

순간수위변화 및 양수시험을 통한 수리상수 추정의 문제점 분석

Multiple Slug and Pumping Tests for Quality Enhancement of Hydraulic Parameter Estimates

이진용(Jin-Yong Lee)* · 이강근(Kang-Kun Lee)* · 정형재(Hyung-Jae Chung)**
배광옥(Gwang-Ok Bae)**

요 약 : 순간수위변화 및 양수 시험은 현장에서 대수층의 수리상수 추정을 위해 널리 사용되는 수리시험이다. 그런데 이런 수리시험을 수행하고 그 결과를 해석함에 있어서 다양한 오차 및 불확실성 요인이 있음에도 불구하고 이에 대한 심각한 고려가 많지 않았다. 본 연구에서는 양수 및 순간수위 변화시험을 다수의 동일 관정에서 반복 수행하고 그 결과를 다각적으로 검토함으로써 두 수리시험에 개입될 수 있는 오차 및 불확실성 요인을 분석하였다.

Abstract : Slug and pumping tests have been widely used to obtain hydraulic parameter estimates in the field. Although a variety of sources of error and uncertainty can be involved in the course of the test performance and data analysis, serious considerations on these sources are often neglected. In this study these various sources of error and uncertainty are analyzed or discussed using repeated slug and pumping test data and some guide lines are suggested to improve quality of parameter estimates from the slug and pumping tests.

서 론

순간수위변화(slug tests) 및 양수시험(pumping tests)은 현장에서 수리상수를 구하기 위해서 널리 수행되는 수리시험이다. 양수시험이든 보다 간편한 순간수위변화시험이든 현장시험 자체뿐만 아니라 데이터 해석에서도 상당한 경험과 지식이 요구된다. 부정확한 시험이나 획득 데이터의 잡음(noise)뿐만 아니라 시험기구(mechanism), 초기 스트레스의 크기, 해석모델의 선택, 잘못된 curve matching 등에 의해서도 추정 수리상수의 오차 혹은 불확실성이 발생한다. 최근 이런 요인들에 대한 정량적 분석을 통해 보다 신뢰성 있는 수리상수 추정을 위한 노력이 행해지고 있다(Butler *et al.*, 1996; Lee, 1998; Lee and Lee, 1999).

순간수위 변화시험은 단공에서 행해지는 매우 간편한 수리시험으로 일정량의 물을 순간적으로 공에 주입하거나 제거하여 시간에 따른 수위 회복양상을 관찰한다. 또는 일정부피의 물체(dummy)를 삽입 혹은 제거하기도 한다(Lee, 1998). 주입 시험(falling-head)이든 혹은 제거시험(rising-head)이든 동일관정에서의 수위 회복양상은 동일해야하며 또한 초기수위변화(initial displacement, H_0)에 대해서도 마찬가지이다. 그러나 많은 경우 현장자료를 살펴보면 시험기구(주입/제거)와 초기수위변화(H_0)에 따라 수위회복 양상이 다르게 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이러한 것들은 결국 구하고자 하는 수리상수에 영향을 미쳐 그

때마다 다른 값들이 추정되게 된다. 또한 같은 시험 자료를 가지고도 해석자에 따라 상당히 다른 결과값을 보이는 경우가 종종 있는데, 해석모델을 무엇으로 하느냐 또는 일관성 있는 curve matching을 하느냐에 상당히 의존한다.

양수시험은 소요장비면에서 순간수위변화시험보다 복잡하고 또한 시험시간도 길다. 하지만 순간수위변화시험에서 추정된 수리상수값은 시험정 바로 주변의 매질특성을 나타내는 반면 양수시험을 통한 결과는 보다 큰 규모의 수리적 특성을 반영한다는 장점이 있다. 그런데 이런 양수시험에도 몇 가지 가능한 오차 및 불확실성 요인이 있다. 예를 들어 해석하고자 하는 대수층에 대한 개념모델에 따라 해석모델이 달라지게 되는데, 그 결과 어떤 경우는 피압대수층에 적합한 해석모델을 가지고 자유면 대수층의 수리시험결과를 해석하는 실수를 범할 수 있다. 또한 비슷한 개념모델을 준용하는 해석모델이더라도 각 모델의 적용조건에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 또한 양수시험은 대수층에 주는 스트레스의 크기가 크므로 인접한 관측정에서는 난류(turbulence)에 의한 수두손실이 발생할 수 있다. 그래서 이를 고려하지 않는다면 실제보다 작은 투수계수값을 얻게 되는 경우가 있다. 본 연구에서는 대표적인 두 종류의 수리시험에 개입될 수 있는 다양한 오차요인을 분석하였다. 그 결과 이런 오차요인들은 추정 수리상수값과 상당히 규칙적인 관련양상을 보임을 알 수 있었다.

지질 및 수리지질

순간수위변화 및 양수시험이 수행된 시험지역은 강원도 원주시 부론면에 위치하고 있다(Figure 1a). 지형적으로 주로 낮

* 서울대학교 지구환경과학부(School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University)

