

제주도 지하수의 우물 비양수량자료를 이용한 대수층상수 결정방법

Determination of Aquifer Characteristics from Specific Capacity Data of Wells in Cheju Island

최병수(Byong-Soo Choi)

요 약 : 일반적으로 비양수량은 쉽게 구해지지만 투수량계수를 구하려면 정규 양수시험을 시행하는데 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 비양수량 자료로부터 투수량계수를 추정하는 방법이 이용되기도 한다. 대개 Theis(1963), Brown(1963), Logan(1964) 등이 유도한 해석적 방법이 이용되는데 이 방법들은 충적 대수층에서 영향반경 또는 저류계수등을 가정하여 대입하므로서 비양수량으로부터 투수량계수를 예측하는 것이 통상적이다. 그러나 암반 대수층이나 비균질 대수층에서 이렇게 구한 투수량계수는 실측된 투수량계수와 잘 맞지 않는다. Razack-Huntley(1991), Huntley-Steffey(1992), Mace(1997) 등은 비균질 충적대수층, 균열암반대수층, 용해성 석회암대수층 등에서 비양수량과 투수량계수의 관계식을 제시하였다. 본 연구에서는 제주도의 화산암 대수층에서 투수량계수와 비양수량 자료를 비교 분석한 바, 투수량계수의 대수값과 비양수량의 대수값 사이에 선형적인 관계가 성립(상관계수 0.951)하는 것을 확인 하였다. 또한 투수량계수의 ± 0.25 log cycle 범위내에 대부분의 자료가 포함되고 있다(96.6%).

Abstract : Transmissivity is often estimated from specific capacity data because of the expense of conducting standard aquifer tests to obtain transmissivity and the relative availability of specific capacity data. Most often, analytic expression relating specific capacity to transmissivity derived by Theis (1963), Brown (1963), and Logan (1964) are used in this analysis. The analytic solution typically used to predict transmissivity from specific capacity in alluvial aquifers assuming influence radius and/or storage coefficient of the aquifers. But those do not agree well with the measured transmissivity in fractured rock aquifers and in heterogeneous aquifers. Razack-Huntley (1991), Huntley-Steffey (1992), and Mace (1997) proposed empirical relations between specific capacity and transmissivity in heterogeneous alluvial aquifers, fractured rock aquifers, and karst aquifers. This study focuses on comparison between transmissivity and specific capacity data in volcanic rock aquifers of Jeju Island. Empirical relation between the log of transmissivity and the log of specific capacity suggests they are linearly related (correlation coefficient 0.951) and the width of ± 0.25 log cycles in transmissivity includes 96.6% of data.

서 언

제주도의 대수층은 투수성이 양호하고 저류량이 풍부하여 우물 양수시 수위강하량이 작고 비양수량(Specific capacity)은 비교적 크게 나타나는 특징이 있다. 특히 기저지하수 부존지역에서는 1000 m³/day 이상을 양수하여도 수위강하량은 1 m 이내에서 10분 안에 안정수위에 도달하여 평형상태가 유지되는 경우가 대부분이다.

이러한 특징 때문에 우물 양수시험에서 시간 경과에 따른 비평형상태의 수위강하량을 측정하기가 어렵고 비양수량은 구할 수 있으나 대수층 수리상수인 투수량계수와 저류계수는 잘 구해지지 않는 수가 많다. 이러한 경우에 비양수량자료를 이용하여 투수량계수를 평가하는 방법이 매우 유용하다.

비양수량에서 투수량계수를 구하는 방법으로 Theis(1963), Brown(1963), Logan(1964) 등의 해석적 방법을 이용할 수 있

으나 이 방법은 양수 영향반경 또는 대수층 저류계수를 가정하여 대입하여야 하므로 근거 있는 자료가 있을 때 사용이 가능하다. 또한 균질 대수층인 충적층에서 효과적이고 암반 균열대수층이나 비균질 대수층에서는 잘 맞지 않는 것으로 알려져 있다.

Razack-Huntley(1991)는 Morocco의 광활한 비균질 충적층에서, Huntley-Steffey (1992)는 San Diego의 결정질암 균열대수층에서, Mace(1997)는 Texas의 용해성 석회암 대수층에서 각각 많은 우물의 비양수량과 투수량계수 자료를 수집하고 통계적으로 회귀분석을 시행하여 해당지역에서 비양수량-투수량계수 관계식을 제시하였다.

본 연구에서는 이들 경험공식의 유도과 같은 방법으로 제주도 화산암 대수층에서 최근 3개년간 개발된 우물의 양수시험 자료를 분석하여 대수층 수리상수를 구하고 각 우물별 비양수량과 투수량계수를 비교 분석하므로서 제주도 지하수에 적합한 비양수량-투수량계수 관계 경험공식을 제시 하였다.

* 군산대학교(Kusan National University, Kusan 573-360, Korea)
** 전북대학교(Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea)

제주도의 지하수 산출특성

제주도의 지질은 현무암류, 안산암류, 조면암류 등의 화산암

류와 화성기원의 퇴적암류로 구성되어 있는데 이중 현무암이 대부분으로 전도의 90% 이상을 차지한다. 농어촌진흥공사에서 개발한 다수 우물의 주상도를 검토해 보면 현무암은 두께가 2~3 m에서부터 수십m에 이르는 암층으로 구성되어 있고 각 암층 사이에 화산쇄설층이 협재되어 있다. 화산쇄설층의 두께는 대부분 1~5 m 정도이나 때로는 20 m 이상 되는 것도 있다. 현무암 내에는 균열과 수직 절리가 발달하고 있어 강우의 수직 유동을 쉽게 하고 있으며 화산쇄설층은 제주도 지하수의 주 대수층 역할을 한다.

