞서 언급한 단계양수시험의 정의에서 알 수 있듯이 각 단계의 양수시간은 동일하여야 하며 가능하면 양수 관정의 수위가 안정 혹은 정상상태(시간에 따라 수위가 불변)에 도달해야 한다. 흔히 각 단계별로 30분~2시간의 양수시간을 두고 시험을 수행하나 수리지질학적 조건에 따라 양수 지속시간(pumping duration)은 이보다 훨씬 장 시간일 수 있으며 현장마다 매우 다를 수 있다(Kruseman and de Ridder, 1991). 그러나 해석을 위해서는 최소 3 단계의 양수가 필요하다.

저자들의 경험에 의하면 일부 현장실무자들 사이에 흔히 각 단계에서 안정수위만 획득된다면 단계별 양수지속 시간 혹은 시간간격은 동일하지 않아도 해석에 문제가 없다는 인식이 있다. 그런데 실제로 양수관정에서 안정수위를 얻기는 어려우며 자료의 해석을 위한 정상상태 혹은 준정상상태에 대한 판단은 전적으로 해석자 혹은 획득 수위의 도시형태(plot type)에 따라 다를 수 있다. Fig. 1은 현장에서 획득한 단계양수시험 자료에 대한 해석 개념모델의 몇 가지 예를 보여준다. Fig. 1(a)의 경우 단계양수 시험의 정의에 의해 양수관정의 수위가 안정되었으며 가장 이상적인 경우이다. 이 경우에는 각 단계의 양수지속 시간이 다르더라도 해석결과에 영향을 주지 않을 것으로 사료된다. 그러나 나머지 3가지 천이상태(Fig. 1(b)-(d)),

즉 양수관정의 수위가 안정되지 않았을 경우(흔히 현장에서 발생)에는 그 해석결과에 차이가 발생하게 된다. 실제로 대표적인 4가지의 해석개념 중 3가지(Fig. 1(a), (c) and (d))에는 문제가 적으나 Fig. 1(b)와 같이 해석하는 경우에는 올바르게 해석된 결과와 비교했을 때 큰 차이를 유발할 수 있다. 그런데 실무적으로 위와 같이 잘못 해석하는 경우가 적지 않다.

본 기술자료에서는 단계양수시험의 해석시에 동일 시간 간격 및 양수관정내 정상수위조건과 관련된 임의적 적용이 해석결과에 미치는 영향을 살펴보고 올바른 해석을 위한 몇 가지 고려사항들을 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

Jacob(1947)은 한 관정에서 다른 양수량으로 양수를 할 경우 수위강하가 어떻게 될 것인지에 대한 관심에서 최초로 단계양수시험을 수행하였다. 그리고 그는 양수량에 따른 양수관정에서의 수위강하를 다음과 같은 식으로 표현하였다(Kruseman and de Ridder, 1991).

$$s_w = B(r_{ew}, t)Q + CQ^2 \tag{1}$$

여기서 $B(r_{ew}, t) = B_1(r_{ew}, t) + B_2$, $B_1(r_{ew}, t)$ 는 선형 대수층 손실계수 B_2 는 선형 우물손실 계수 C 는 비선형 우물손실 계수 r_{ew} 는 우물의 유효반경 r_w 는 실제 우물반경 및 s_w

