

## 단공시험 해석에서 저류계수의 보정방법

최 병 수\*

한국지하수협회

### A Method for Storativity Compensation in Single Well Test Analysis

Choi, Byong-soo\*

Korea Ground Water Association

#### ABSTRACT

In the case of single well pumping tests the storativities are generally overestimated. To compensate these errors, the effective wellbore radius should be introduced as a distance to an imaginary observation well in the time-drawdown analysis. Effective wellbore radius can be calculated through step drawdown tests or using skin factor equation. But both are of trial-and-error methods guessing real storativity values and, therefore, are difficult to apply to the field conditions. An equation was developed to estimate effective wellbore radius from storativity values obtained from pumping well data. For this study, a total of 136 time-drawdown data set were used to derive the equation. The effective wellbore radius were estimated first by changing them till the storativity values obtained from the pumping-well data match the ones based on the observation-well data. Then the equation was regressed from the relation between effective wellbore radius and the storativity values obtained from the pumping-well data. It is believed that the equation would be useful in estimating effective wellbore radius from the single well tests.

**Key words :** Single well tests, Wellbore radius, Effective wellbore radius, Storativity, Skin factor

#### 요 약 문

대수층시험에서 관측공 없이 단공으로 양수시험을 시행하는 경우 일반적으로 저류계수가 실제보다 크게 산정된다. 이를 보정하려면 유효우물반경을 계산하여 이를 가상의 관측정 거리로 입력하는 방법으로 시간-수위강하량 자료를 해석하여야 한다. 유효우물반경의 계산은 단계양수시험에 의하거나 또는 스킨계수 공식을 적용하여 실행할 수 있다. 그러나 이 두 가지 방법 모두 조사대상 대수층의 저류계수를 추정하여 대입하는 시행착오 방식으로서 현장 적용성은 다소 부족하다. 본고에서는 국내에서 시행된 다수의 양수시험 자료를 바탕으로, 단공시험 저류계수를 독립변수로 하는 유효우물반경 산정공식을 유도하였다. 본 연구에는 양수정과 관측정에서 동시에 수위강하를 측정한 136개소의 양수시험자료가 이용되었다. 먼저, 양수정 자료만으로 산출된 저류계수가 관측정 자료로 구해진 저류계수와 같은 값을 가질 수 있는 관측거리 즉, 유효우물반경을 구하였으며, 이 유효우물반경과 양수정에서 구한 저류계수의 상관관계를 바탕으로 단공시험에서 유효우물반경 산정에 사용할 수 있는 회귀공식을 얻을 수 있었다.

**주제어 :** 단공시험, 우물반경, 유효우물반경, 저류계수, 스킨계수

#### 1. 서 론

대수층 양수시험의 주 목적은 대수층상수 즉 투수량계

수와 저류계수를 산정하는데 있으며 일반적으로 양수시험은 대수층을 관통한 우물에서 일정율의 양수를 실시하는 동안 인근의 관측공에서 시간-수위변동량 자료를 취하는

\*Corresponding author : choibs38@hanmail.net

원고접수일 : 2007. 4. 12 게재승인일 : 2007. 6. 5

질의 및 토의 : 2007. 8. 31 까지

방법으로 이루어진다.

근래에 우리나라에서 지하수 개발은 대부분 100 m 이상의 심부 암반지하수를 대상으로 하고 있으나 대수층조사를 위하여 양수정 인근에 별도의 관측공을 설치하는 것은 과도한 비용이 추가 소요되므로 조사 성격상 특별한 경우가 아니면 관측공 없이 양수정만으로 단공양수시험을 시행하는 것이 일반화되어 있다. 지하수법 시행령 12조 관련 별표의 영향조사 항목 및 조사방법에서도 “단공시험을 실시하고자 하는 경우에는 양수정에서만 지하수위를 측정할 수 있다”는 단서조항이 있는데 이것은 이러한 경우를 감안하여 설정된 것으로 볼 수 있다.

본 연구의 목적은 단공시험을 시행하여 얻어진 시간-수위강하량 자료로부터 저류계수를 적정하게 산정하는 방법을 제시하는데 있다. 그러기 위하여 가상 관측공을 설정할 필요가 있으며, 이 가상관측공 거리를 적용할 때 대수층의 실제 저류계수와 일치되는 값을 구할 수 있다면 가상관측공의 거리는 유효우물반경(effective wellbore radius,  $r_e$ )이라고 할 수 있다. 만일 단공시험에서 유효우물반경을 구할 수 있다면 이를 이용하여 대수층 저류계수도 보정할 수 있다.

## 2. 기존의 방법

### 2.1. 유효우물반경의 의미

일반적으로 단공양수시험으로 구해진 투수량계수는 신뢰할 수 있으나 저류계수는 실제보다 과대하게 산출되는 것으로 알려져 있다. 이것은 Jacob의 방법으로 양수정에서의 시간-수위강하량을 분석하는 다음 공식을 검토하면 알 수 있다.