이러한 지질 구조는 지표에서부터 지하 심층부까지 연결되고 있어 강우의 40% 이상을 지하로 함양시켜(수자원공사, 1993) 해안지역의 기저지하수체를 형성하고 있다. 해안지역에서는 담수와 해수의 비증차에 의해 정수역학적인 균형을 이루어 담수체가 해수위에 렌즈상으로 떠있는 형태의 Ghyben-Herzberg 원리가 적용되는데 담수체의 두께는 해수면 상부 두께의 40배까지 부존되어 있는 것으로 계산된다.

근래에 제주도 동부, 북부 및 서부지역에서 시행된 심부 시추조사에서 제주도 전역에 걸쳐 저투수성 미고결 퇴적층이 확인되었으며 평균 분포심도는 EL-120±68 m 정도이었다. 따라서 담수체의 하부면이 저투수층에 접해있고 해수와는 직접적으로 접촉하지 않는 담수체를 가정할 수 있는데 이를 준기저지하수(Parabasal groundwater)라 부르며 이 지역에서는 Ghyben-Herzberg(GH)원리가 적용되지 않는다(한정상등, 1994).

제주도는 수회에 걸친 화산활동으로 형성된 화산도이기 때문에 지역적으로 지질분포의 차이가 많고 대수층의 분포가 불규칙적이어서 지하수포장량 산출에 있어 이상적인 렌즈형 담수체를 적용하기는 어렵다(한규언등, 1977). 그러나 해안지역 저지대에서는 대체적으로 GH의 지하수 부존원리가 지배한다고 간주되고 있다(농진공 지하수 개발보고서, 1996-1998).

GH원리가 적용되는 기저지하수의 산출특성은 자유면지하수(Unconfined aquifer)로 볼 수 있으나 GH원리를 적용받지 않는 준기저지하수 또는 상위지하수를 자유면지하수로 취급하는데는 이의가 있을 수 있다. 대수층 상부의 저투수성 퇴적층 분포에 따라서 국부적으로 피압 또는 누수대수층이 존재할 수 있기 때문이다. 그러나 저지대의 준기저지하수 또는 상위지하수에서는 대수층상부의 투수성 구조가 기저지하수체에서와 같은 조건이므로 자유면지하수로 볼 수 있다.

자료 범위

본 연구에서는 제주도 대수층의 수리상수 산정에 있어 경험적인 산정모델을 개발하기 위하여 신뢰할 수 있는 양수시험 자료를 수집 분석하였으며 그 결과를 통계적으로 처리하였다. 제주도에 1998년 12월까지 이용 허가된 지하수 관정 중 사용하고 있는 관정은 총 3,952개소로 조사되었는데 이 중 양수시험자료가 보존되어 있는 관정은 농어촌진흥공사에서 개발한 공공관정 627개소이었다. 양수시험 자료는 양수시작부터 종료까지 경과시간과 수위강하를 관측 기록한 양수시험일보를 말하는데 양수시험 초기의 시간간격이 매우 중요하다. 그러므로 양수초기의 수위강하를 1분 단위로 측정된 '96~'98년 기간의 3개년 자료 281공을 분석대상으로 하였으며 그 위치 분포는

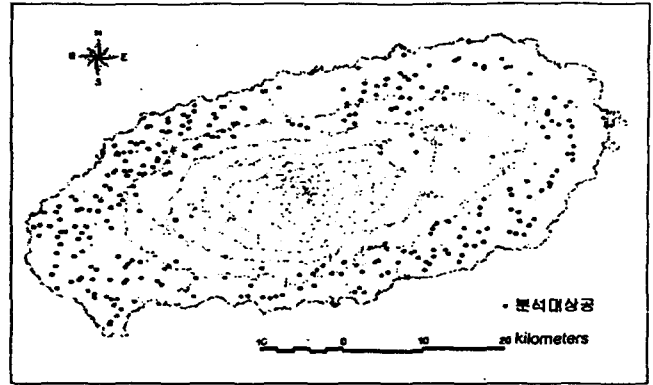


Figure 1. Study area and the distribution of study well sites.

Figure 1과 같다.

해석방법

균질 등방성 대수층에서 우물저장이 무시될 정도의 작은 구경으로 완전관통한 우물에 대하여 Theis의 비평형공식을 무차원 시간계수 u 와 우물함수 $W(u)$ 로 나타내면

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \tag{1}$$

$$W(u) = \frac{4\pi T}{Q} s(r, t) \tag{2}$$

여기서 $s(r, t)$ 는 우물에서 거리 r 인 관측공에서 시간 t 의 수위강하량이고, Q 는 양수량, T 는 투수량계수, S 는 저류계수이다. 식 (2)는 u 값이 작은 범위($u < 0.05$)에서 다음과 같이 Cooper-Jacob 공식으로 표시할 수 있다.

$$s(r, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \tag{3}$$

이 식에서 수위강하량과 경과시간의 관계는 반대수지에서 직선으로 나타나므로 다음과 같이 투수량계수와 저류계수를 구할 수 있다.

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s} \tag{4}$$

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \tag{5}$$

여기서 Δs 는 직선의 기울기(1 log cycle의 수위강하량)이고 t_0 는 $s=0$ 일 때의 절편이다.

양수시험 자료 해석에는 이들 비평형공식이 적용되며, 이것은 평형상태에 이르기 전의 구간에 해당하는 것이므로 평형 도달 이후의 자료는 무시하여야 한다. 본 연구 분석대상공 대부분의 양수시험자료에서 수위강하 기간이 양수초기 10분 내외이었으며 시간-수위강하량곡선에서 비평형상태 해석구간이 매우 작게 나타났다. 이러한 경우 Cooper-Jacob의 반대수법은 직선해석으로 수위강하 추세를 파악하는데 유리하다. 또한 이 방법으로 얻은 값은 우물개발이 덜된 구간에서 낮은 수리전도도에

의한 우물손실(low-K skin)의 영향을 받지 않는다(Butler, 1998). 직선해석 적용가능 범위를 검토하기 위하여 (1)식에서 우물반경 $r_w = 0.14$ m, 투수량계수 $T = 30$ m²/day, 저류계수 $S = 0.2$ 로 가정하고, $u = 0.05$ 를 대입할 때 $t = 0.94$ 분으로 계산되므로 이 경우 1분 이후의 자료는 직선해석이 가능하다고 볼 수 있다. 일부 우물에서는 $T < 30$ m²/day인 경우도 있으나 이 때에는 일반적으로 수위강하시간이 길어지므로 3~5분 이후의 자료에 맞추어 해석할 수 있다.

