

## 양수시험: 국내 연구성과, 적용 및 제언

이진용<sup>1,‡</sup> · 김용철<sup>2</sup> · 윤상웅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부

### 요 약

양수시험은 투수량계수 및 저류계수와 같은 대수층의 수리상수를 구하기 위해 현장에서 수행되는 대표적인 수리시험의 하나이다. 본 연구에서는 우리나라에서 그 동안 수행된 양수시험에 관한 연구를 살펴보고 그 장점과 한계를 검토하였다. 그런데 우리나라에서 주로 사용하는 해석해들이 연속체 매질을 가정하고 있어 단열암반 대수층에 적용하는데 한계가 있다. 몇몇 연구자들에 의해 암반 대수층에서의 지하수 흐름특성을 반영할 수 있는 해석법이 제안되었지만 엔지니어링 현업에서 손쉽게 활용하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 현실적으로 많이 사용하고 있는 Theis 및 Cooper-Jacob 해석법을 적용하여 기존 양수시험자료를 분석하였고 그에 따른 몇 가지 기술적 유의점을 제시하였다. 본 연구의 제안사항이 현업에서 양수시험을 통해 보다 나은 수리상수의 추정에도움이 되기를 기대한다.

**주요어:** 양수시험, 우물손실, 스킨효과, 투수량계수, 저류계수

**Jin-Yong Lee, Yongcheol Kim and Sang Woong Yun, 2014, Pumping tests: research accomplishment, application and suggestions in Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 3, p. 409-418**

**ABSTRACT:** The pumping test is one of representative hydraulic tests conducted in the field to estimate hydraulic parameters including transmissivity and storativity. In this study, we examined many researches on the pumping tests performed in South Korea and also discussed their merits and weak points. There have been technical limitations of using the existing analytical solutions to fractured rock aquifers in South Korea because they basically assume continuum media. A few Korean researchers have suggested some analytical solutions considering the groundwater flow characteristics in the fractured aquifers but they are not easy to engineering practitioners. Also in this study, we demonstrated a practical application of the common two solutions, Theis (1935) and Cooper-Jacob (1946) to the existing pumping test data and suggested a few recommendations, expecting to be useful to the more reliable analysis of the pumping test data in the engineering fields.

**Key words:** Pumping tests, well loss, skin effect, transmissivity, storativity

(Jin-Yong Lee and Sang Woong Yun, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; Yongcheol Kim, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea)

### 1. 서 론

양수시험(pumping tests)은 흔히 관심대상 대수층의 수리상수(투수량계수(T), 수리전도도(K), 저류계수(S), 비저류계수(Ss), 비산출율(Sy))를 추정하기 위하여 수행되며 전세계적으로 일반적으로 채택되는 수리시험의 하나이다(Dawson and Istok, 1991; Lee and Lee, 1999). 그리고 표준적인 양수시험에는 한 개 이상의 관측정(observation well)이 필요하다

(Kruseman and de Ridder, 1990). 우리나라에서도 수리지질학자와 관련 기업의 엔지니어들에 의해 일찍부터 연구 혹은 실무적 목적으로 다수의 양수시험이 수행되었다. 특히 농업용 지하수개발, 엔지니어링 설계 및 환경영향평가가 요구되는 각종 텀키사업 혹은 먹는샘물 개발현장 등에서 통상적으로 수행되었다(Kang *et al.*, 2003; Choi, 2007, 2008).

그런데 그동안 축적된 경험과 노력에도 불구하고 지금까지도 양수시험에 대한 각종 용역보고서에서

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

적지 않은 기술적 오류를 발견할 수 있다. 이들 오류는 현장시험 자체에 대한 몰이해나 잘못에서 유래되었다기 보다는 해석과 관련된 기초이론(수리상수의 의미와 합리적 범위, 대수층 조건에 따른 적절한 해의 선택과 각 해의 기본가정 등)에 대한 이해부족이 대부분이다. 특히 시간과 비용 혹은 대상 부지의 특성상 관측정 설치가 불가능하여 수행하는 단공 양수시험의 경우 그 해석에 매우 세심한 주의가 필요하다(Choi, 1998, 2007, 2008). 그럼에도 불구하고 보고서에 수록된 커브매칭(curve matching) 혹은 추정된 수리상수가 합리적이지도 않으며 이론적 수치범위를 넘어가는 경우도 상당하다(Choi, 2007, 2008).