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \cdot \Delta s}, S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad (1)$$

여기서 T는 투수량계수, S는 저류계수, Q는 양수율, r은 관측정까지 거리이며, 편대수방안지의 log축을  $t_0$  산술축을 수위강하량으로 하여 도시하면 시간과 수위강하의 관계는 선형관계를 보이며, 이때 1 order(10배)의 시간변화에 따른 수위강하차이는  $\Delta s$ , 선형관계를 이용, 외삽하여  $s = 0$ 일 때, 얻어진 시간 값은  $t_0$ 이다.

양수정에서 우물손실은 시간에 따른 수위강하량의 변화율( $\Delta s$ )에는 영향을 주지 않기 때문에 양수정 내의 수위강하를 분석하여 T를 구하는 것이 가능하다. S의 경우는 관측정 거리로 우물반경을 적용하여야 하는데 이는 우물손실의 영향으로 대수층손실에 상응하는 우물반경 즉, 유효

우물반경보다 훨씬 작은 거리이기 때문에 S가 실제보다 크게 산출된다.

단공시험의 문제점은 양수정 주변의 수리전도도가 변질되었기 때문에 우물손실이 발생하여 우물 안 수위강하가 대수층 성질을 반영하지 못하는 것이다. Fig. 1에서 보여 주듯이 우물주변에서의 수리전도도가 당초 K에서  $K_s$ 로 변동되었을 때 우물 주위에 스킨(skin)이라 불리는 공벽이 생긴다. 스킨 반경  $r_s$  구간에서  $K_s < K$  일 때는  $K_s = K$  일 때에 비하여 더 큰 수위강하가 발생한다. 이를 양의 스킨(positive skin)이라고 하는데, 이러한 효과는 굴착 작업시 점토 등으로 공벽이 막히거나 장기적 이용시 화학적 침전으로 대수층의 공극이 메워져서 우물주위의 수리전도도가 대수층 평균 수리전도도보다 작아질 때 생긴다. 만약에 써징(surging) 작업 또는 수압파쇄작업(hydraulic fracturing)등으로 우물주위의 수리전도도가 대수층 본래의 수리전도도 보다 월등히 개선되어  $K_s > K$ 로 되었다면 우물 수위강하량은  $K_s = K$  일 때보다 감소될 것이며 우물손실효과 즉 스킨효과는 음의 값(negative skin)을 나타낸다. 유효우물반경은 Fig. 1에서 스킨반경과 같은 개념이며, 유효우물반경 산정에는 단계양수시험에 의한 방법과 스킨계수(skin factor)에 의한 방법이 있다.

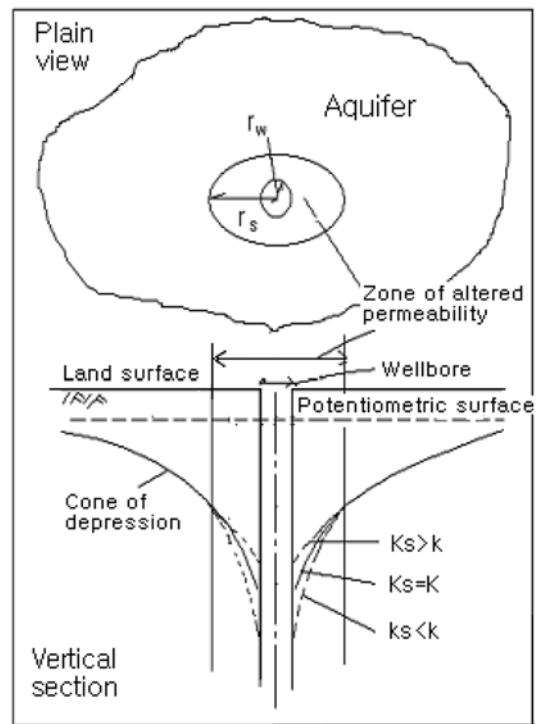


Fig. 1. Effects on drawdown of a zone of altered permeability around a pumped well (after Kaehler and Hsieh, 1993).

**2.2. 단계양수시험에 의한 유효우물반경**

우물의 수위강하량  $s_w$ 는 대수층손실( $s_a = BQ$ )과 우물손실( $s_l = CQ^2$ )의 합으로 표시할 수 있다.

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

여기서  $Q$ 는 양수량,  $B$ 는 대수층 손실계수,  $C$ 는 우물손실 계수이다.  $B$ 는 평형상태에서는 상수이나 비평형 상태에서는 시간  $t$ 의 함수로 표시된다. 즉,

$$B = \frac{1}{4\pi T} \ln \frac{2.25 Tt}{r_w^2 S} \quad (3)$$

이며, 여기서  $T$ 는 대수층 투수량계수,  $S$ 는 저류계수,  $r_w$ 는 우물반경,  $t$ 는 양수시간이다.