제주도의 지하수는 자유면지하수로 볼 수 있는데 자유면지하수에서 비평형공식을 적용하려면 다음과 같이 수위강하량을 보정하여야 한다.

$$s = s_w - \frac{s_w^2}{2H} \quad (6)$$

여기서 H는 대수층두께, s_w 는 우물 수위강하량이며 s는 보정된 수위강하량이다.

제주도의 경우 기저지하수체의 두께는 Ghyben-Herzberg의 담수렌즈 두께로 추정되고 준기저지하수 지역에서는 기저지하수체와 접촉부분의 대수층 두께를 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 검토하기 위하여 표고별 지하수위 자료를 분석하였다. Figure 2는 대상우물의 지하수위 해발 높이(h_0)와 지표 표고(G_L)의 관계를 작도한 것인데 지하수위와 표고의 관계는 지역별 대수층의 불균질성과 하부 저투수성 지층의 분포심도에 따라서 다양하므로 일정한 관계를 유도하기 어려우나, 기저지하수에 해당하는 지하수면 수위의 높기와 지표 표고의 관계는 그림과 같이 개략 $h_0 = 0.04 G_L$ 의 직선에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

이러한 표고와 기저지하수위의 관계를 고려하면 해수면 상부 지하수위 높이의 약 40배를 담수체 렌즈 두께로 추정할 수 있다. 그러나 계절별 지하수위 변동에 따른 염수침입 점이대의 두께를 고려하기 위하여 농어촌진흥공사에서 시행한 지하수 장기관측망조사 자료를 분석한 결과 Table 1과 같이 연간 지하수위 변동율이 약 60%로 나타났다. 그러므로 평균 수두에서 변동율의 1/2인 30%를 감하여 최저수위로 하고 이때의 대수

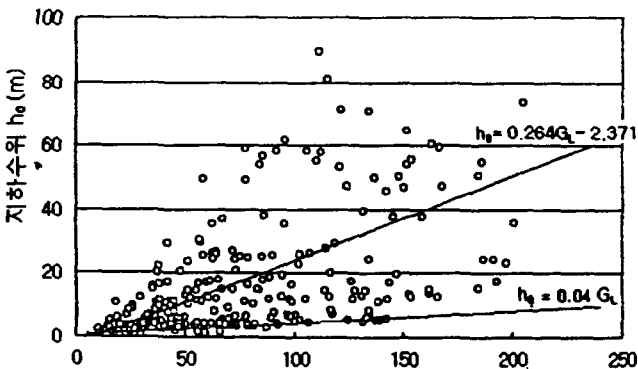


Figure 2. Relation between the ground level and water table in the study wells. The upper line shows the linear average relationship of the total wells and the lower line represents that of the basal groundwater only.

Table 1. Annual fluctuation of water table in Jeju Island

Area	No. of monitoring wells	Ave. water table (m) A	Annual watertable fluctuation (m) B	B/A(%)
East	19	1.09	0.89	81.6
West	9	5.00	2.49	50.0
North	8	10.42	6.10	58.5
South	8	31.38	5.43	17.3
Ave.	(44)			59.3
19				

Source: 농어촌진흥공사, 장기관측망조사보고서(1997).

층 두께를 계산하면 $h_0 = 0.04 G_L$ 의 40배 두께에서 70% 정도를 대수층두께로 간주할 때 대략적으로 지표면 표고 값에 접근되므로($H = 1.12G_L$) 여유율을 감안하여 우물위치의 표고값을 그 지점의 대수층 두께로 계산하였다. 다만 해안지대의 수위분포는 직선형이 아니라 포물선형이 될 것이므로 표고 50 m 이하 지역에서는 $H = 50$ m를 일괄 적용하고, 표고 200 m 이상 지역에서는 하부 저투수성 지층의 심도를 고려하여 $H = 200$ m를 일괄 적용하였다.

수위강하자료는 양수 우물자체의 수위이므로 우물 중심으로 부터 관측공까지 거리는 우물반경을 적용하였는 바, 착정구경이 우물 호칭구경보다는 다소 크므로 $\Phi 8$ 우물에서는 $r_w = 0.11$ m, $\Phi 10$ 우물에서는 $r_w = 0.14$ m를 적용하였다.

자유면대수층에서 저류계수는 대수층의 비산출율(Specific yield)과 같이 볼 수 있다. Todd(1980)는 대표적인 대수층 매질의 입도별 비산출율을 3%(점토)에서부터 28%(중립질 모래)까지의 범위로 제시하였는데 이를 참고로 하면 제주도 대수층의 저류계수를 0.01~0.3의 범위로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다.

양수시험 중 양수량의 변동이 있으면 수위강하에 영향을 준다. Bursoy-Summers(1980)는 양수중 양수량 변동을 단계양수 시험의 방법으로 해석하여 수위강하량과 시간을 조정하는 공식을 제시하였다. 또한 제주도의 지하수 우물은 대부분 부분관통 우물(Partial penetrated well)인 바, 부분관통 우물은 완전관통 우물에 비하여 수위강하가 더 크게 나타날 것으로 예상되는데 Hantush(1964)는 부분관통 우물의 수위강하량 보정공식을 제안하였다. 그러나 각 우물의 수위강하 자료마다 필산으로 이러한 보정을 시행하는 것은 거의 불가능한 일이다.