** 농어촌진흥공사 농어촌연구원(Rural Research Institute, Rural Development Corporation)

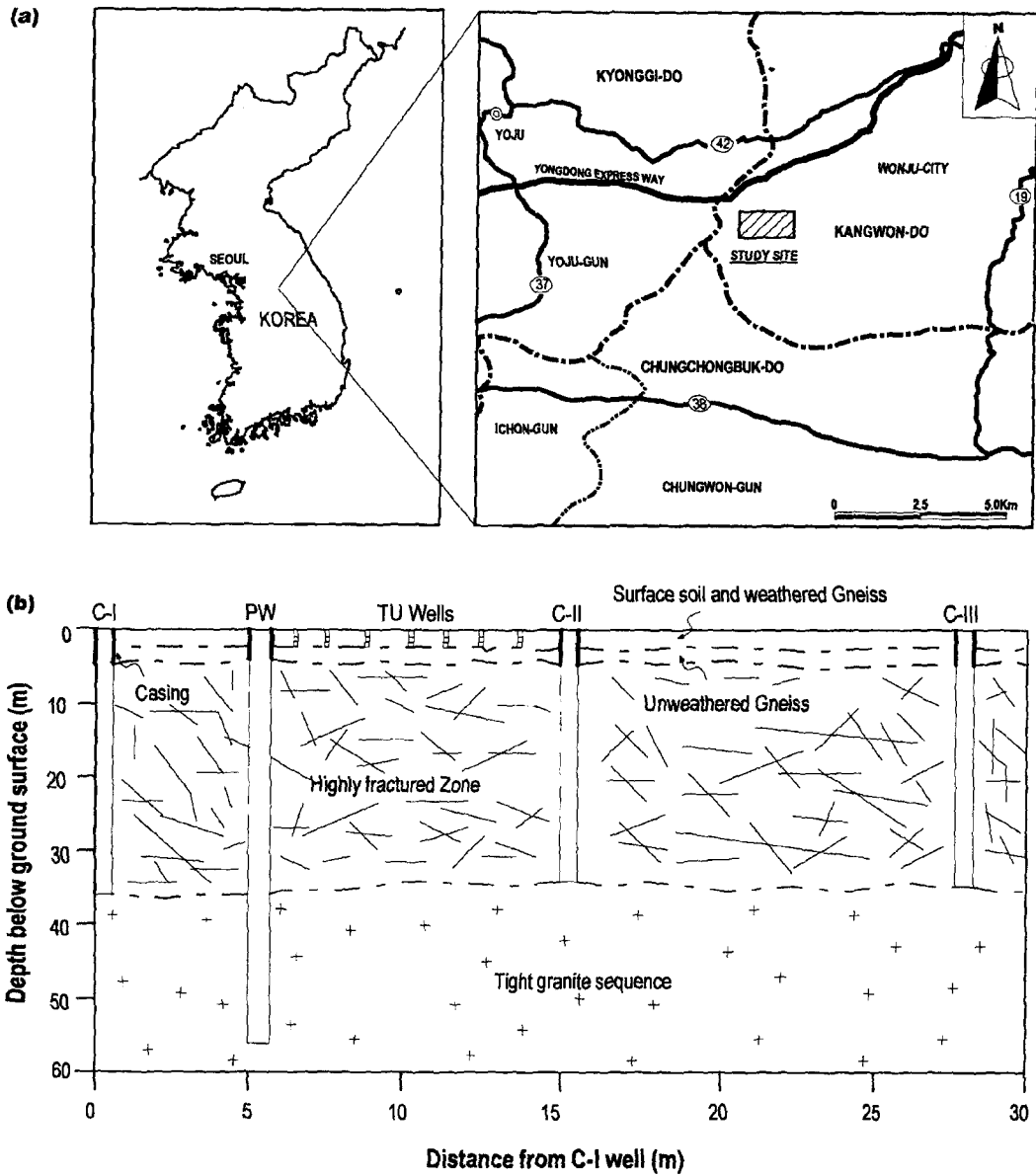


Figure 1. Location of the test site (a) and vertical location of the test wells (b).

은 산들과 언덕으로 구성되어 있다. 이 지역의 최고봉은 긴경산(352 m)이다. 조사지역에 존재하는 층서적 단위를 살펴보면 선캠브리아기의 편마암을 기저로 하고 이를 중생대 쥬라기에 관입한 심성암체, 백악기의 맥암 그리고 이들을 덮고 있는 신생대 충적층과 시험지역에 집중되어 있는 복토층으로 구성되어 있다(KIER, 1989). 선캠브리아기의 기저암은 흑운모 편마암, 호상편마암, 화강암질 편마암 그리고 편암으로 구성되어 있으며 이들은 단조로운 분포를 보이고 있다. 시험지역에 분포하는 흑운모편마암은 부분적으로 열리구조를 보인다. 이들을 쥬라기의 심성암체인 대보화강암이 관입했다. 기저암의 상부는 대부분 풍화를 받은 흑운모 편마암으로 구성되어 있다. 상부 흑운모 편마암의 풍화영향은 지표로부터 약 1.6미터까지 계속되며 그 하부 약 2.4미터 두께의 풍화를 받지 않은 부분에서는 균열(fracture)이 급격히 감소한다. 풍화를 받

은 상부 편마암은 2차적 투수성 특징을 보이고 수리적으로 제 4기 충적층 혹은 복토층과 연결되어 있다. 또한 풍화되지 않은 하부 편마암은 본 시험지역에서 실질적인 상부 피압층으로 작용한다. 복운모 화강암은 지표하 약 4미터 아래에 나타난다. 이 층에서는 다양한 방향의 많은 균열들이 발견되는데 지표하 약 35미터까지 연장된다. 이층 하부에서는 균열이 거의 발견되지 않는데 이는 하부 불투수층으로 작용한다. 지표면 물질로는 제4기 충적층이 우세하고 국부적으로 복토층이 존재한다.

시험지역의 면적은 약 450 m²이고, 원편에 개울이 있는데 이 개울은 여름을 제외하고는 건천상태이다. 지형경사는 0.05 정도이다. 이 시험지역에는 균열이 발달한 하부 대수층에 4개의 심정기, 상부 지하수면 대수층에 19개의 천공이 설치되어 있다(Figure 1b).

양수시험

현장 양수시험은 1997년 3월에서 1998년 4월에 걸쳐 총 11 회 실시하였다. 각 양수시험마다 양수정과 양수량을 바꾸어 반복 수행하였다. 양수는 수중펌프를 이용하였으며 관정 약 25 미터 일정 깊이에서 하였다. 양수량은 디지털 유속계(digital flowmeter)로 측정하였다. 시간에 따른 수두강하 측정은 압력 센서를 부착한 자동수위기록계를 이용하였다. 실제로 이 시험 지역은 가옥과는 상당한 거리가 떨어져 있어 이들의 음용수 채취를 위한 양수 영향은 없는 것으로 판단된다. 또한 균열암반(fractured rock) 대수층 양수시 있을 수 있는 상부 지하수면 대수층으로부터의 흐름(leakage)은 무시하였다. 왜냐하면 하부 대수층에서 양수시험을 진행하는 동안 상부 지하수면 대수층에 설치한 관정에서 인지할만한 수위강하가 일어나지 않았기 때문이다.