단계양수시험을 시행하면 (2)식의 양변을  $Q$ 로 나누어

$\frac{s_w}{Q} = B + CQ$ 로 되므로, 양수량  $Q$ 와 비수위강하량  $\frac{s_w}{Q}$ 의 관계를 직선으로 그리고  $Q=0$  일 때의 절편  $B$ 와 직선의 기울기  $C$ 를 구할 수 있다. 이 때의  $B$ 는 단계별 양수 경과시간  $t^*$ 에 해당되는 값이다. 한편 유효우물반경의 위치에서 수위강하량은 대수층손실( $BQ$ ) 뿐이므로 (3)식을 유효우물반경( $r_e$ )에 대하여 다시 쓰면

$$B = \frac{1}{4\pi T} \ln \frac{2.25 Tt^*}{r_e^2 S} \quad (4)$$

이 되고 이것을 유효우물반경 산정공식으로 다시 쓰면 다음과 같다(Roscoe Moss, 1990).

$$r_e = \sqrt{\frac{2.25 Tt^*}{S \cdot e^{4\pi TB}}} \quad \text{또는} \quad r_e = \sqrt{\frac{2.25 Tt^*}{S \cdot 10^{5.46TB}}} \quad (5)$$

여기서  $S$ 는 조사대상 대수층의 적정 저류계수를 추정하여 대입하여야 한다. 대수층의 상태에 따라 저류계수의 범위를 정하는 명확한 기준은 없지만 일반적으로 자유면대수층의 경우 0.1~0.01, 누수대수층의 경우 0.01~0.001, 피압대수층의 경우 0.001~0.0001의 범위에서  $S$ 값을 추정하여도 무리는 없다(농어촌진흥공사, 지하수영향조사실무지침).

**2.3. 스킨계수에 의한 유효우물반경**

균열 암반대수층에 개발한 우물은 우물 주변의 균열에서 지하수 유동이 활성화되어 Fig. 1에서  $K_s > K$  인 경우가 된다. 이때는 음의 수위강하(negative skin)가 발생하므로  $K_s = K$  일 때와 비교하여 수위강하량이 적어지고 우물반경  $r_w$ 이 스킨반경  $r_s$ 로 확대된 결과와 같이 된다. 이러한 효과를 설명하기 위하여 다음과 같이 무차원의 스킨

계수(skin factor)개념이 도입되었다(Hawkins, 1956).

$$\sigma = [(K/K_s) - 1] \ln (r_s/r_w) \quad (6)$$

이 식에서  $K_s > K$ 이면 스킨계수  $\sigma$ 가 음의 값을 가지며 스킨 반경  $r_s$ 를 유효우물반경  $r_e$ 로 놓아서 다음과 같이 유효우물반경 공식을 제시하였다(Brons and Miller 1961, Earlougher 1977, Kaehler 1993)

$$r_e = r_w e^{-\sigma} \quad (7)$$

식 (6)에서  $K, K_s, r_s$ 의 값을 대입하면 스킨계수를 구할 수 있고 식 (7)에 의거 유효우물반경을 구할 수 있으나 실제로는  $K, K_s, r_s$ 의 측정이 어려운 항목이라 적용이 쉽지 않다. 근래에 균열암반의 이중공극(double porosity)모델 이론이 개발되어 지하수유동이 평형상태에 이르렀을 때의 스킨계수 와 우물손실의 관계를 다음과 같이 제시하고 있다(Novakowski, 1990).

$$s_l = \frac{Q}{2\pi T} \sigma \quad (8)$$

그러므로 식 (8)을 식 (2)에 대입하면

$$\sigma = \frac{s_w}{Q/(2\pi T)} - \frac{1}{2} \ln \frac{2.25 Tt}{Sr_w^2} \quad (9)$$

이 되고 여기서 양수경과시간 1분에 해당하는 수위강하량을  $s_w = \Delta s$ 로 놓아서 식 (9)를 다시 쓰면 다음과 같이 스킨계수 산출공식이 유도된다.

$$\sigma = \frac{2\pi T\Delta s}{Q} - 1.15 \cdot \log \frac{2.25 Tt}{Sr_w^2} \quad (10)$$

일반적으로 스킨계수의 범위는  $\infty$ 에서  $-5$ 까지(무한대)라고 알려져 있다.  $\infty$ 는(무한대) 우물 공벽이 아주 막혀서 물이 한 방울도 나오지 않는 경우이고  $-5$ 는 수압파쇄작업(hydraulic-fracturing)등으로 암반균열을 확대시켰을 때이다. 균열암반(fractured rock)에서는  $0 > \sigma > -5$  범위의 음수 스킨계수를 가진다(McConnell, 1993). 그러나 skin factor의 공식에서도 저류계수  $S$ 가 미지수로 포함되어 있으므로 단계양수시험 방법에서와 같이 대수층의 상태에 따라 적정 저류계수를 추정하여 대입하여야 한다.

**2.4. 적용성 검토**

단계양수시험 방법이나 스킨계수 방법으로 유효우물반경을 직접 산정할 수는 없다. 그것은  $r^2 S$ 가 멍치상수(lump parameter)로서  $r$ 과  $S$ 가 항상 따라 다니는 관계이

므로  $r$ 과  $S$ 를 독립적으로 구할 수 없기 때문이다. 그러므로 조사 대상지구의 대수층 조건을 감안하여 적절한 저류계수 값을 추정 대입하고 유효우물반경을 계산한 다음 이를 관측정 거리로 입력하여 시간-수위강하량 곡선을 재해석함으로써 시행착오 방식(trial and error method)으로 최적의  $S$ 값에 접근하여야 한다. 이러한 시산방법은 현장 적용성을 떨어뜨리고 있다.