본 연구에서 시간-수위강하량 자료 해석은 Glenn G. Duffield가 개발한 AQTESOLV (Window ver.1.17)프로그램을 이용하였는데 이 프로그램의 자유면지하수(Unconfined)에서 Cooper-Jacob 방법을 채택하여 대수층 두께, 양수량 변동내역, 우물설치 심도 등을 입력하여 해석한 결과 대수층 두께에 따른 수위강하량 보정과 양수시험 중 양수량 변동에 따른 시간 조정(Adjusted time)이 자동으로 수행되었으며, 우물의 부분관통에 따른 수위강하량 조정도 이루어졌다.

해석 결과

관측공 없이 단공 양수시험의 수위강하량 자료를 해석할 때 우물의 저장효과(Well storage effect)와 우물 손실효과(Well loss effect)가 문제가 된다. 우물 저장효과는 양수초기에 우물 저장

량을 포함하여 양수하므로서 대수층으로부터의 유입량이 양수량보다 적기 때문에 수위강하량은 작게 나타나고 저류계수는 실제보다 크게 산정되는 현상인데 이것은 대수층의 특성과는 관계가 없으므로 무시하여야 한다.

우물 손실은 실측된 수위강하량에서 대수층손실을 뺀 값을 말하는데 우물 손실이 발생하는 원인은 우물 주변의 수리전도도가 변동되었기 때문이다. 굴착작업시 공벽이 막히거나 대수층 공극이 매워져서 수리전도도가 당초보다 적어졌다면 우물 수위강하가 대수층 손실보다 더 크게 나타날 것이다.

제주도 지하수의 경우 대수층의 투수성이 양호하므로 우물 저장효과에 의한 영향이 무시할 수 있을 정도로 작거나 나타나더라도 양수 초기 수분 이내에 소멸되는 것이 보통이었다. 제주도에서 지하수 개발공법은 대구경 코아 회수식 굴착방법을 적용하고 있는데 이 공법은 굴착과정에서 대수층의 구조에 변형을 주지 않고 우물 주변의 대수층 수리전도도를 변화시키지 않는다. 그러므로 굴착에 의한 손실(Wellbore skin)은 무시

할 수 있을 것으로 보여지며, 나타나더라도 Cooper-Jacob의 직선해석법을 적용하면 투수량계수 산정은 우물손실의 영향을 받지 아니한다.

분석 대상우물의 양수시험 시간-수위강하자료를 반대수지에 작도하여 해석할 때 Figure 3과 같이 4가지 유형으로 구별할 수 있다. (a)는 양수초기 우물저장효과가 약하게 나타났으나 1분 후 소멸된 경우이고 (b)는 우물저장효과가 10분 후 사라지고 대수층의 특성을 나타내는 기울기로 연결된 경우이다. (c)는 우물 저장효과가 10분간 지속되다가 평형상태로 연결된 경우이며 우물 저장효과가 사라질 시점에서 안정수위에 도달되었기 때문에 대수층 손실을 나타내는 수위강하 부분이 감추어진 것이라고 해석된다. (d)는 양수초기에는 수위강하가 작게 일어나다가 10분 정도 경과시점에서 수위강하가 급하게 증가하는 특이한 형태를 보여주며 초기자료에서나 중간자료에서 모두 직선해석이 불가능한 경우이다. 이것은 지하수면과 같은 심도에서 특수 지질구조가 있음을 암시하는 것이라고 추측된다.