일반적으로 본 연구지역과 같이 균열암반 대수층에서 수행한 수리시험으로부터 얻은 데이터를 해석하려고 할 때 가장 중요한 것은 관심 대수층의 개념모델 설정일 것이다. 개념모델을 어떻게 설정하느냐에 따라 해석모델 혹은 방법이 달라지기 때문이다. 균열암반 대수층에 대한 개념적 모델로는 다공성 매질(혹은 EPM), 이중공극모델(dual porosity system), 혹은 분리균열망 모델(discrete fracture network)이 있다. 이들은 매질의 불균질성(heterogeneity)을 나타내는 방식에 있어 차이가 있다. 이중공극모델(dual porosity model) 이나 분리균열망(discrete fracture model)은 균열암반내 지하수 유동을 보다 물리적 현실에 가깝게 모의할 수 있다는 장점이 있는 반면 현장에서 정확히 측정하기 어려운 균열에 대한 다양한 정보를 입력변수로 한다는 단점이 있다. 그래서 많은 경우 균열암반내 지하수 유동에 대해서도 다공성 매질 접근법을 채택하고 있다(Berkowitz

et al., 1988). 물론 균열암반에 대한 다공성 매질 접근법은 여러 가지 전제조건을 만족시킬 때 만이 유효하다. 이러한 전제조건은 균열의 밀도, 방향, 관심규모, 연구목적에 주로 관계한다(Berkowitz *et al.*, 1988; Bibby, 1981; Gernand and Heidtman, 1997; Khaleel, 1989). 본 연구에서는 관정내 균열분포, 노두에서의 균열분포, 수리시험에서 얻은 수두강하양상에 기반하여 대상 균열암반대수층을 다공성 매질로 보았다. 이에 대한 자세한 내용은 Lee and Lee(1999)에서 찾을 수 있다.

해석 방법에 따른 영향

대상 균열암반 대수층에 대한 다공성매질 접근법에 기반하여 본 연구에서 선택한 양수시험 해석모델은 Theis(1935) type curve 방법과 Cooper-Jacob(1946) 법이다. 양수종료후 회복자료에 대해서는 Theis(1935) recovery 방법을 적용하였다. Theis (1935) type curve 방법은 대체로 초기 자료에 비중이 실리는 반면 Cooper-Jacob(1946) 법은 일반적인 적용조건(Sen, 1988a)에서 알 수 있는 바와 같이 후기 자료에 중심을 둔다. 그래서 실제로 두 방법을 이용한 추정수리상수가 대표히는 대수층 영역은 다를 수 있다(Young, 1998). 보다 신뢰성 있는 수리상수 추정을 위해서는 이 두 모델을 이용하여 실제 양수시험자료를 해석한 결과를 비교해 볼 필요가 있다. Figure 2a에서 대부분의 경우 Theis(1935) 방법보다 Cooper-Jacob(1946) 방법에 의한 추정 투수량계수(transmissivity)값이 크게 나옴을 알 수 있다. 이와 반대로 저유계수(storativity)는 Cooper-Jacob(1946) 방법에 의한 값이 작게 나온다(Figure 2b). 이러한 차이는 이 두 값의 비(T/S)에 해당하는 분산도(diffusivity)에서 명확히 드러난다(Figure 2c). 또한 양수단계자료(pumping period data)이나 혹은 회복단계자료(recovery period data)이냐에 따라라도 추정 투수량계수는 상당히 달라진다(Figure 2d). 일반적으로 회복단

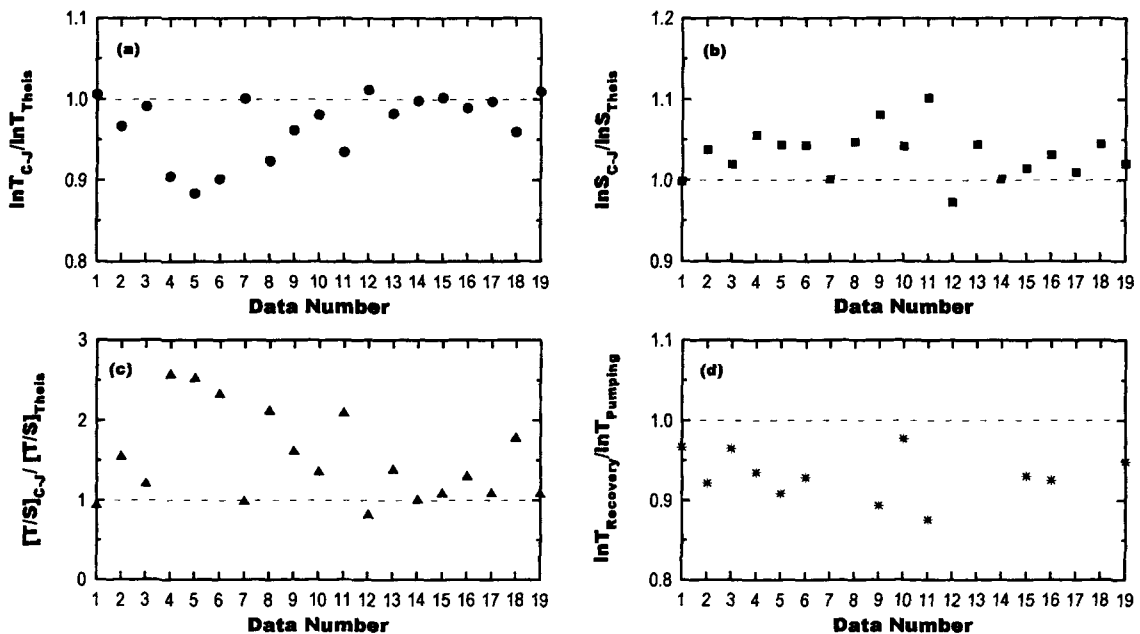


Figure 2. Comparison of the estimates of transmissivity (a), storativity (b), and diffusivity (c) using different analysis methods, and transmissivity estimates (d) from different test period data. T is in m^2/min

계자료에 의한 투수량계수의 추정값이 양수단계자료보다 크게 나오며 보다 신뢰성이 있다고 알려져 있다(Young, 1998). 수위 회복시험에는 난류(turbulence)에 의한 수두교란 가능성이 적다고 보기 때문이다.

이상의 결과로 볼 때 같은 양수시험자료를 해석하더라도 해석모델에 따라 추정수리상수에 차이가 나며 양수단계자료나 회복단계자료이냐에 따라서도 다르다. 이런 추정수리상수의 차이는 일반적인 양수시험자료의 잡음(noise)이나 불완전한 curve matching에서 오는 오차보다도 크다. 그러므로 해석모델을 선택할 때 또 어느 한쪽 단계의 자료만 있을 때 위의 분석결과에 유의해야 할 것이다.