한편, 유효우물반경 산정공식의 적용성을 검증하기 위하여 국내에서 관측정이 있는 지구의 양수시험 조사 자료를 분석하였다(최병수, 1998). 양수시험에서 양수정과 관측정에서 동시에 수위를 관측한 4개 지구의 먹는샘물지구(알프스, 용문, 옥천, 제천)의 양수시험 자료를 분석하여 양수정에서 구해진 저류계수가 관측정에서 구해지는 저류계수와 비슷한 값이 되도록 유효우물반경을 설정하고, 단계양수시험 접근방법과 스킨계수 접근방법으로 각각 분석한 유효우물반경을 비교한 바, 스킨계수 방법에 의한 유효우물반경은 현장조사방법에 의한 것과 거의 일치하고 있으나, 단계양수시험 방법에 의한 유효우물반경은 현장조사방법에 비하여 1.6~14.3배의 큰 폭의 변동을 보여, 균열 암반대수층에서 단계양수시험 접근 방법 보다는 스킨계수 접근방법이 적용성이 있는 것으로 보고되었다.

### 3. 통계적 방법의 유도

#### 3.1. 자료 및 방법

본고에서는 유효우물반경을 실용적으로 구하고자 통계적인 경험공식을 유도코자 하였다. 연구의 방법은 관측정이 있는 조사지구에서 양수정과 관측정의 수위를 동시에 관측하면서 시행한 양수시험자료를 수집하고, 양수정의 시간-수위강하량 자료의 해석 결과 산출된 저류계수가 관측정의 시간-수위강하량 자료 해석결과와 일치하거나 비슷하게 되도록 가상관측정을 설정하여 유효우물반경을 구한 다음, 이 유효우물반경과 양수정에서 구해진 저류계수와 관계를 통계적으로 분석하는 것이다. 양수시험 자료의 수집은 건설교통부 발행 지하수기초조사보고서를 주로 이용하였고 건설교통부 발행 관측망조사보고서와 환경영향평가 조사기관의 먹는샘물 영향조사보고서를 일부 포함하였다. 시간-수위강하량 자료의 해석은 AQTESOLV Version 2.01 프로그램을 사용하고 Theis 표준곡선법을 적용하였다. 양수정 자료의 해석에는 관측정거리  $r$ 를 1차로 우물반경 0.1 m를 입력하여(조사공 모두 굴착구경 200 mm임) 저류계수를 산정하고, 관측정 자료 해석에서 구해진 저류계수에 근접하도록  $r$ 를 조금씩 크게 조정하면서

재 해석하여 유효우물반경을 구하였다. 이때 투수량계수는 처음 값을 유지하도록 하였다. Table 1은 총 136공의 자료원을 나타내며, 대상공 중 관측정 수위 해석에 의한 저류계수를 기준으로  $S > 0.01$ 은 자유면지하수,  $0.01 > S > 0.001$ 은 누수지하수,  $0.001 > S$ 은 피압지하수로 분류하였다.

#### 3.2. 결과

조사공별 유효우물반경 산출 결과는 Table 2에 수록하였다. 이 결과를 통계적으로 분석하기 위하여 양수정에서 산출된 저류계수  $S$ 를 독립변수로 하고 유효우물반경과의 관계를 상관분석 하였다. 자료 전체로 볼 때는 상관관계가 모호하였으나 Table 1에서 보여주듯이 대수층 상태에 따라 자유면대수층, 누수대수층, 피압대수층으로 자료를 분류하고, 계열별로 회귀분석을 시행한 결과 유효우물반

Table 1. Source and no. of well data for analysis

Source	Name of areas	No. of wells	Unconfined	Leaky	Confined
지하수 기초 조사	울진	18	9	7	2
	울산	8	2	2	4
	영덕	6	1	5	
	영천	10	2	3	5
	고흥	7	1	3	3
	진해	3	1	2	
	포항	11	3	2	6
	대구	6	1	4	1
	천안	15	3	6	6
	목포	15	1	9	5
	광주	4		4	
	밀양	2		2	
	김제	3		3	
지하수 관측망 조사	전주	3		2	1
	칠곡	3		2	1
	대전	1			1
	홍성	1			1
	청도	1	1		
	보은	1	1		
	안동	1	1		
먹는 샘물	임실	1	1		
	의령	1	1		
	예산	1	1		
	지리산	1		1	
	모악산	1		1	
	찬마루	5		1	4
	용문	1		1	
	영주	2		2	
	구례	2			2
	삼성	1			1
옥천	1			1	
계	31	136	30	62	44