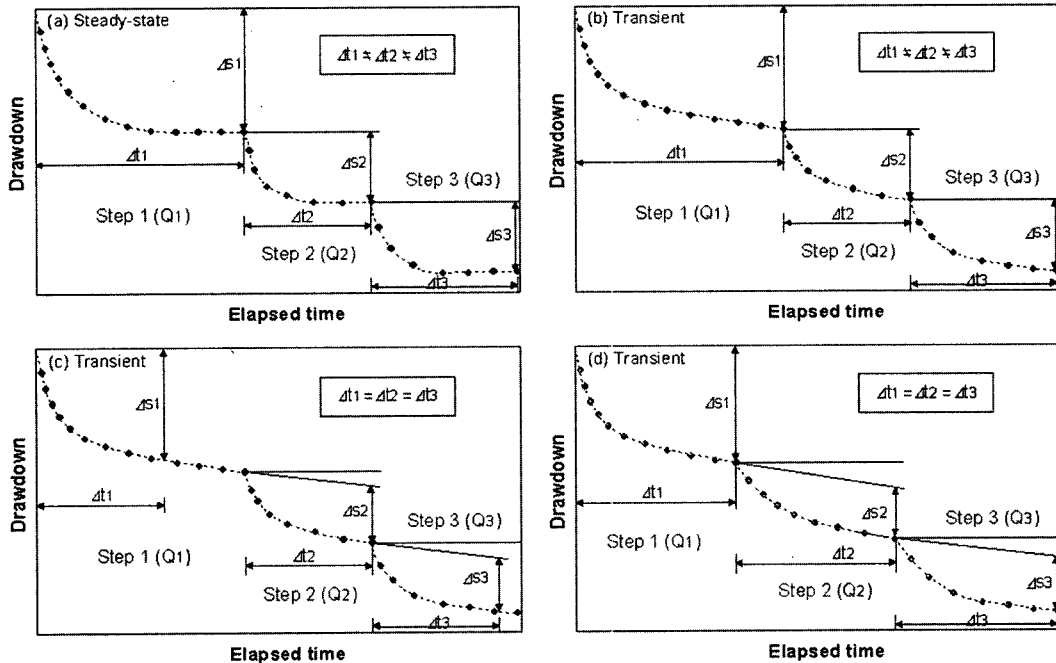


Fig. 1. Some conceptual approaches for analyzing the step-drawdown test data.

양수시간이다. 그런데 실제로 단계양수 시험자료로 r_{ew} 를 결정할 수 없다. 왜냐하면 양수정 주변에 관측정 혹은 피조미터가 있어서 대수층의 저류계수(storativity)를 알아야 하기 때문이다.

이후 다양한 연구자들이 양수관정내와 주변의 흐름을 연구하였으며 특히 Rorabaugh(1953)는 위의 Jacob식을 변형하여 다음의 일반적인 해를 제시하였다.

$$s_w = BQ + CQ^p \quad (2)$$

여기서 p 는 양수량(Q)에 따라 1.5~3.5의 값을 갖는다고 한다(Atkinson et al., 1994; Jacob, 1979; Lennox, 1966). 그러나 애초 Jacob이 제시한 2의 값이 여전히 널리 적용되고 있다(Ramey, 1982; Skinner, 1988). 단계양수시험을 통해 B 와 C 를 결정하고 또 p 를 정할 수 있다. 그리고 B 와 C 를 알면 특정하게 주어진 시간(t)과 양수량(Q)에 대해 양수관정에서의 수위강하를 예측할 수 있다.

여기서 한가지 중요한 사실은 B 는 상수가 아니며 시간에 따라 변한다는 것이다(Kruseman and de Ridder, 1991). 따라서 단계양수시험의 해석도 양수지속시간에 의존하게 된다. 그리고 대수층과 양수정의 생산성(productivity)을 지시하는 비양수량(Q/s_w)도 상수가 아니며 양수시간 혹은 양수량이 증가함에 따라 감소하게 된다. 또한 이에 의존하는 소위 우물효율(well efficiency)도 시간에 대한 함수이며 상수가 아니다.

본 기술자료에서는 초기에 언급한 임의적 혹은 동일하지 않은 각 단계별 시간간격의 선택 혹은 자의적 정상수위의 선택이 단계양수시험의 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 화성시에 위치한 서로 다른 두 농촌지역 지하수관정에서 수행한 단계양수시험자료를 이용하였다. 또한 논의와 해석의 단순성(즉 본 기술자료에서 비교하는 해석 개념모델의 차이에만 집중)을 위해 Jacob(1947)과 마찬가지로 $p=2$ 로 가정하였다.