난류(turbulent flow)에 의한 수두손실(head loss)

일반적으로 양수정을 제외한 관측정에서는 난류에 의한 수두손실을 고려하지 않는다. 양수정에서의 수두강하(drawdown)는 대수층 손실(aquifer loss)외에도 펌프입구주변에서 발생하는 난류에 의한 비선형 수두손실과 관정 굴착시 스며들게 되는 시추점토(drilling mud)의 영향에 의한 수두손실등 다양한 영향이 개입될 수 있다. 실제로 현장사정상 인접 관측공이 없을 때 양수정의 수두강하자료를 이용한 수리상수의 추정은 이런 영향을 고려하지 않았을 때 상당한 오차가 발생한다. 많은 연구자들은 단공 단계양수시험에서 난류에 의한 수두손실에 관심을 가져왔다(Avci, 1992; Gupta, 1989; Labadie and Helweg, 1975). 본 연구에서는 양수정에 인접한(약 5미터) 관측정에서 발생한 난류에 의한 수두손실을 정량적으로 평가하였다. 일반적인 다공성 매질의 경우 이 정도의 관측거리에서 난류에 의한 수두손실은 거의 없다. 그러나 조립질의 대수층이나 균열이 발달한 경우 급한 수두경사와 심한 균열틈의 크기변화등으로 관측정에서도 난류에 의한 수두손실이 발생한다(Sen, 1986). 그러나 실제로 관측정에서의 난류에 의한 수두손실 연구사례는 많지 않다(Sen, 1988b; Sen, 1989; Sen, 1990).

이론적으로 Theis 흐름에 대해 시간에 따라 투수량계수와 저유계수가 변하지 않는다면 양수정과 관측정에서 얻은 정규수두강하(s/Q)는 양수량에 상관없이 같아야 한다.

$$\frac{s}{Q} = \frac{W(u)}{4\pi T} \tag{1}$$

여기서, s는 수두강하량, Q는 양수량, W(u)는 우물함수, $u=r^2S/4Tt$ 이다. 물론 양수정에서의 정규수두강하는 양수량에 따라 달라질 수 있다. 왜냐하면 그때마다 발생하는 우물손실이 다르기 때문이다. 그러나 일정거리에 있는 관측정에서는 대수층 손실만을 기대할 수 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구지역에서 양수정의 양수량을 달리했을 때 동일 관측정에서 얻은 정규수두강하는 다르게 나타났다. Figure 3은 PW정에서 양수량을 달리하여 실시한 양수시험에서 얻은 관측정 C-I와 C-III에서 얻은 수두강하자료를 양수량으로 정규화한 것이다. 인접한 관측정 C-I에서의 정규수두강하는 양수정에서의 양수량이 변함에 따라 각기 다르게 나온 반면 멀리 떨어진 C-III 관측정의 정규수두강하는 거의 같게 나옴을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 C-I 관측정에서 관측된 수두강하가 대수층 손실만이라면 정규수두강하는 동일해야 한다. 그러므로 대수층 손실외에 다른 수두손실이 있음을 의미한다. 본 연구에서는 이러한 수두손실을 급한 수두경사와 균열틈새등의 변화에서 유발된 난류에 의한 수두손실로 보고 이를 정량화하였다. 그림에서 보듯 이러한 정규수두강하치는 시간에 대해 대수적(logarithmic)으로 증가하며 양수량차가 클수록 대수기율기도 증가하는 것을 알 수 있다. 위의 분석을 통하여 C-I 관측정에서 발생한 총정규수두강하(total normalized drawdown)는 Jacob 조건(Sen, 1988a)을 만족하는 후기수두강하자료에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{s(t)}{Q} = \frac{2.3}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2S}\right) + CQ \log t$$

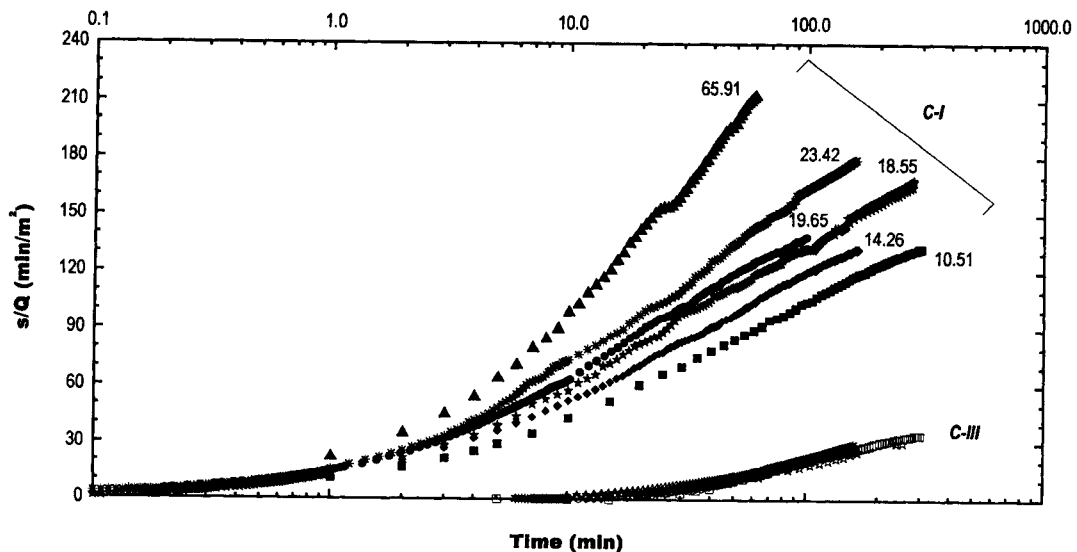


Figure 3. Normalized drawdowns in the two wells, C-I and C-III with different pumping rates. Pumping occurred at PW. Number at the end of the curve indicates the pumping rate in l/min. The figure was obtained from Lee and Lee (1999).

$$= \frac{2.3}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25T}{r^2 S}\right) + \left(\frac{2.3}{4\pi T} + CQ\right) \log t \quad (2)$$

여기서 C는 비례상수로 관측정과외의 거리와 관측정 자체의 물리적 특성에 관계한다. 그러므로 정규수두강하(s/Q)를 대수시간에 대해 도시하면 직선을 얻는다. 이 때 직선의 기울기는 식 (2)에 의해 $2.3/4\pi T + CQ$ 이다. Figure 3에서 각 양수량에 대해 직선의 기울기를 구하였고 이들에 대해 최소자승법을 이용하여 최적화된 상수 C와 투수량계수를 구하였다. Table 1에서 보듯이 난류에 의한 관측정에서의 수두손실을 고려하지 않았을 경우에 투수량계수값이 약 4배 정도 작게 추정되었음을 알 수 있다. 실제로 난류에 의한 수두손실을 보정한 후 얻은 투수량계수값은 C-III 관측정에서 얻은 값과 C-I 정과 PW정과의 수리적 연결성을 고려해 볼 때 보다 합리적임을 알 수 있었다 (Lee, 1998). 그러므로 입자가 굵은 매질이나 균열이 발달되어 있는 대수층에서 양수시험을 할 경우 양수정뿐만 아니라 인접 관측정에서도 이와같은 난류에 의한 수두손실 가능성을 평가해야 할 것이다.