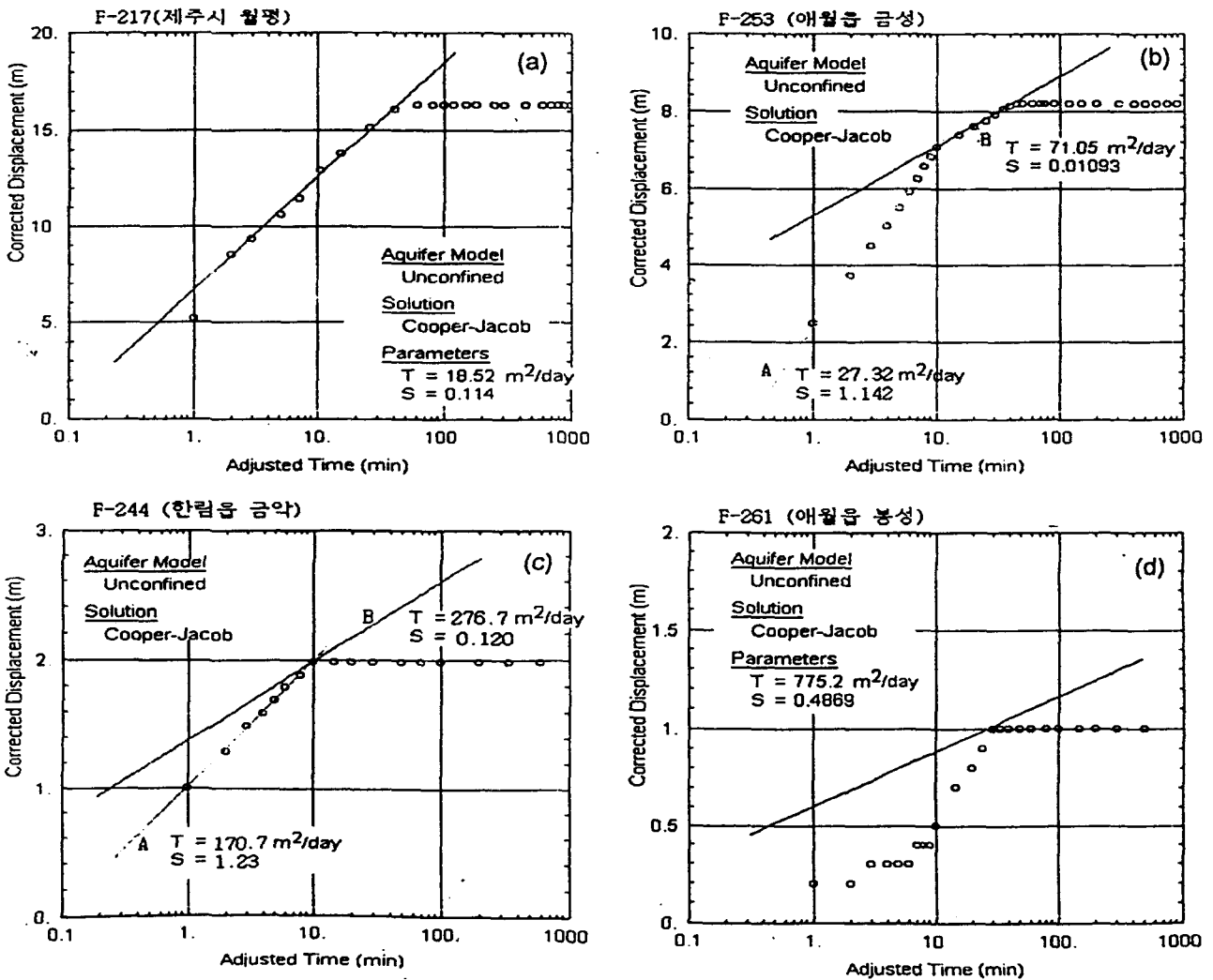


Figure 3. Samples of aquifer test analysis due to Cooper-Jacob method. (a) A case reflecting short and small well storage effect, (b) A case showing normal aquifer drawdown after 10 minutes of well storage effect, (c) A case showing equilibrium state after 10 minutes of well storage effect and (d) A case of abnormal drawdown.

양수시험자료 해석에서 저류계수가 $0.01 \leq S \leq 0.3$ 의 범위 안에 드는 것은 (a) 및 (b)의 경우인데 분석 대상우물 281공 중 73%인 206공이 이에 해당된다. (b)와 (c)에서 초기 수위강하자료(직선 A)는 S를 0.3보다 크게 주어져서 이는 우물 저장효과의 영향이라고 볼 수 있으므로 대수층의 특성을 나타내는 수리상수로 채택할 수 없다.

우물 저장효과가 있는 우물에서는 그 영향이 사라진 후의 자료를 해석해야 하는데 (b)의 제 2단계 접선(B)은 대수층 관련 상수를 보여주는 반면 (c)의 경우는 우물 저장효과가 끝나는 시점에서 바로 평형상태가 되었으므로 정상적인 방법으로는 해석할 수 없다. 이러한 경우 통계적인 접근으로 대수층 상수를 추정하는 방법을 검토하였다.

비양수량자료에 의한 투수량계수 추정방법

근래에 비양수량 자료와 이에 상응하는 투수량계수 자료를 통계적으로 처리하여 비양수량-투수량계수 관계 경험공식이 제안되었는 바 이를 열거하면 다음과 같다.

- Razack-Huntley(1991)-비균질 충적대수층(Heterogeneous alluvial aquifer)

$$T = 15.3 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{0.67} \quad (7)$$

- Huntley-Steffey(1992)-결정암질 균열암반대수층(Fractured-rock aquifers)

$$T = 0.12 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{1.08} \quad (8)$$

- Mace(1997)-용해성 석회질 암반대수층(Karst aquifer)

$$T = 0.76 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{1.08} \quad (9)$$

여기서 T : 투수량계수(m^2/day), Q : 양수량(m^3/day), s_w : 우물 수위강하량(m)이다.

<Figure-4>는 이 들 (7), (8), (9)식에 의한 비양수량-투수량계수 관계를 그래프로 나타낸 것인데 제주도의 비양수량-투수량계수 관계자료는 Huntley-Steffey선과 Mace선의 중간대에 분포하고 있어서 제주도 대수층의 투수성이 결정질 균열 암반대수층보다는 크고 용해성 석회질 암반대수층보다는 작은 범위임을 나타내고 있다.

제주도 지하수의 비양수량-투수량계수 관계공식을 유도하기 위하여 수리상수 분석 대상공 281개소 중에서 저류계수가 $0.01 \leq S \leq 0.3$ 의 범위 안에 드는 206공의 비양수량과 투수량계수 자료에 대해 $\log T$ 와 $\log(Q/s_w)$ 의 관계를 작도한 결과 Figure 5와 같이 선형관계가 성립하였으며 다음과 같은 회귀공식을 얻을 수 있었다.

$$\log T = 1.053 \cdot \log \left(\frac{Q}{s_w} \right) - 0.3483 \quad (10)$$

여기서 T는 투수량계수(m^2/day), Q는 양수량(m^3/day), s_w 는 우물 수위강하량(m)이다. 위 식을 지수식으로 바꾸어 쓰면 다

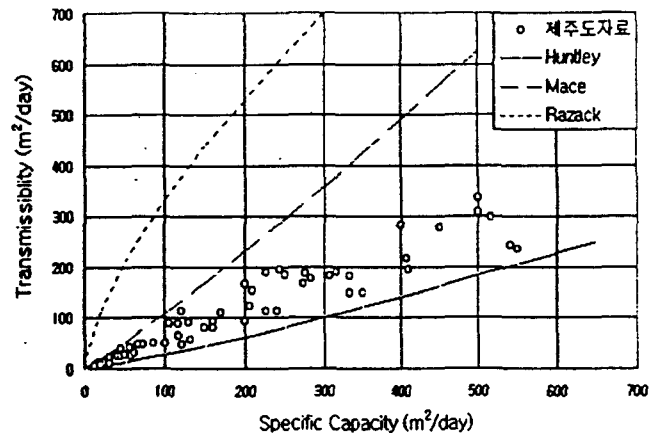


Figure 4. Relationship between the specific capacity and transmissibility of the equations (7), (8) and (9), and the related data in Jeju Island.