**Table 2.** Storativity and effective wellbore radius of each well

Sp : Storativity in the pumping well

So : Storativity in the observation well

Area well no.	Sp	So	Aqui-fer	$\frac{r_e}{r_w}$	$\sigma$	$e^{-\sigma}$	
울진	QS-1	1.298	0.0177	U	8	-2.45	11.7
"	QS-2	1.38	0.0961	U	4.5	-2.511	12.5
"	QS-3	0.0368	0.0356	U	1	-0.689	2
"	QS-5	0.648	0.0157	U	6.5	-1.72	5.62
"	QS-6	9.96	0.062	U	13	-2.88	18.16
"	QS-7	18.1	0.088	U	14.4	-3.16	24.1
"	QS-8	10.8	0.078	U	11.8	-2.857	17.7
"	QS.10	11.19	0.1231	U	9.5	-1.946	7.07
"	RS-1	0.0937	0.0159	U	2.4	-0.806	2.25
"	RS-2	0.0804	0.00122	L	8	-2.159	8.7
"	RS-3	0.143	0.00198	L	8.5	-2.153	8.7
"	RS-5	0.158	0.001	L	12	-2.095	8.25
"	RS-6	0.0515	0.00033	C	12.5	-2.547	12.9
"	RS-7	0.164	0.0034	L	7	-1.992	7.4
"	RS-8	0.148	0.0043	L	6	-1.32	3.8
"	RS-9	0.09	0.00216	L	6.5	-1.8	6.1
"	RS.10	0.16	0.00297	L	7.3	-1.53	4.65
울산	UJE-2	0.4426	0.0009	C	22	-2.93	19
"	UJE-4	0.408	0.00019	C	45	-3.49	34
"	UJE-6	0.526	0.00038	C	36	-3.205	25
"	UJE-8	0.0996	0.0422	U	1.5	-0.493	1.6
"	UJE11	0.348	0.00229	L	12	-2.7	15.1
"	BGE.2	0.1237	0.00599	L	4.7	-1.58	4.8
"	BGE.4	0.6236	0.0236	U	5	-2.08	7.4
"	BGE.6	0.1345	0.00036	C	19	-2.63	14.1
영덕	YW-1	0.3914	0.0043	L	10	-2.67	14.6
"	YW-2	0.239	0.00176	L	13	-2.7	15.1
"	YW-3	0.553	0.014	U	6	-1.95	7
"	YW-6	0.365	0.0064	L	7.5	-3.464	8.8
"	YW-7	0.537	0.0028	L	14	-3.159	23.9
"	YW-8	0.492	0.00189	L	16	-2.37	10.8
영천	YCE-1	0.763	0.00101	L	25	-3.577	36.1
"	YCE-2	0.117	0.00697	L	4	-1.55	4.7
"	YCE-3	0.027	0.0352	U	1	-	-
"	YCE-4	12.3	0.00314	L	63	-3.8	45.5
"	YCE-6	5.027	0.1397	U	6	-1.84	6.35
"	YCE-7	0.102	0.00016	C	23	-2.061	7.93
"	YCE-9	0.567	0.00077	C	45	-3.928	51.1
"	YCE10	0.111	0.00007	C	37	-3.206	25.1
"	YCE11	0.0425	0.00014	C	16	-1.758	5.91
"	YCE12	0.94	0.00017	C	75	-4.304	75.3
고흥	GHE-4	0.565	0.0242	U	5	-1.44	4.2
"	GHE-5	4.49	0.0082	L	22	-4.06	26.4
"	GHE-8	0.3224	0.00036	C	29	-2.28	9.9