양수정의 위치에 따른 영향

흔히 현장에서 대수성을 평가하기 위해 양수시험을 할 경우 현장사정(인접관정의 유무, 관정직경 등)에 의해 양수정 선택에 제한을 받는다. 종종 임의로 선택된 양수정의 위치때문에 그 해석에 오류를 범하게 된다. 예를 들어 본 연구에서는 양수정을 바꾸어가며 양수시험을 수행하였는데 C-I 정(관정의 위치 관계 Figure 1b 참조)에서 양수를 하고 C-II 정과 C-III 정에서 수위강하를 관측한 결과 양수시작후 약 180분이 경과하였을 때 가까운 C-II정에서의 수두강하가 8 cm인데 반해 먼 C-III 정에서의 수두강하는 50 cm로 이상적인(anomalous) 반응양상을 보였다. 그런데 양수정을 C-II 정으로 바꾸어 시험해본 결과 PW, C-I, C-III 정에서 거리에 따른 이상적인 반응양상을 보이지 않았다. 만약 비용이나 시간적인 제한으로 C-I 정에서 양수를 하고 C-II, C-III 정에서 얻은 결과를 수위강하 자료에 대한 면밀한 검토없이 그대로 해석하였다면 C-II 정에서는 C-III 정에서보다 매우 큰 투수량계수값을 얻을 것이다. 왜냐하면 앞서의 해석모델들은 대수층의 균질성을 가정하므로 투수성이 매우 커서 수두강하가 작은 것으로 해석하기 때문이다. 그런데 실제로는 C-II정에서의 이런 작은 수위강하는 양수정과의 약한 수리적 연결성에 기인한다(NRC, 1996). 또한 C-II 정에서 양수를 했을 때 거리에 따른 정상적인 수위강하양상을 보인다는 것은 투수도가 낮은 즉, 수리적 연결성이 약한 구역이 C-II 정 주위에만 국한되어 있어 양수에 의한 스트레스가 이 구역을 벗어나면 정상적인 반응을 보인다는 것을 의미한다. C-II 정 주위의 저투수성 구역은 순간수위변화시험 결과와도 잘 일치한

다. 그러므로 시간, 비용으로 인해 특정 한 관정에서 양수하고 다른 공에서 관측하는 일회성 양수시험으로 제한될 때는 반드시 각 관정에서 순간수위변화시험을 수행하여 양수시험 결과를 보정, 평가해야 할 것이다.

순간수위변화시험

일반적으로 순간수위변화시험은 현장에서 널리 수행되고 있음에도 불구하고 그 수행방법이나 해석에 있어서 많은 문제점들이 지적되어 왔다(Butler *et al.*, 1996). 본 연구에서는 순간수위변화시험의 수행과 해석에 관련된 다양한 오차와 불확실성 요인을 분석하였다. 이를 위해 연구지역에서 각 관정마다 금속물체(dummy)를 주입 혹은 제거하는 방식으로 총 70회의 순간수위변화시험을 반복하였다.

시험시작 기구(test initiation mechanism)에 따른 영향

현장에서 순간수위변화시험을 수행할 때 일정량의 물을 순간적으로 퍼내거나 주입한다. 혹은 부피를 아는 물체(dummy)를 집어넣거나 빼내어 관정에 스트레스를 가한다. 그런데 이론적으로는 한 관정에서는 어떤 시험기구를 사용하더라도 또 최초변위(H_0)가 다르더라도 정규수두(normalized head, H/H_0)의 변화양상은 같아야 한다. 그러나 Figure 4에서 보듯이 시험기구에 따라 또 최초변위의 크기에 따라 달라짐을 알 수 있다. 주입식(injection type) 순간수위변화의 경우 제거식(withdrawal type) 보다 훨씬 빨리 수위가 회복되며 같은 방식에 대해서도 최초변위가 클수록 수위회복이 빠른 것을 관찰할 수 있다. 이러한 차이는 실제로 추정 투수계수의 차이로 나타난다(Figure 5). 두 가지 해석방법, Bouwer and Rice(1976)와 Cooper *et al.*(1967)에 대해 모두 주입식일 경우에 수리전도도값이 1.5~4 배까지 크게 나왔다. 초기변위와 추정수리전도도 사이에는 보다 흥미로운 결과가 나왔는데 Figures 5c and 5d에서 보는바와 같이 초기변위와 대수 수리전도도($\ln K$)는 유사선형관계를 보였다. 이러한 선형관계는 Cooper *et al.*(1967) 해석모델에서 더욱 뚜렷하다(결정계수=0.92).

해석방법에 따른 영향

현장시험을 통해 자료를 얻더라도 이를 어떤 모델을 사용하여 해석하느냐가 문제가 될 수 있다. 본 연구에서는 Bouwer and Rice(1976) 방법과 Cooper *et al.*(1967) 방법을 이용하여 순간수위변화 시험 자료를 해석하였다. Figure 6은 두 방법을 이용하여 얻은 수리전도도값을 나타낸 것이다. 투수성이 높은 매질에서는 Cooper *et al.*(1967) 방법이 반대로 투수성이 낮은 매질에서는 Bouwer and Rice(1976) 방법에 의한 추정 수리전도도 값이 크게 나왔다. 본 연구에서 얻은 70개의 순간수위변화 시험 자료를 이 두가지 방법으로 해석하여 얻은 수리전도도 자료를 회귀분석한 결과 이들 상호간에는 $\ln K_{Cooper \text{ et al.}} = 1.45 \ln K_{Bouwer \text{ and Rice}} + 3.83$ (결정계수=0.88)이라는 관계를 보였다. 이는 Mas-Pla *et al.*(1997)에 의한 Cooper *et al.*(1967) 방법과 Hvorslev(1951) 방법의 비교결과와 일치한다. 왜냐하면 Bouwer and Rice(1976) 방법은 Hvorslev(1951) 방법을 이론적 기초로