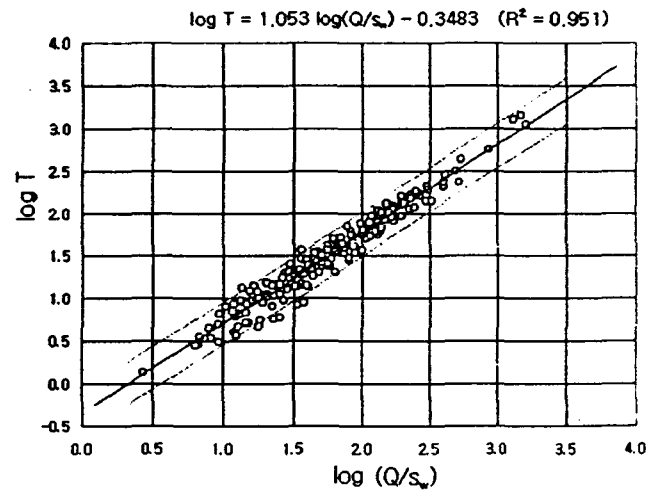


Figure 5. Relationship between transmissibility($\log T$) and specific capacity ($\log Q/s_w$) in Jeju Island.

음과 같다.

$$T = 0.448 \cdot \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{1.053} \quad (11)$$

Figure 5에서 회귀선 상하의 점선은 $\pm 0.25 \log$ cycle 오차범위를 나타내는데 자료의 96.6%(206공 중 199공)가 범위 안에 들고 있다.

이 회귀공식의 적용성을 검토하기 위하여 기왕의 비양수량-투수량계수 관계공식과 비교하면 Table 2와 같이 상관계수와 예측범위 면에서 훨씬 높은 신뢰도를 보여주고 있다. 오차범위 $\pm 0.25 \log$ cycle은 비양수량 자료를 이용하여 투수량계수를 구할 때 실수 오차가 $\pm 50\%$ 정도임을 의미하는데 이는 대수층 상수의 산정에서 사용 가능한 오차범위라고 볼 수 있다.

저류계수 산정방법

양수시험자료에서 대수층상수를 구할 수 없는 경우에 비양수량-투수량계수 경험공식인 (11)식을 이용하면 우물의 비양수

Table 2. Applicability of transmissivity equations based on specific capacity data

Equations (Authors)	Aquifers	Correlation coeff. (R ²)	Prediction interval	
			log cycle	data included(%)
Razack-Huntely	Hetrogenious alluvial aquifer	0.63	1.12	90
Huntely-Steffy	Fractured rock aquifer	0.89	1.1	90
Mace	Karst aquifer	0.89	1.4	95
This study	Volcanic rock aquifer	0.95	0.5	96.6

량으로부터 투수량계수를 산정할 수 있다. 이 때 투수량계수에 상응하는 저류계수는 Jacob의 수위강하량공식 (3)을 다음과 같이 고쳐 써서 비양수량 Q/s_w와 투수량계수 T를 대입하고 평형 도달시간 t와 우물반경 r_w를 적용하면 S를 계산할 수 있다.

$$S = \frac{2.25Tt}{r_w^2 \cdot \exp\left(\frac{4\pi T}{Q/s_w}\right)} \quad (12)$$

이 경우 AQTESOLV프로그램에서 S를 구할 수도 있는데 그 방법은 Cooper-Jacob 해석도에서 수위 평형이 시작되는 점을 기준으로 하고 계산된 투수량계수의 기울기가 나타나는 직선을 그리면 투수량계수에 상응하는 저류계수 값이 구해진다.

Figure 3(c)는 저류계수 산정방법을 보여준 예인데 분석대상공 281공 중 63개소에서 이와 같은 방법으로 S를 구할 수 있었다. 그러나 Figure 3(d)의 경우는 이 방법으로 저류계수를 구할 수 없는 특이한 경우로서 분석대상공 중 12공이 이에 해당된다.

분석대상공 281공에 대한 대수층 상수 해석결과를 요약하면 Table 3과 같으며 평균비양수량은 306 m²/day, 평균투수량계수는 202 m²/day, 그리고 평균저류계수는 0.12로 산정되었다.

검토 및 토의

가) Jacob 방법 적용의 타당성 검증

Jacob 방법의 적용조건으로 u<0.05의 범위를 제시하고 있으나 이것은 필요조건이지 충분조건은 못된다. 이 조건을 수학적으로 해석하면 시간 t가 상당히 크던가, 또는 거리 r가 아주 작은 경우이다. 단공시험의 경우 r가 작으므로 u값은 아주 작게 계산되나 우물 주위의 수두 경사가 급하여 난류가 발생할 가능성이 있다. Theis의 비평형식은 층류(laminar flow)를 가정하고 유도된 것이므로 난류에 대해서는 적용할 수 없다.

Sen(1988)은 Jacob 방법의 적용 타당성을 검증하기 위하여 시간-수위강하량 실측자료에 의한 u값과 우물함수 W(u)값의

Table 3. Average value of aquifer characteristics in Jeju Island

	Specific capacity (m ² /day)	Transmissivity (m ² /day)	Storativity
Maximum	13,130	9,556	0.30
Minimum	2.7	1.4	0.01
Average	306	202	0.12

관계가 반대수지에서 기울기 2.3인 직선이 되어야 한다고 하였다. 그 검증 절차는 ① 일반적인 Jacob법으로 대수층상수 T와 S를 구한 다음, ② 이 값을 식 (1), (2)의 u, W(u) 공식에 대입하여 현장자료의 무차원 시간계수 u_f와 무차원 수위강하량 W_f를 계산한다. 즉,

$$u_f = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (13)$$

$$W_f = \frac{4\pi T s_w}{Q} \quad (14)$$

③ 반대수지에 u_f를 log축으로 하여 W_f~u_f 관계를 plot했을 때 직선의 기울기 ΔW_f(1 log cycle의 W_f)가 2.3이면 Jacob 해석이 타당하다. ΔW_f>2.3일 때는 우물 주변의 난류 가능성을 시사하며 Jacob 해석은 실제보다 T는 작고 S를 크게 주어진다고. ΔW_f<2.3일 때는 누수 또는 함양 가능성을 시사하며 Jacob 해석은 실제보다 T는 크고 S는 작게 주어진다고.