**Table 2.** continued

Area well no.	Sp	So	Aqui-fer	$\frac{r_e}{r_w}$	$\sigma$	$e^{-\sigma}$	
고흥	GHE-9	3.118	0.0065	L	21	-3.02	20.8
"	GHE10	0.135	0.00035	C	20	-2.9	18.4
"	GHE11	3.053	0.00221	L	36	-3.67	39.9
"	GHE12	0.431	0.00038	C	34	-2.9	18.4
진해	JHE-2	1.634	0.302	U	2.4	-1.78	6
"	MSE-1	0.466	0.0021	L	14	-	-
"	MSE-3	0.199	0.0013	L	12	-2.33	10.3
포항	PHE-3	0.4	0.00006	C	80	-3.7	41.2
"	PHE-5	0.0014	0.00135	L	1	-0.05	1
"	PHE-7	0.614	0.00059	C	35	-3.55	35.4
"	PHE-9	0.653	0.00008	C	85	-4.087	60.8
"	PHE11	0.0644	0.00047	C	12	-2.57	13.2
"	PHE13	1.456	0.00177	L	29	-3.53	34.7
"	PHE15	0.1	0.0137	U	2.7	-1.08	2.9
"	PHE17	0.472	0.00005	C	100	-3.45	52
"	PHE19	0.0155	0.00004	C	21	-1.84	6.4
"	PHE21	0.699	0.0137	U	7.2	-2.135	8.5
"	PHE23	9.41	0.01845	U	22.5	-3.03	21
"	PHE25	0.0224	0.00031	C	8	-1.79	6
대구	BGE-2	0.508	0.00652	L	9	-3	20.4
"	DGE-2	0.307	0.00446	L	8	-2.48	12.1
"	DSE-2	0.6806	0.00355	L	14.2	-2.88	18
"	DSE-4	28.4	0.0107	U	52	-3.55	35
"	DSE-6	0.256	0.0089	L	5.3	-1.74	5.7
"	DSE-8	0.388	0.00014	C	52	-3.28	27
천안	CAE-2	0.3315	0.0704	U	2.2	-0.48	1.62
"	CAE-4	0.183	0.064	U	1.7	-1.46	4.4
"	CAE-6	0.2325	0.00005	C	69	-3.29	27.3
"	CAE-8	0.4016	0.00185	L	14.6	-2.58	13.4
"	CAE10	0.238	0.0059	L	6.3	-1.82	6.3
"	CAE12	0.336	0.0480	U	2.7	-0.82	2.3
"	CAE14	0.383	0.0007	C	23	-3.07	22
"	CAE18	0.735	0.00434	L	13	-2.19	9
"	CAE20	0.0225	0.00966	L	1.6	-0.465	1.6
"	CAE22	1.673	0.00205	L	29	-3.41	30.8
"	CAE24	0.402	0.00049	C	28	-2.55	13
"	CAE26	0.0149	0.00945	L	1.35	-0.12	1.13
"	CAE28	0.295	0.00073	C	20	-2.91	18.6
"	CAE32	0.092	0.00010	C	30	-3.35	29
"	CAE34	0.173	0.00016	C	30	-3.61	36
목포	KJ-1	0.0958	0.00675	L	3.7	-1.34	3.8
"	KY-1	0.343	0.00108	L	17	-2.89	18.2
"	CM-1	0.766	0.00689	L	10.5	-2.44	11.1
"	HJ-1	0.12	0.00104	L	11	-2.25	9.6
"	YWO.2	0.638	0.00522	L	11	-2.59	13.5
"	HO-1	0.937	0.00349	L	17	-2.76	16

Table 2. continued

Area well no.	Sp	So	Aqui-fer	$\frac{r_e}{r_w}$	$\sigma$	$e^{-\sigma}$
목포 WN-1	0.425	0.0022	L	13	-2.6	13.6
" KHO-2	0.31	0.00442	L	8.3	-1.72	5.6
" HPN-1	0.377	0.00563	L	8	-2.1	8.2
" CS-1	0.715	0.00090	C	32	-3.705	41.4
" CG-1	0.4608	0.00021	C	43	-3.86	48.4
" MSUN	0.395	0.00088	C	21	-2.74	15.7
" JUK-1	0.561	0.00068	C	28	-3.29	27.3
" SAN-1	0.302	0.00014	C	45	-3.9	50.4
" CCN-1	0.092	0.0913	U	1	-0.05	1
광주 GJE-5	0.554	0.0054	L	9.8	-2.42	11
" GJE-6	0.9035	0.00971	L	9.5	-2.15	8.7
" GJE-7	1.028	0.00468	L	14.5	-1.76	5.86
" GJE-8	3.056	0.00136	L	47	-3.88	49.3
밀양 MYE-4	0.521	0.0033	L	12	-2.95	19.4
" MYE-5	0.412	0.0054	L	8.5	-2.59	13.5
김제 GJE-1	0.9052	0.00414	L	14	-2.75	15.8
" GJE-2	0.242	0.00557	L	6.5	-1.88	6.7
" GJE-3	0.403	0.00345	L	11	-2.45	11.7
전주 JJE-1	0.0806	0.0012	L	8	-2.21	9.2
" JJE-2	0.327	0.00084	C	20	-3.146	23.5
" JJE-3	1.38	0.0039	L	17.5	-2.72	15.4
칠곡 CGE-1	0.4935	0.00668	L	9	-2.62	13.9
" CGE-5	0.237	0.00026	C	30	-3.022	20.8
" CGE-7	0.5253	0.00123	L	20	-2.21	9.2
대전 DJE-2	0.0127	0.00058	C	4.6	-1.565	4.8
홍성 HSE-2	0.58	0.00053	C	32	-3.19	25
관측 청도	0.6387	0.0588	U	3.3	-0.956	2.61
망 보은	0.27	0.0742	U	2.8	-0.37	1.45
" 안동	2.684	0.27	U	3	-1.51	4.5
" 입실	0.049	0.022	U	1.5	-0.723	0.2
" 의령	0.374	0.016	U	4.7	-0.335	1.4
" 예산	0.428	0.074	U	2.4	-0.733	2.08
먹는 지리산	0.423	0.00747	L	8	-2.91	18.4
샘물 모악산	0.149	0.00179	L	10	-2.727	17.1
" 용문	1.897	0.00281	L	22	-3.78	44.6
" 영주2	4.906	0.0051	L	35	-3.1	22.5
" 영주4	0.175	0.0066	L	7.5	-	-
" 옥천	0.025	0.00057	C	5.5	-2.836	17.2
" 삼성산	0.168	0.00097	C	13	-2.532	12.7
" 구례1	0.2994	0.00029	C	55	-3.13	29.9
" 구례2	0.4163	0.00042	C	40	-3.314	36.3
" 참마루1	0.0768	0.00031	C	13	-3.237	25.9
" 참마루2	0.178	0.00084	C	15	-2.74	15.7
" 참마루3	0.0395	0.00041	C	10	-2.142	8.6
" 참마루4	0.3193	0.00085	C	17	-2.81	16.8
" 참마루5	0.0136	0.00157	L	3	-1.5	4.5

U : Unconfined,, L : Leaky, C : Confined.