Table 1. Analysis results of corrected data for the turbulent head losses

	T (m ² /min, geometric mean)	C (min ² /m ⁵)
Uncorrected C-I data sets	2.35E-03	
Corrected C-I data sets	9.22E-03	729.83
C-III data sets	5.35E-03	

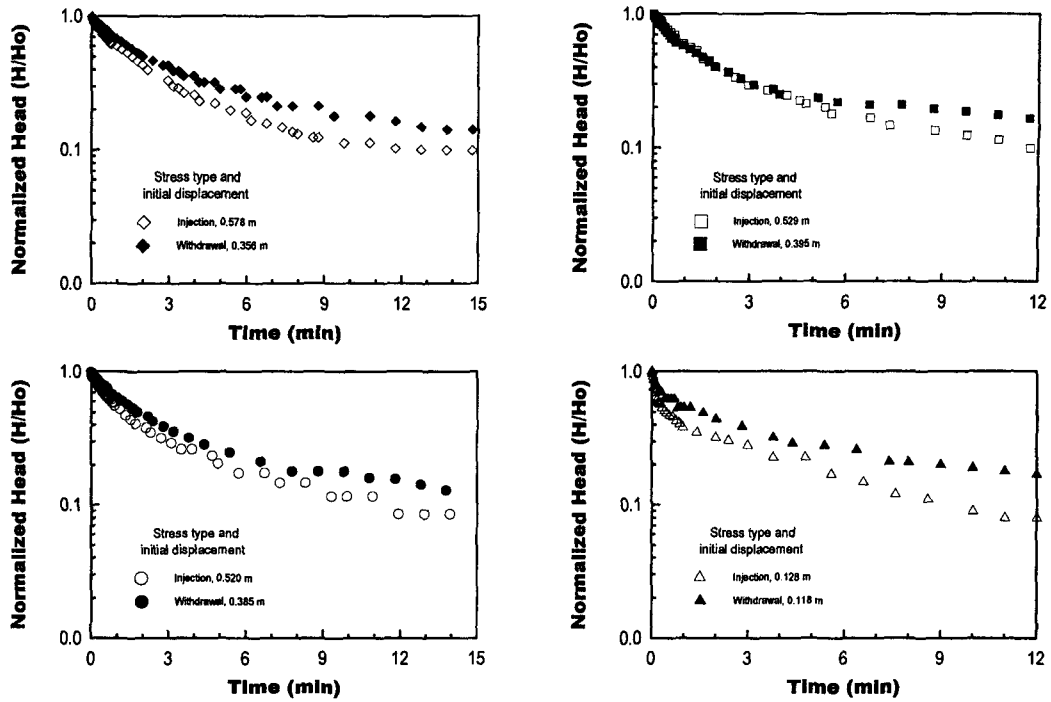


Figure 4. Normalized head versus time plots of a series of injection and withdrawal slug tests in the PW well. Eight of ten were displayed in the figure.

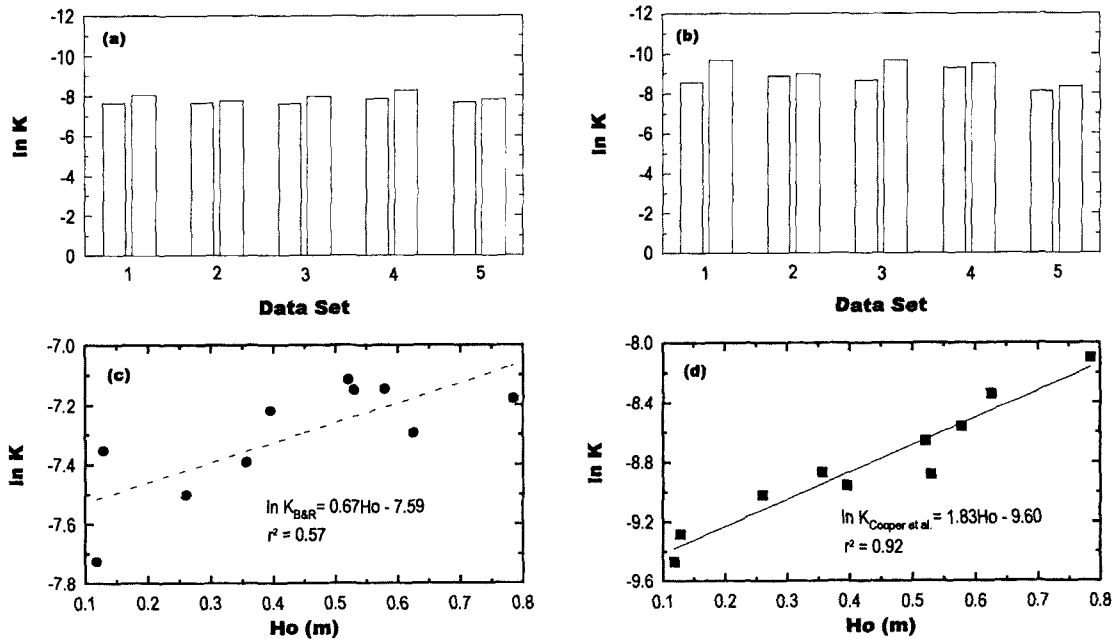


Figure 5. Sensitivity of the analysis results on test type and applied initial displacement. (a) and (c): the Bouwer and Rice (1976) method; (b) and (d): the Cooper et al. (1967) method. Open and closed bars indicate injection and withdrawal tests, respectively.

하고 있기 때문이다.