다음 Table 4는 F253공(Figure 3 참조)의 양수시험자료를 무차원시간과 무차원수위강하량으로 변환한 것이며 여기서 T와 S는 Figure 3(b)에서 구해진 71.05 m²/day와 0.011을 적용하였다. Figure 6은 이를 반대수지에 작도한 것으로 여기서 직선은 Jacob법 적용 구간에서 Theis의 W(u)-u관계를 나타내며 이의 기울기는 2.3이다. 현장자료는 중간부분의 기울기가 Jacob직선과 같게 나타나 이 부분에서의 Jacob 해석이 타당함을 보여준다.

본 연구의 분석대상공 중 일부에 대해서 Sen의 검증방법에 의하여 W_f~u_f의 기울기를 검토한 바 기울기가 2.3에서 크게

Table 4. Pumping test data and its dimensionless transform for the well F253

Time t(min)	Drawdown s _w (m)	Q(m ³ /day)	Dimensionless	
			u _f	W _f
1	2.5	725	6.74×10 ⁻⁴	3.08
2	4.0	"	3.37	4.92
3	4.9	"	2.25	6.03
4	5.5	720	1.69	6.82
5	6.0	"	1.35	7.44
6	6.5	"	1.12	8.06
7	6.9	"	9.63×10 ⁻⁵	8.55
8	7.3	"	8.43	9.05
9	7.6	"	7.49	9.42
10	7.9	715	6.74	9.86
15	8.2	"	4.49	10.31
20	8.4	"	3.37	10.56
25	8.6	"	2.69	10.81
30	8.8	705	2.25	11.14
35	8.9	"	1.93	11.27
40	9.0	700	1.69	11.45
50	9.0	"	1.35	11.47
60	9.0	"	1.12	11.47
80	9.0	"	8.45×10 ⁻⁶	11.47
100	9.0	"	6.76	11.47
150	9.0	"	4.51	11.47
250	9.0	"	2.70	11.47
400	9.0	"	1.69	11.47
600	9.0	"	1.13	11.47

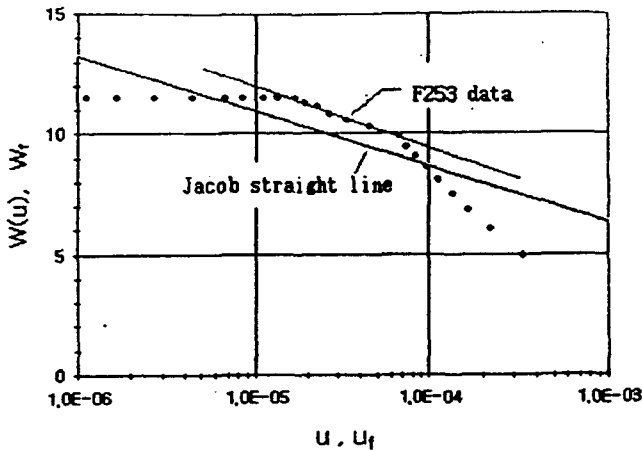


Figure 6. Dimensionless data for the well F253.

벗어나지 않고 있어 Jacob 직선해석 적용이 타당함을 보여 주었으며 이는 저류계수 범위를 $0.01 < S < 0.3$ 로 제한하여 해석한 것이 합리적임을 나타내는 것이라고 할 수 있다.

나) 영향반경에 대하여

Jacob의 수위강하량공식에서 수위강하량이 0 일 때의 거리 r 를 우물의 양수 영향반경 R 로 정의하면,

$$R = \sqrt{\frac{2.25Tt}{S}} \quad (15)$$

로 쓸 수 있다. Table 3에서 분석 대상 우물의 평균 T 와 S 는 각각 $202 \text{ m}^2/\text{day}$ 및 0.12 로 나타났는데 이를 이 식에 적용하여 영향반경을 산정해 보면, 안정수위 도달시간을 평균 30분(0.021 day)으로 가정할 때

$$R = \sqrt{\frac{2.25 \times 202 \times 0.021}{0.12}} = 8.92 \text{ (m)}$$

로 계산된다. 이것은 투수성이 좋은 대수층에서는 너무 작게 산정된 것이어서 다른 방법으로 검토가 요망된다.

농어촌진흥공사(1996)에서는 지하수함양 연구의 일환으로 남제주군 표선면의 천미천 하류부에 2개의 우물을 3.0 m 간격으로 설치하고 동시양수시험을 시행하였는데 이 때의 시험자료를 분석한 결과 영향반경을 구할 수 있었다. 관측공은 W-1공과 W-2공의 중간에 W-1공에서 1 m 거리에 위치하며, 대수층의 투수랑계수는 W-1공 양수시험에서 관측공의 수위강하자료를 해석하여 $T = 2,176 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 구해졌다. 동시 양수시험은 W-1공에서 양수량 $Q_1 = 1,660 \text{ m}^3/\text{day}$, W-2공에서 $Q_2 = 2,160 \text{ m}^3/\text{day}$, 계 $3,820 \text{ m}^3/\text{day}$ 를 양수하였으며 평형상태에서 관측공의 수위강하량은 $s = 0.63 \text{ m}$ 이었다.