경과 우물반경의 비( $\frac{r_e}{r_w}$ )가 양수정 저류계수 S의 누승에 비례하는 것으로 나타났으며, 다음과 같이 대수층 조건에 따라 상수가 조금씩 다른 회귀공식을 얻을 수 있었다. 즉, 자유면지하수의 경우 :

$$\frac{r_e}{r_w} = 4.8 \cdot S^{0.48} \quad (R^2 = 0.79) \quad (11)$$

누수지하수의 경우 :

$$\frac{r_e}{r_w} = 16.7 \cdot S^{0.46} \quad (R^2 = 0.82) \quad (12)$$

피압지하수의 경우 :

$$\frac{r_e}{r_w} = 58.9 \cdot S^{0.58} \quad (R^2 = 0.62) \quad (13)$$

와 같이 관계식이 유도되었는바, 유효우물반경의 크기에 따라 저류계수가 다르게 산정되고 저류계수는 대수층의 특성을 나타내기 때문에 대수층의 성질에 따라서 유효우물반경의 계열화가 이루어지고 이에 따라 회귀식의 상수가 조금씩 다르게 나타난 것은 자연적인 현상이라고 판단된다. 여기서 R<sup>2</sup>는 회귀분석의 결정계수(coefficient of determination)로서 독립변수가 종속변수 변동에서 차지하는 비율을 의미한다. 피압지하수의 경우 결정계수가 자유면지하수 또는 누수지하수의 경우에 비하여 다소 떨어지나 통계적으로 신뢰도 있는 수준이라고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

회귀분석에 사용된 모든 우물에 대하여 스킨계수 공식에 의거 스킨계수( $\sigma$ )와  $e^{-\sigma}$  값을 구하고 통계공식에 의한  $r_e/r_w$  값과 비교하였다.  $e^{-\sigma}$ 는 이론적인  $r_e/r_w$ 이며, 이 두 관계를 상관분석하면 Fig. 3과 같이  $e^{-\sigma}$ 가  $r_e/r_w$ 에 대하여 직선적인 관계를 보여주고 있다. 이론식에 근거한 유효우물반경과 실측에 근거한 유효우물반경이 그 출발점은 다르지만 두 방법이 매우 접근되는 결과를 나타내고 있으므로 유효우물반경 산정에서 통계적 경험공식을 적용하여도 스킨계수 방법을 적용할 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있음이 입증되었다.

한편 경험공식에서는 미지수가 S 한개 뿐이며 양수정에서 구한 저류계수를 바로 사용할 수 있으므로 단공시험에서 유효우물반경 산정에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 조사대상 대수층이 자유면, 누수 또는 피

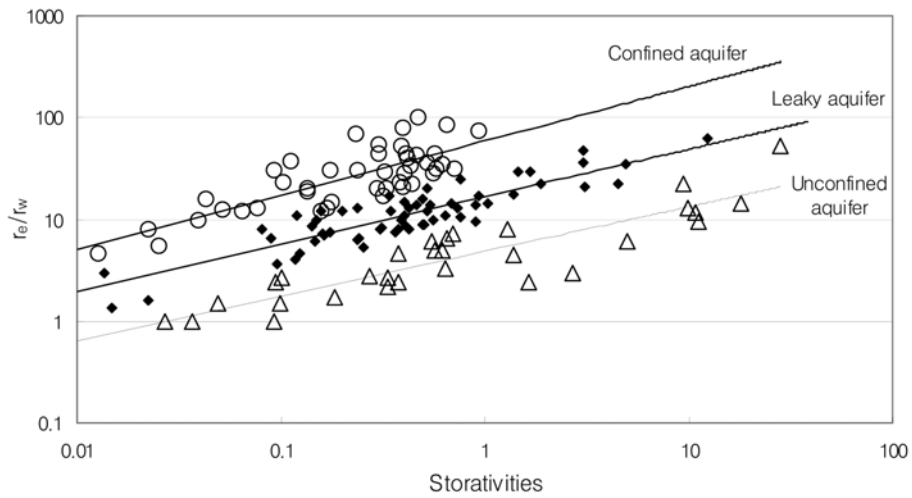


Fig. 2. Correlation between the storativity values from pumping-well data and the ratio of effective wellbore radius with actual wellbore radius.