특히 Bouwer and Rice(1976) 방법을 이용하여 수리전도도를 추정할 경우는 직선 matching에 있어서 주의가 요구되는데 투수성이 낮은 매질에서는 이중직선 효과(Bouwer, 1989)로 인해 두 개의 직선이 나올 경우가 많기 때문이다(Figure 4 참조). 중

중 두 직선 기울기의 평균이나 혹은 어느 한 직선을 선택하여 해석을 하는 등 해석자의 자의에 의존하는 경우가 있다. Bouwer (1989)에 의하면 첫 번째 직선은 관정저장 효과, 또는 관정설 치시 생긴 고투수성대를 반영하고 두 번째 직선이 실제로 교란되지 않은 그 매질의 투수성을 반영한다고 한다. 본 연구지

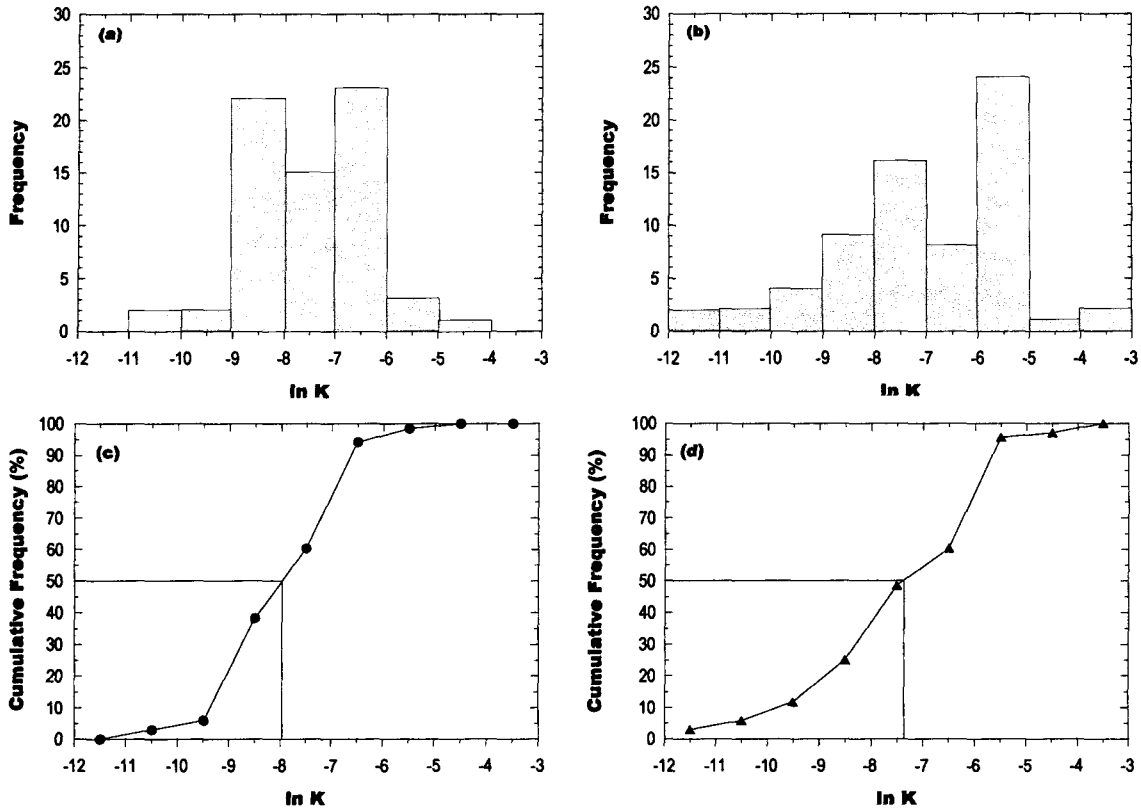


Figure 6. Histogram and ogive of natural logarithmic hydraulic conductivity data obtained from different analysis methods, the Bouwer and Rice (1976) method; (a and c), and the Cooper *et al.* (1967) method; (b and d). K is in cm/sec.

역의 관정에서도 이런 이중직선 효과가 나타나는데, Table 2는 이런 자료를 해석할 때 자의적인 직선 matching에 의해 얼마나 추정 수리전도도의 값이 달라지는지를 잘 보여주고 있다. 첫 번째 직선에 맞추어 해석을 했을 때 두 번째 직선에 맞추

는 것보다 추정 수리전도도값이 최소 2배에서 최고 10배까지도 크게 나왔다. 그러므로 이중직선 효과가 나타나는 순간수위 시험 자료를 해석할 때는 이를 일으키는 원인이 무엇인지를 면밀히 검토하고 이에 따라 직선 matching을 함에 있어 일관성을 유지해야 한다.

Table 2. Hydraulic conductivity estimates from the first and second segment data using the Bouwer and Rice (1976) method. K is in cm/sec

	First Segment	Second Segment
Number of Data Set	70	70
Geometric Mean	2.32E-03	5.83E-04
Average ln K	-6.065	-7.447
Minimum ln K	-8.805	-10.232
Maximum ln K	-4.605	-4.946
Standard Deviation of ln K	0.976	1.119

양수 및 순간수위변화시험 결과비교

일반적으로 양수시험에 의해 추정된 투수량 계수는 순간수위 변화시험에서 얻은 값보다 훨씬 크다고 한다(Butler and Healey, 1998). 이는 매질의 불균질성과 관련된다. 그러나 본 연구지역과 같이 소규모(450 m²) 지역에서의 결과는 이와 다르다. 같은 균열암반대수층에서 실시한 양수 및 순간수위변화 시험 해석결과를 비교하여 보았다(Table 3). 통계분석 결과 두

Table 3. Transmissivity estimates from the slug and pumping tests. T is in m²/min

	Slug Tests		Pumping Tests	
	Bouwer and Rice	Cooper <i>et al.</i>	Theis	Cooper-Jacob
Number of Data Set	25		23	
Geometric Mean	4.83E-03	5.73E-03	4.29E-03	5.23E-03
Average ln T	-5.333	-5.162	-5.450	-5.252
Minimum ln T	-7.341	-8.441	-6.717	-6.638
Maximum ln T	-3.277	-2.793	-4.062	-4.110
Standard Deviation of ln T	1.004	1.552	0.656	0.682

시험을 통해 얻은 투수량계수 자료는 동일 평균 집단에 속한다고 할 수 있다. 그러나 순간수위변화시험 결과의 표준편차는 양수시험의 그것보다 훨씬 크다. 이를 통해 볼 때 일회의 시험으로 얻은 투수량 계수값은 순간수위변화시험일 경우가 평균에서 멀 가능성이 많다. 그러므로 보다 신뢰성 있는 수리상수 추정을 위해서는 다수의 시험을 수행해야 한다. 특히 순간수위변화시험의 경우에 가능한 여러 차례의 시험이 요구된다.