Thiem의 평형식에 의한 관측공에서의 수위강하량은 중첩의 원리에 의하여

$$s = \frac{Q_1}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_1} + \frac{Q_2}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_2} \quad (16)$$

로 주어지는데 여기서 r_1 은 W-1공에서 관측공까지 거리이고, r_2 는 W-2공에서 관측공까지 거리이다. 한편 $r_2 = 2 \cdot r_1$ 및 Q_2

$= 1.3 \cdot Q_1$ 이므로 위 식은

$$s = \frac{Q_1}{2\pi T} \left[\ln \frac{R}{r_1} + \ln \left(\frac{R}{2r_1} \right)^{1.3} \right] = \frac{Q_1}{2\pi T} \ln \frac{R^{2.3}}{2.462(r_1)^{2.3}}$$

로 쓸 수 있고 수위강하량 $s = 0.63 \text{ m}$, $T = 2,176 \text{ m}^2/\text{day}$, $Q_1 = 1,660 \text{ m}^3/\text{day}$, $r_1 = 1 \text{ m}$ 를 대입하면 영향반경 R 는 10 m 로 구해진다. 이것은 식(15)에 의해 구한 영향반경이 가능한 값임을 보여주는 것이다. 대수층의 투수랑계수가 매우 큰데도 이렇게 영향반경이 작은 것은 짧은 시간 안에 수위강하가 평형상태로 되기 때문인데 이것은 투수성이 양호한 기저지하수체가 넓게 퍼져 있을 때 가능하다고 판단된다.

결 론

제주도 지하수의 비양수량과 대수층상수의 경험적인 관계식을 유도하기 위하여 많은 지하수개발 양수시험 자료를 해석하여 대수층상수를 구하고 이를 비양수량 자료와 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제주도의 대수층은 투수성이 양호하여 우물 양수시 수위강하량이 작고 빠른 시간 내에 평형상태가 되므로 양수시험자료를 해석할 때에는 양수초기의 비평형상태 구간에 대하여 Jacob 직선해석을 적용하는 것이 합리적이다.
- 2) 양수시험자료 해석의 신뢰도를 높이기 위하여 대수층두께에 따른 수위강하량 보정과 양수시험 중 양수량 변동에 따른 수위강하량 및 시간 조정이 필요하며, 또한 부분관통 우물에 대한 수위강하량 조정이 선행되어야 한다. AQTESOLV 등 전산 프로그램을 이용하면 수위강하량 보정과 조정시간 산정이 자동적으로 수행된다.
- 3) 자유면대수층의 저류계수는 비산출율과 같으므로 제주도 대수층의 저류계수를 $0.01 \leq S \leq 0.3$ 의 범위로 보는 것이 합리적이다.
- 4) 농어촌진흥공사에서 1996~1998년 기간 중 개발한 관정 281개소의 양수시험 자료를 해석한 결과 206개소(73%)에서 대수층상수를 구할 수 있었으며 이를 각 우물의 비양수량과 비교 분석한 결과 다음과 같은 경험공식을 유도할 수 있었다.

$$T = 0.448 \cdot \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{1.053}$$

5) 이 경험공식의 상관계수는 0.951 로서 신뢰도가 높으며 이를 이용하여 비양수량 자료로부터 투수랑계수를 구할 경우 오차의 범위는 $\pm 0.25 \text{ log cycle}$ 정도로서 이는 대수층상수 산정에 있어 사용가능한 범위이다.

6) 경험식에 의해 투수랑계수를 구한 경우 이에 상응하는 저류계수도 구할 수 있다.

본 연구에서 대상우물 281공을 분석한 제주도 대수층의 평균 투수랑계수는 $202 \text{ m}^2/\text{day}$ 이고 평균 저류계수는 0.12 이었다.

사 사

이 연구는 농업기반공사(제주지사)의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Brown, R.H., 1963, Estimating the transmissivity of an artesian aquifer from the specific capacity of well. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-I. p.336-338
- Bursoy, Y.K., W.K. Summers, 1980, Determination of aquifer parameters from step test and intermittent pumping data. Groundwater 18(3), p.137-146
- Butler, J.J, J.M.Healy. 1998, Relationship between pumping-test and slug-test parameters : Scale effect or artifact? Groundwater 36(2), p.305-313
- Duffield, G. M.,1995, AQTESOLV™(Aquifer Test Solver) Ver. 2.01, Geraghy & Miller, Inc.
- Huntley, D., Nommensen, R., Steffey, D., 1992. The use of Specific Capacity to assess Transmissivity in Fractured-rock Aquifer. Groundwater, 30(3), p.396-402.
- Logan, J., 1964. Estimating transmissibility from routine production tests of water wells, Groundwater, 21(5), p.584.
- Mace, R., 1997. Determination of Transmissivity from Specific Capacity Tests in a Karst Aquifer, Groundwater, 35(5), p.738-742.
- Razack, M., Huntley, D., 1991. Assessing Transmissibility from Specific Capacity in a Large and Heterogeneous Alluvial Aquifer, Groundwater, 29(6), p.856-861.
- Roscoe Moss Co., 1990, Hantush's correction for partial penetration, Handbook of ground water development, John Wiley & Sons, p.298-300
- Sen, Z., 1988, Dimensionless time-drawdown plots of late aquifer test data, Groundwater, 26(5), P.615-618.
- Theis, C.V., 1963, Estimating the transmissivity of a water table aquifer from the specific capacity of a well, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-I. p.332-336.
- Todd, D.K., 1980, Groundwater Hydrology, New York, John Wiley & Sons. p.38.
- 농어촌진흥공사, 1996, 1997, 1998. 제주도지하수개발보고서.
- 농어촌진흥공사, 1996, 제주지역 지하수 인공함양에 관한 연구보고서, p.99-113
- 농어촌진흥공사, 1997, 제주도 지하수 장기관측망 조사보고서, p.18-37.
- 수자원공사, 1993, 제주도 수자원 종합개발 계획수립 보고서. VII장
- 한규연, 이문원, 1977, 제주도의 지질과 지하수와의 관계 연구, 제주대학교 논문집 제9집
- 한정삼 등, 1994, 제주도지하수자원의 최적 개발가능량, 지하수환경학회지, 1(1), p.33-50