3. 결과 및 토론

본 기술자료에서 사용한 단계양수시험 자료는 화성시에 있는 기존관정에서 획득한 자료로 하나의 관정은 평지지역(송산 관정, 방치관정)에 그리고 다른 하나의 관정은 해안지역(유포관정)에 위치하고 있다. 송산관정에서는 양수량을 일일 90, 100, 135, 160 및 210 톤으로 증가시켜 가며 5단계 양수를 하였으며 각 단계별 지속시간은 47, 34, 26, 35 및 59분이었다(Table 1 및 Fig. 2(a)). 그리고 유포관정에서는 양수량을 일일 50, 70, 90, 110 및

Table 1. Step-drawdown test data for Songsan well

Time (min) from beginning of each step	Step 1	2	3	4	5
	Q = 90 m ³ /day	Q = 100 m ³ /day	Q = 135 m ³ /day	Q = 160 m ³ /day	Q = 210 m ³ /day
Drawdown in meters					
1	0.873	3.222	5.139	7.593	11.119
2	1.429	3.682	5.590	7.804	12.097
3	1.803	3.989	5.849	8.024	12.806
4	2.052	4.190	6.088	8.360	13.342
5	2.215	4.334	6.347	8.724	13.773
6	2.340	4.459	6.568	9.031	14.051
7	2.426	4.545	6.740	9.280	14.357
8	2.493	4.622	6.884	9.471	14.712
9	2.560	4.679	7.009	9.606	15.028
10	2.608	4.727	7.095	9.749	15.296
12	2.685	4.804	7.239	9.912	15.717
14	2.752	4.861	7.334	10.056	16.024
16	2.800	4.900	7.402	10.142	16.301
18	2.838	4.938	7.459	10.209	16.531
20	2.877	4.976	7.507	10.257	16.732
25	2.954	5.044	7.574	10.343	17.134
30	3.021	5.092	NA	10.401	17.412
35	3.069	NA	NA	10.439	17.651
40	3.117	NA	NA	NA	17.843
45	3.164	NA	NA	NA	18.044
50	NA	NA	NA	NA	18.187
55	NA	NA	NA	NA	18.312

^aNA= not available

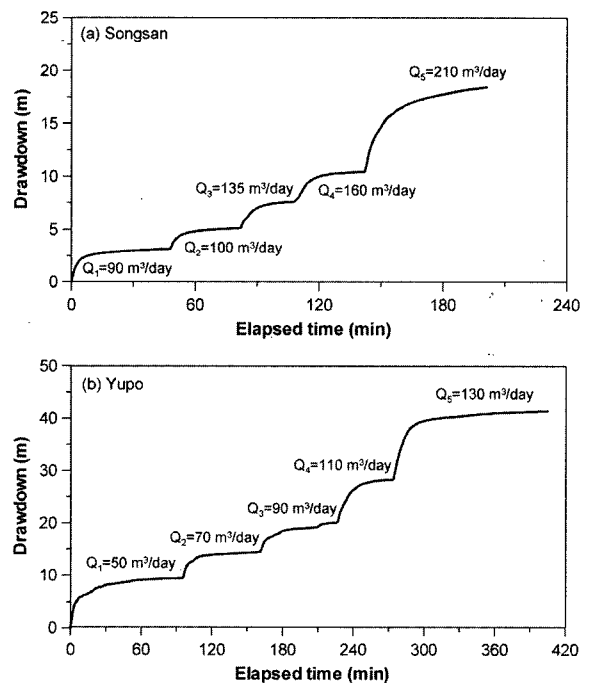


Fig. 2. Plot of step-drawdown test data for illustrating some relevant problems.