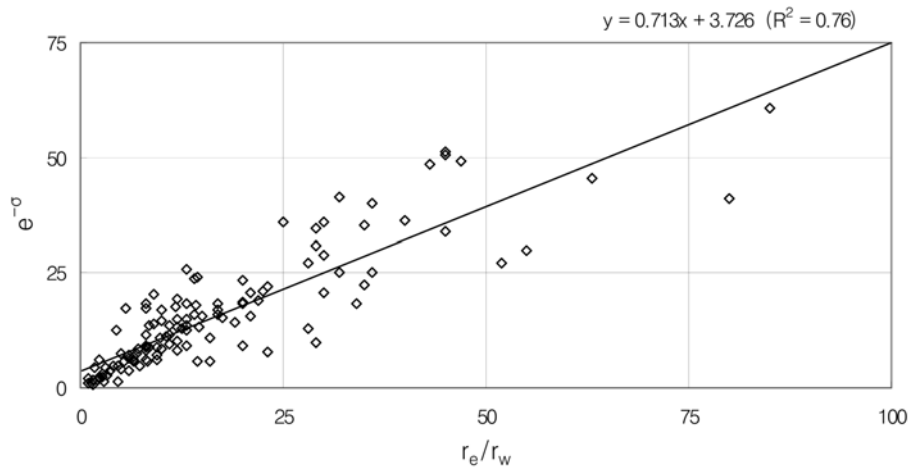


Fig. 3. Correlation between the ratio of effective wellbore radius with actual wellbore radius( $r_e/r_w$ ) and the corresponded value calculated from skin factor ( $e^{-\sigma}$ ).

압대수층 중 어느 쪽에 상당하는지는 조사공의 지질주상도와 양수시험의 수위강하 곡선 형태 등을 종합 검토하여 결정할 수 있다.

지하수영향조사에서 실제보다 큰 저류계수를 적용하여 영향반경을 산정할 경우 영향반경은 실제보다 협소하게 계산되므로 인근 우물과의 영향 분석에 중요한 오류를 가져온다. 그러므로 단공시험을 시행하였을 경우 반드시 유효우물반경을 적용한 저류계수를 산정하여야 하며, 만약 적정 유효우물반경 산정이 불확실하다면 수리지질 구조에 의한 지하수 부존 형태에 따라 저류계수를 추정하여 사용하는 수밖에 없다. Driscoll(1979)은 “피압대수층에 대하여 저류계수를 0.0005, 자유면대수층에서 저류계수를 0.1로 추정하는 것은 비록 실제의 값을 알았을 때보다는 덜 정

확하지만 대부분의 경우에서 실제에 접근하는 결과를 가져온다”고 제안하였다.

### 사 사

본 연구에 필요한 자료 수집에 협조해주신 관계기관 제현과 본고의 심사에 수고하신 심사위원님들께 감사를 드립니다.

### 참고문헌

건설교통부, 한국수자원공사, 2000, 영덕지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 현대엔지니어링(주), 2001, 영천지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 도화지질(주), 진보지질(주), 1999, 울진지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국지질자원연구원, 2001, 전주완주지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한서지질(주), 1997, 목포무안지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 2003, 천안지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 광업진흥공사, 2003, 고흥지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 광업진흥공사, 2003, 밀양지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 2003, 포항지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 2004, 대구지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 2004, 울산지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 2004, 칠곡지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 한국자원연구소, 2004, 대전지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 한국자원연구소, 2005, 김제지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 한국자원연구소, 2005, 홍성지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 2005, 광주지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 광업진흥공사, 2005, 마산진해지역 지하수기초조사보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 2002, 지하수관측망설치 조사보고서.

동서엔지니어링(주), 1996, 옥천계르마 먹는샘물환경영향조사서.

지암엔지니어링(주), 1996, 찬마루 먹는샘물 환경영향조사서.

지암엔지니어링(주), 1998, 용문음료 먹는샘물 환경영향조사서.

삼림건설턴트(주), 1996, 진로식품 먹는샘물 환경영향조사서.

농어촌진흥공사, 1998, 영주시 온천자원 평가보고서.

농어촌진흥공사, 1998, 지하수영향조사실무지침, 93-109.

최병수, 1998, 단공양수시험에 의한 대수층조사 방법. 농어촌진흥공사 농공기술지, **60**, 101-110.

Brons F. and Miller W.C., 1961, A simple method for correcting spot pressure readings, *Petroleum Technology*, **13**(8), 803-805.

Driscoll, F.G., 1979, *Ground Water and Wells*, Johnson Division, 257-260.

Earlougher, R.C., 1977, *Advances in well test analysis*, SPE Monograph Series, 264.

Hawkins, M.F., 1956, A note on the skin effect, *Transactions of the American Institute of Mechanical Engineers*, **v207**, p356-357.

Kaehler, C.A. and Hsieh, P.A., 1993, Hydraulic properties of a fractured aquifer, Lee Valley, San Diego County, California, U.S. *Geological water supply paper* **2394**, 31-32.

McConnell, C.L., 1993, Double porosity well testing in the fractured carbonate rocks of the Ozarks, *Ground Water*, **31**(1), 75-83.

Novakowski, K.S., 1986, Analysis of aquifer tests conducted in fractured rock, *Ground Water*, **28**(1), 99-107.

Roscoe Moss Company, 1990, *Handbook of ground water development*, *John Willey & Sons*, 308-310.