본 논문에서는 현행 양수시험의 과학적 수행과 보다 합리적인 결과 해석을 위해, 특히 현업의 엔지니어들을 위해, 기존에 국내에서 수행된 양수시험에 대한 연구결과 및 기술적 진전과 성과를 검토하고, 특별히 양수시험과 관계된 해석의 문제점을 분석하였다. 또한 과거 제1저자에 의해 수행된 암반대수층 양수시험(Lee and Lee, 1999) 결과를 현재 시점에서 다시 분석하였다. 이를 통해 양수시험의 수행 및 결과 해석을 보다 합리적으로(수리지질학 기초이론에 부합하게) 할 수 있는 몇 가지 방법(제언)을 제시하였다.

## 2. 양수시험에 관한 국내연구

우리나라의 양수시험 관련 연구문헌을 환경지질 연구정보센터(ieg.or.kr)와 구글 스칼라를 통해 검색하였다. 그 결과 지질학회지에 게재된 Hamm (1987)의 논문이 가장 오래된 것으로 파악되었다. 이 논문에서는 Cooper and Jacob (1946)법에 기초하여 빠르게 투수량계수(T)와 저류계수(S)를 구하는 BASIC 프로그램이 제시되었으며, 실제 양수시험 자료 적용결과 합리적인 수리상수값(T, S)이 추정되었다. Choi *et al.* (1993)은 층적 자유면대수층에 대한 양수시험 결과를 Neuman (1975)법을 이용하여 해석하였는데, 5~15 m 거리에 위치한 관측정의 수위자료로부터(양수정 수위자료는 해석 제외) 적절한 수리상수(T, Sy, K, Ss)가 산정되었다. 흥미로운 것은 이때 수평 대수직 수리전도도비(Kv/Kh)가 평균 0.37로 추정된 것이다.

Hamm (1994)과 Hamm and Lim (1994)은 누수 단열암반 대수층의 양수시험 자료를 해석하는 컴퓨터 프로그램을 제시하고 또 실제 홍천과 유성지역에서

실시한 양수시험 자료에 대한 적용사례를 보여주었다. 이들 논문에서 주목할 것은 수리지질학자 및 엔지니어가 익히 알고 있지만 쉽사리 간과하는 부분에 대한 지적이다. 즉 양수시험 해석에서 가장 흔히 사용하는 Theis (1935)법과 Cooper-Jacob (1946)법은 기본적으로 균질 다공성 피암대수층(homogeneous porous confined aquifer)에 적용하는 것이므로 불균질 단열(균열)암반 또는 자유면대수층에서는 적용성이 현격하게 떨어진 다(Halford *et al.*, 2006). 즉 이 해들을 암반 대수층에 적용할 경우에는 단열이 충분히 발달하여 다공성 연속체(continuum media)로 볼 수 있는지에 대한 심각한 검토가 필요하다는 뜻이다(e.g., Lee and Lee, 1999; Kang *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2003). 한편 Hamm *et al.* (1998a, 1998b)은 균열암반대수층의 양수시험분석에서 양수정 수위강하에 대해서 우물저장(wellbore storage) 효과 및 우물손실(well loss) 효과를 고려하였다는 것이 특징적이다.

상기한 바와 같이 부산대 함세영 교수는 우리나라 수리지질(주로 단열암반대수층)에 맞는 양수시험 해석방법의 개발에 천착하여 그 학술적 수준을 크게 향상시켰다. 그런데 우리나라에서 대표적인 지하수전문기관의 하나인 한국농어촌공사의 최병수는 양수시험(특히 단공양수시험)의 문제점(주로 저류계수 과다 추정 문제)을 분석하고 해결책을 제시함으로써 실무적 수행 및 해석에 크게 기여하였다(e.g., Choi, 1998, 2007, 2008).

Choi (1998, 2007, 2008)는 단공양수시험을 통해 구하는 투수량계수는 비교적 신뢰할만하나 저류계수는 일반적으로 과다산정되므로 이에 대한 해결책을 제시하였다. Choi (1998)은 단공양수시험의 해석에서 가장 큰 문제는 양수정 수위강하에 포함된 우물저장 및 우물손실 효과로 보았다. 우물저장효과는 양수시험 각종 해가 무한소(line sink)의 양수정 반경을 가정하기 때문에 생기는 것으로 실제로는 굴착구경이 크거나, 양수량이 작거나 또는 대수층의 투수성이 불량할 경우 우물저장효과를 무시할 수 없다(Choi, 1998). 그런데 우물저장 효과는 Papadopoulos-Cooper (1967)법에서 양수 초기 자료를 무시함으로써 해결이 가능하다고 하였다. 그럼에도 불구하고 우물손실의 영향은 여전히 남는다.