Table 2. Step-drawdown test data for Yupo well

Time (min) from begin- ning of each step	Step 1 $Q=50$ m^3/day	2 $Q=70$ m^3/day	3 $Q=90$ m^3/day	4 $Q=110$ m^3/day	5 $Q=130$ m^3/day
	Drawdown in meters				
1	1.527	9.724	14.444	20.062	28.235
2	2.986	10.760	15.000	20.340	28.512
3	4.206	11.413	15.690	21.375	29.527
4	4.734	11.844	16.199	22.170	30.494
5	5.079	12.151	16.534	22.755	31.653
6	5.348	12.362	16.803	23.205	32.601
7	5.626	12.506	17.004	23.608	33.443
8	5.818	12.612	17.167	24.001	34.132
9	5.905	12.708	17.263	24.499	34.716
10	6.039	12.976	17.368	24.959	35.443
12	6.241	13.322	17.570	25.639	36.630
14	6.394	13.523	17.809	26.118	37.453
16	6.673	13.628	17.944	26.472	38.056
18	6.874	13.715	18.250	26.884	38.477
20	7.248	13.772	18.490	27.191	38.812
25	7.699	13.897	18.778	27.660	39.328
30	8.093	13.983	18.912	27.909	39.634
35	8.275	14.060	18.988	28.091	39.845
40	8.458	14.127	19.065	28.206	40.007
45	8.650	14.185	19.151	28.254	40.141
50	8.774	14.261	19.334	NA	40.247
55	9.005	14.309	19.870	NA	40.313
60	9.129	14.386	20.014	NA	40.428
70	9.254	NA	NA	NA	40.687
80	9.350	NA	NA	NA	40.859
90	9.446	NA	NA	NA	41.021
100	NA ^a	NA	NA	NA	41.107
120	NA	NA	NA	NA	41.270

^aNA= not available

130톤으로 증가시켜 가며 5단계 양수를 하였고 각 단계별 지속시간은 각각 95, 65, 65, 47 및 132분이었다(Table 2 및 Fig. 2(b)). Fig. 2에서 직관적으로는 각 시험관정의 수위가 안정되어 정상상태에 도달한 것으로 보이나 실제로는 수위가 조금씩 하강하고 있는 천이상태이다.

위의 두 단계양수시험 자료를 이용하여 Fig. 1(b)에 제시된 부주의한 방법으로 해석을 시도하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 각 단계별 양수지속시간은 동일하지 않으며 송산관정에서는 최소 26분에서 최대 59분의 범위 그리고 유포관정에서는 47분에서 132분의 범위를 보인다. 이 때 각 단계의 지하수위강하(Δs_w)는 송산관정에서는 3.174, 1.946, 2.454, 2.865 m 그리고 유포관정은 9.484, 4.950, 5.618, 8.192 및 13.112 m이다. 우물효율 관련상수 B와 C를 계산하기 위해 Bierschenk(1963)의 방법을

Table 3. Specific drawdowns determined with raw data set (conceptual model in Fig. 1(b))

Songsan well	Δs_w (m)	s_w (m)	Q (m^3/day)	s_w/Q (day/m^2)	Δt (min)
Step 1	3.174	3.174	90	0.0353	47
Step 2	1.946	5.120	100	0.0512	34
Step 3	2.454	7.574	135	0.0561	26
Step 4	2.865	10.439	160	0.0652	35
Step 5	7.988	18.427	210	0.0877	59
Yupo well	Δs_w (m)	s_w (m)	Q (m^3/day)	s_w/Q (day/m^2)	Δt (min)
Step 1	9.484	9.484	50	0.1897	95
Step 2	4.950	14.434	70	0.2062	65
Step 3	5.618	20.052	90	0.2228	65
Step 4	8.192	28.244	110	0.2568	47
Step 5	13.112	41.356	130	0.3181	132

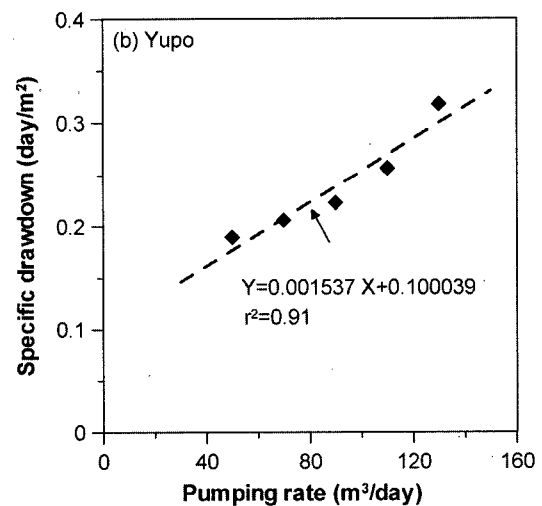
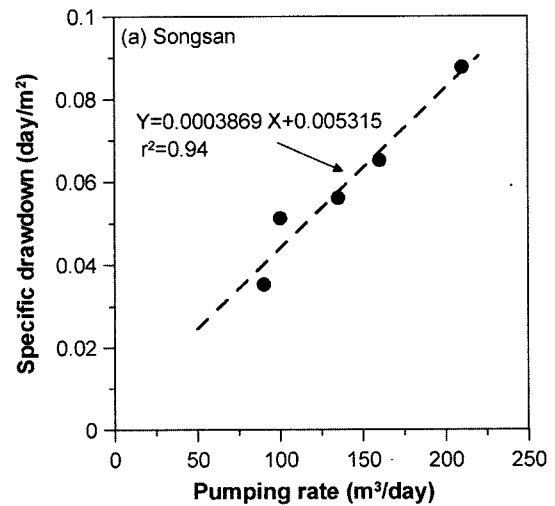