결론 및 토론

우리는 본 연구에서 다양한 조건하에 반복적인 양수 및 순간수위변화시험을 수행하였다. 이를 통해 두 수리시험의 수행에서 획득자료의 해석에 이르기까지 발생할 수 있는 다양한 오차 및 불확실성 요인을 분석하였다. 이 분석을 통해 다음과 같은 사항을 알 수 있었다. (1) 양수시험 자료를 해석할 때 같은 자료를 사용하더라도 Cooper-Jacob(1946) 방법은 Theis(1935) type curve 방법보다 투수량계수는 크게, 저유계수는 작게 추정한다. 또한 시험단계에 대해서는 회복단계 자료가 양수단계 자료보다 큰 투수량계수를 보인다. (2) 균열이 발달한 대수층에서 양수시험을 할 때 양수정뿐만 아니라 인접관측정에서도 난류에 의한 수두손실이 발생할 수 있다. 이런 난류에 의한 수두손실을 무시할 경우 투수량계수값이 실제값보다 매우 작게 추정될 수 있다. (3) 순간수위변화시험 수행시 시험시작 기구와 초기수위변화가 수위회복 양상에 영향을 미친다. 주입시험이 제거시험보다 수위회복이 빨랐으며 초기수위변화가 클수록 회복이 빨랐다. 이는 곧 구하고자하는 수리전도도의 차이로 나타났다. (4) 또 해석모델에 대해서는 투수성이 좋은 매질에서는 Cooper *et al.*(1967) 방법이 반대로 투수성이 낮은 매질에서는 Bouwer and Rice(1976) 방법이 큰 수리전도도를 보였다. 두 방법을 통한 추정수리전도도는 특징적인 선형관계를 보였다. (5) 특히 투수성이 낮은 매질에서는 이중직선 효과가 나타나는데 Bouwer and Rice(1976) 방법으로 자료를 해석할 경우 직선 matching에 있어서 일관성을 가져야 한다. (6) 두 수리시험을 통해 얻은 투수량계수 통계자료로 볼 때 평균은 일치하나 분산은 순간수위변화시험 결과가 훨씬 컸다. 그러므로 보다 신뢰성 있는 수리상수 추정을 위해서는 가능한 다양한 조건하에서 여러 차례의 시험, 특히 순간수위변화시험이 요구된다.

본 연구에서 분석 언급한 오차 및 불확실성 요인 외에도 다양한, 특히 본 연구에서 가장한 다공성 매질접근법에 관련된, 여러 가지 요인들이 있을 수 있다. 본 연구에서 관찰 파악된 현상과 결과들이 이 연구지역에만 국한된 것인지 아니면 파쇄 다공질 매질에서 일반적으로 나타나는 현상인지를 알기 위해서는 보다 많은 현장시험과 이론연구가 요구된다.

참고문헌

- Avci, C. B., 1992, Parameter estimation for step-drawdown tests, *Ground- Water*, 30(3), p.338-342.
- Berkowitz, B., Bear, J. and Braester, C., 1988, Continuum model for contaminant transport in fractured porous formations, *Water Resources Research*, 24(8), p.1225-1236.
- Bibby, R., 1981, Mass transport of solutes in dual-porosity media, *Water Resources Research*, 17(4), p.1075-1081.
- Bouwer, H. 1989, The Bouwer and Rice slug test-An update, *Ground- Water*, 27(3), p.304-309.
- Bouwer, H. and Rice, R. C., 1976, A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 12(3), p.423-428.
- Butler, J. J. Jr. and Healey, J. M., 1998, Relationship between pumping-test and slug-test parameters: scale effect or artifact?, *Ground- Water*, 36(2), p.305-313.
- Butler, J. J. Jr., McElwee, C. D. and Wenzhi, L., 1996, Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests, *Ground- Water*, 34(3), p.480-490.
- Cooper, H. H. and Jacob, C. E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *American Geophysical Union Transaction*, 27, p.526-534.
- Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D. and Papadopoulos, I. S., 1967, Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, *Water Resources Research*, 3(1), p.263-269.
- Gernand, J. D. and Heidtman, J. P., 1997, Detailed pumping test to characterize a fractured bedrock aquifer, *Ground-Water*, 35(4), p.632-637.
- Gupta, A. D., 1989, On analysis of step-drawdown data, *Ground- Water*, 27(6), p.874-881.
- Hvorslev, M. J., 1951, Time lag and soil permeability in ground water observations, U.S. Army Corps. of Engineers Water Ways Experimental Station, Bulletin 36, 50pp.
- Khaleel, R., 1989, Scale dependence of continuum models for fractured basalts, *Water Resources Research*, 25(8), p.1847-1855.
- Korea Institute of Energy and Resources, 1989, Geological report of the Munmak sheet, KIER, Taejon.
- Labadie, J. W. and Helweg, O. J., 1975, Step-drawdown test analysis by computer, *Ground-Water*, 13(5), p.46-52.
- Lee, J. Y., 1998, Use of field observations to characterize a fractured porous aquifer system in Won-Ju, Korea, M.S. thesis, Dept. of Geological Sciences, Seoul National University.
- Lee, J. Y. and Lee, K. K., 1999, Analysis of the quality of parameter estimates from repeated pumping and slug tests in a fractured porous aquifer system in Wonju, Korea, *Ground-Water*, 37(5), p.692-700.
- Mas-Pla, J., Yeh, T.-C. J., Williams, T. M. and McCarthy, J. F., 1997, Analyses of slug tests and hydraulic conductivity variations in the near field of a two-well tracer experimental site, *Ground-Water*, 35(3), p.492-501.
- National Research Council, 1996, *Rock Fractures and Fluid Flow*, Washington, D.C.: National Academic Press.
- Sen, Z., 1986, Volumetric approach to non-Darcy flow in confined aquifers, *Journal of Hydrology*, 87, p.337-350.
- Sen, Z., 1988a, Dimensionless time-drawdown plots of late aquifer test data, *Ground-Water*, 26(5), p.615-618.
- Sen, Z., 1988b, Analytical solution incorporating nonlinear radial flow in confined aquifers, *Water Resources Research*, 24(4), p.601-606.
- Sen, Z., 1989, Radial flow in vertically graded hydraulic conductivity aquifers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(12), p.1667-1682.

Sen, Z., 1990, Dimensionless straight-type lines for aquifer tests, Journal of Hydraulic Engineering, 116(9), p.1145-1156.
Theis, C. V., 1935, The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage, Transactions of the American Geo-

physical Union, 16, p.519-524.
Young, S. C., 1998, Impacts of positive skin effects on borehole flowmeter tests in a heterogeneous granular aquifer, Ground-Water, 36(1), p.67-75.