Choi (1998)은 우물손실이 주로 관정 주변(skin)의 수리전도도 변화(선형우물손실)를 원인으로 보았다

(이 뿐만 아니라 스크린 영향, 양수기 주변 난류의 영향도 있음; Lee *et al.*, 2002). 관정 굴착 시 점토유입이나 화학적 침전으로 관정 주변 투수성이 줄어들면 수위강하가 원래보다 커지고(positive skin), 반대로 관정개발(well development 또는 stimulation) 등에 의해 투수성이 확대되면 수위강하가 감소한다(negative skin). Choi (1998)는 대부분의 단열암반대수층 우물이 음의 스킨 효과를 보임에 기반하여 확대된 우물반경 즉 유효우물반경(effective well radius: 우물손실이 없는 우물반경, 실제 저류계수를 보이는 우물반경)을 구하여 물리적 우물반경 대신 대입함으로써 저류계수를 정확히 구하고자 하였다. 유효우물반경을 구하는 방법으로 단계양수시험보다 스킨계수에 의한 방법이 더 신뢰성이 있다고 하였다. 그러나 이들 두 방법 모두 구하고자하는 유효우물반경식에 저류계수가 포함되어 있어 순환모순이 발생하며 현업에서 이용하기에 실용성이 적다(Choi, 1998).

이후 Choi (2007)는 앞서 Choi (1998)가 제안한 유효우물반경을 이용한 저류계수 보정방법의 실용성 부족문제를 해결하기 위하여 136개 암반대수층 단공양수시험 자료를 분석하여 자유면, 누수 및 피압대수층에 대한 유효우물반경과 양수정에서 구한 저류계수의 경험 회귀식을 도출하였다. 이어 Choi (2008)는 현장 실용성을 높이기 위하여 상기 세 개의 회귀식을 하나의 일반 회귀식으로 정리하였다. 전자의 경우 비록 실용적 접근이 평가받을만하나 이론적 근거가 약하며, 후자의 경우 여전히 조사 대수층의 저류계수를 우선 가정해야 한다는 순환모순의 문제를 안고 있다. 최병수는 많은 노력에도 불구하고 상기 논문들의 결론에서 Driscoll (1979)의 “피압대수층의 저류계수를 0.0005, 자유면대수층은 0.1로 추정하는 것은 비록 실제값 보다는 덜 정확하지만 실제에 근접하는 결과이다”라고 하는 말을 반복하여 언급함으로써 위 방법의 단점과 한계를 드러내고 있다.

한편 Lee and Lee (1999)는 단열암반 대수층에서 수행한 다양한 양수량의 양수시험을 통해 비선형 우물손실을 보정하는 방법을 제시하였다. 또한 일반적인 해석에서 Cooper-Jacob (1946)법이 Theis (1935)법 보다, 그리고 회복자료가 양수자료보다 상대적으로 큰 투수량계수가 추정됨을 제시하였다. 그런데 Choi (1999)는 손쉽게 얻어지는 비양수량을 통해 투수량계수를 구할 수 있도록 제주도 화산암반 대수층

의 206개공 양수자료를 이용하여 비양수량(specific capacity)과 투수량계수의 회귀관계식을 도출하기도 하였다. 이어 Lee and Lee (2000a)는 양수시험 시 획득되는 수위회복자료만으로 투수량계수와 저류계수를 모두 추정하는 일반해를 개발하였다.

Hamm *et al.* (2002)은 창원시 대산면 충적 자유면대수층의 양수시험 해석을 위해 관측정에서는 대수층 두께변화를 고려한 수정 수위강하( $s' = s - s^2/2b$ ,  $b$ =대수층 두께)에 대해 Theis (1935)식을 그리고 양수정의 경우 동일하게 수정 수위강하에 대해 우물저장 효과를 고려한 Papadopoulos-Cooper (1967)식을 적용하였다. 한편 Lee *et al.* (2002)은 균열암반 단공 양수시험에서 우물손실은 케이싱이나 시추시 발생하는 공벽 감소 영향보다 양수정 부근에서의 난류 영향이 더 큰 것으로 파악하였다. 해석결과 Jacob (1947)의  $n=2$ 가 아닌 평균  $n=2.84$ 를 산출함으로써 난류에 의한 비선형 우물손실의 우세함을 제시하였다. 이어 Kim *et al.* (2003)은 균열암반 수리시험을 통해 이 지역 지하수 흐름이 2차원 Theis 흐름보다 1차원 유동에 가까움을 제시하였다. 흥미로운 것은 동일 관정에 대한 두 차례 시험 해석결과 투수량계수가 1.72배 차이가 나는 것을 보였다.