Fig. 3. Specific drawdowns determined with raw data set in Fig. 1(b).

Table 4. Specific drawdowns determined with correct data set (conceptual model in Fig. 1(c))

Songsan well	Δs_w (m)	s_w (m)	Q (m ³ /day)	s_w/Q (daym ²)	Δt (min)
Step 1	2.973	2.973	90	0.0330	26
Step 2	1.616	4.589	100	0.0459	26
Step 3	2.199	6.788	135	0.0503	26
Step 4	2.540	9.328	160	0.0583	26
Step 5	6.517	15.845	210	0.0755	26
Yupo well	Δs_w (m)	s_w (m)	Q (m ³ /day)	s_w/Q (daym ²)	Δt (min)
Step 1	8.707	8.707	50	0.1741	47
Step 2	4.423	13.130	70	0.1876	47
Step 3	4.130	17.260	90	0.1918	47
Step 4	8.174	25.434	110	0.2312	47
Step 5	11.749	37.183	130	0.2860	47

이용하여 양수량과 비수위강하량(s_w/Q)의 관계를 Fig. 3에 도시하였다. 송산관정에 대해서는 양수량과 비수위강하량의 관계에 대한 최적의 선형회귀직선은 $s_w/Q = 0.0003869 \cdot Q + 0.005315$ 이며 결정계수(r^2)는 0.95였다. 또 유포관정에 대해서는 $s_w/Q = 0.001537 \cdot X + 0.100039$ 로 그리고 결정계수는 0.91로 나타났다.

마찬가지로 동일자료에 대하여 Fig. 1(c)에 제시된 올바른 적용개념을 이용하여 재해석을 하였다(Table 4). 이때에는 동일한 양수지속시간을 적용하였으며 실제 각 시험에서 얻은 가장 짧은 지속시간 즉 송산관정에 대해서는 26분과 유포관정에 대해서는 47분을 이용하였다. 표에서 보는 바와 같이 각 단계별 수위강하량(Δs_w)는 송산관정에서는 2.973, 1.616, 2.199, 2.540, 6.517 m이며 유포관정에서는 8.707, 4.423, 4.130, 8.174 및 11.749 m이다. 앞서의 방법과 비교하였을 때 단계별 수위강하량은 송산관정에서는 0.201~1.471 m 감소하였으며 유포관정에 대해서는 0.018~1.488 m 줄었다. 그 이유는 본 해석방법에서는 양수지속시간을 동일하게 적용하였으며 또한 천이상태의 전단계 양수영향을 고려하여 이를 다음 단계의 수위강하량에서 제거하였기 때문이다(Fig. 1(c) 참조). 여기서 구한 비수위강하량 자료를 이용하여 양수량과의 관계를 동일한 Bierschenk(1963) 방법으로 평가하였다(Fig. 4). 그 결과 송산관정에 대해서는 최적 선형회귀직선이 $s_w/Q = 0.0003159 \cdot Q + 0.008679$ ($r^2 = 0.95$), 그리고 유포관정에 대해서는 $s_w/Q = 0.001337 \cdot Q + 0.09381$ ($r^2 = 0.87$)로 추정되었다.

위에서 구한 선형회귀식을 이용하여 B와 C를 구할 수 있는데 B는 $Q = 0$ 일 때의 비수위강하량(Y 절편)이 되며

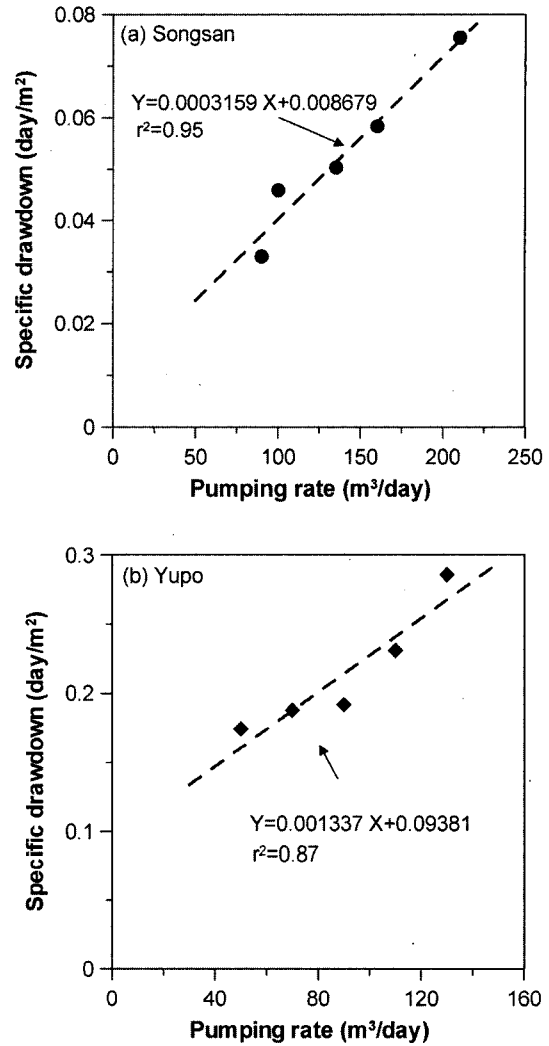


Fig. 4. Specific drawdowns determined with corrected data set in Fig. 1(c).

Table 5. Analysis results of the step-drawdown tests

Parameters	Incorrect approach		Correct approach	
	Songsan well	Yupo well	Songsan well	Yupo well
B (day/m ²)	0.005315	0.100039	0.008679 (↑ 63.29%)	0.09381 (↓ 6.23%)
C (day ² /m ⁵)	0.0003869	0.001537	0.0003159 (↓ 18.35%)	0.001337 (↓ 13.01%)
E_w^a (%)	13.24	41.97	23.39 (↑ 76.66%)	43.81 (↑ 4.38%)
Δt (min)	26-59	47-132	26	47

^a E_w (well efficiency) was defined by $BQ/(BQ + CQ^2)$ at $Q = 90$ m³/day in this study after Kruseman and de Ridder (1991) but it strictly means the ratio of laminar to total head losses

직선의 기울기가 C이다. 위의 해석결과를 종합하여 구한 우물 관련 상수를 Table 5에 제시하였다. 표에서 보는 바

와 같이 부적절한 방법을 이용하여 구한 우물상수값과 올바른 방법의 적용결과와 비교하였을 때 두 관정 모두에서 유의미한 차이(증감)를 보였다. 특히 우물 효율의 경우 부적절한 방법을 적용하였을 때 효율을 저평가하는 것으로 나타났다. 물론 이 때 양수량에 따라 그 결과는 달라질 수 있다.

한편 앞서 언급한 바와 같이 단계양수시험은 초기에 Jacob이 특정 관정에서 다른 양수량으로 양수를 할 경우 대상관정에서 수위강하가 어떻게 될 것인가에 대한 궁금증에서 출발하였다. 그러므로 위에서 구한 결과를 다음과 같이 기술할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \cdot \text{송산관정 } s_w &= 0.008679 \cdot Q + 0.0003159 \cdot Q^2 \\ &\text{(for } t = 26 \text{ min)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{유포관정 } s_w &= 0.09381 \cdot Q + 0.001337 \cdot Q^2 \\ &\text{(for } t = 47 \text{ min)} \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식은 다음과 같이 해석이 가능하다. 송산관정의 경우 본 시험에서 사용된 양수량의 범위내에서(혹은 범위 밖이라도) 임의의 양수량으로 양수를 할 때 양수지속시간 26분일 때의 수위강하는 위의 식으로 예측할 수 있다. 또한 유포관정의 경우 마찬가지로 양수지속시간 47분에 대해 임의의 양수량에 대한 관정 수위강하를 제시된 식으로 예측가능하다. 다른 양수시간에 대해서는 동일한 방법으로 식을 유도할 수 있다. 만약에 본 기술자료에서처럼 천 이상태가 아닌 이상적인 혹은 실질적인 안정수위를 이용한 해석결과라면 각 단계별 양수지속시간에 무관하게 우물상수의 추정이 가능하며, 해당관정에 대해 임의의 양수량에 대한 정상상태 혹은 최대 수위강하를 예측할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 기술자료에서는 우물의 효율과 대수층의 생산성을 평가하는 도구로 활용되고 있는 단계양수시험의 해석과 관련된 문제점을 간단히 고찰하였다. 이를 통해 일부 수리지질관련 실무자들 사이에 잘못 이해되고 있는 단계양수시험에 대한 해석과 의미를 명확히 하고자 하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 흔히 실무적으로 천이상태의 양수관정 수위를 안정수위로 간주하거나 혹은 동일하지 않은 양수지속시간을 이용하여 해석할 경우 우물관련상수 등에 상당한 오차가 발생할 수 있다. 만약 천이상태에서도 동일한 양수지속시간 자료를 이용한다면 해석결과에 오차가 적겠지만 그렇다고 하여도 가능하면 양수관정내 안정수위

를 얻도록 장기적으로 양수하는 것이 바람직하다. 그런데 본 기술자료에 제시한 개념모델(Fig. 1(c) 혹은 Fig. 1(d))을 적용할 경우 외삽(extrapolation) 방법의 엄밀성 혹은 적합성에 대한 논란의 여지는 여전히 남아 있다.

사 사

본 기술자료에 사용된 단계양수시험 자료는 제2저자의 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-3-1)에 의해 수행된 현장시험에서 획득한 것임을 밝힙니다. 그리고 좋은 수정의견을 주신 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- 이철우, 이대하, 정지곤, 김구영, 김용제, 2002, 양수시험시 방사상호를 보이는 균열암반 대수층에서의 우물손실, 지하수토양환경, 7(4), 17-23.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, 서울, 1071 p.
- Atkinson, L.C., Gale, J.E., and Dudgeon, C.R., 1994, New insight into the step-drawdown test in fractured-rock aquifers, *Hydrogeol. J.*, 2(1), 9-18.
- Bierschenk, W.H., 1963, Determination well efficiency by multiple step-drawdown tests, *Intern. Assoc. Scientific Hydrology*, 64, 493-507.
- Dawson, K.J. and Istok, J.D., 1991, *Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests*, Lewis Publishers, Michigan, 344 p.
- Hantush, M.S., 1964, Hydraulics of wells, In: V.T. Chow (ed.), *Advances in Hydrosciences*, Academic Press, New York, 1, p. 281-432.
- Jacob, B., 1979, *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill Inc., Israel, 569 p.
- Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 112, 1047-1064.
- 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, 378 p.
- Lennox, D.H., 1966, Analysis of step-drawdown test, *J. Hydr. Div.*, 92(HY6), 25-48.
- Ramey, H.J., 1982, Well-loss function and the skin effect: A

review, In: T.N. Narasimhan (ed.), *Recent Trends in Hydrogeology*, Geological Society of America, Boulder, p. 265-271.

Rorabaugh, M.J., 1953, Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well, *Proc. Amer. Soc. Civil*

Engrgs., **79**, p. 23.

Skinner, A.C., 1988, Practical experience of borehole performance evaluation, *J. Inst. Water Environm. Manag.*, **2**, 332-340.