Kang *et al.* (2003)은 목천지역 암반대수층의 양수시험 분석을 위해 9개의 다양한 해를 적용하였다. 그 결과 연속체 모델인 썩기형 피압대수층 모델(Hantush, 1962)와 누수피압대수층 모델(Moench, 1985)이 이들 지역 암반대수층에 가장 적합한 것으로 파악하였고 지질조건에도 부합하는 것으로 보고하였다. 한편 균열암반 대수층의 양수시험에 대한 종합적 분석을 수행한 우수한 연구논문으로 Seong *et al.* (2005)을 들 수 있다. 이들 연구는 우리나라 균열암반대수층에서 수행된 122개의 양수시험 자료를 분석한 결과 71%가 연속체모델로 해석이 가능하고 특히 누수대수층 모델(Hantush and Jacob, 1955)에 적합한 것이 가장 많은 것으로 파악하였다.

한편 Lee *et al.* (2005)은 단계양수시험에서 수위 안정이 안된 천이상태에서는 해석 시 선택시간에 따라 추정 수리상수가 크게 차이날 수 있음을 지적하였다. Kim *et al.* (2008)은 김해시 누수 피압대수층 연구를 통해 양수정에서 거리가 멀어짐에 따라 수리전도도가 증가하는 규모중속효과를 보고하였다. 또 Kim and Kim (2009)은 미고결퇴적층에서 양수시험

**Table 1.** Specifications of wells involved in the pumping test (Lee, 1998).

Well	Depth (bgs)	Well radius	Casing	Distance from PW
PW	56 m	10.16 cm	Upper 4 m	0 m
C-I	40 m	6.5 cm	Upper 4 m	5.02 m
C-III	34 m	6.5 cm	Upper 4 m	22.15 m

시 관측정의 설계(완전관통정과 부분관통정)가 추정 수리상수에 상당한 영향을 미친다고 보고하였다. Chung *et al.* (2009)은 단계양수시험의 해석에서 Jacob (1947) 선형모델과 Labadie and Helweg (1975) 비선형 모델이 우물효율 산정에 큰 차이(특히 단열암반층에서는 8.73~24.71%)를 유발함으로 제시하였다.

한편 Lee (2010)은 단계양수시험을 이용하여 먹는샘물 적정 채수량을 결정하는 방법이 문제가 있음을 지적하였다. 특히 현업에서 수위강하량 대 단계별 양수량 혹은 비수위강하량 대 양수량 방법을 임의 선택하고 있어 일관성이 없으며 또 이들 방법은 적정채수량 산정방법으로 어떤 이론적, 기술적 근거가 없음을 지적하였다. 그러나 최근 몇몇 연구(Choi *et al.*, 2010; Jo *et al.*, 2010)는 단계양수시험의 문제점 해석보다는 기초적 적용에만 천착한 부분들도 있다. 양수시험에 관한 가장 최근 연구로는 Kim *et al.* (2012)로 미고결대수층에서 우물 굴착 및 개량이 수리상수에 미치는 영향을 평가하였다. 우물개량 공법인 서지블록과 에어서지의 적용 전후에 단계 및 장기양수시험을 통해 수위강하 및 스킨계수의 감소를 확인하였는 바 미고결대수층에서 우물굴착 시 미세 입자의 유입에 유의해야 함을 지적하였다.

위에서 우리는 국내에서 수행된 양수시험 관련 연구결과를 연대기적으로 살펴보았다. 주요하게는 부산대 함세영 교수팀과 한국농어촌공사 최병수의 기여가 매우 크다고 평가할 수 있다. 특히 함 교수팀은 우리나라의 단열암반특성에 맞는 해석법의 개발에 그리고 최병수는 현업 엔지니어를 위한 실용적 해석방법의 개발에 천착하였다. 그러나 여전히 현업에서는 기초적인 개념모델의 설정, 적절한 해석해의 선택, 커브매칭 혹은 추정된 수리상수의 적절성에 대한 평가에 어려움을 겪고 있다. 특히나 우물저장 효과 및 우물손실효과가 결부된 단공양수시험에서는 이와 같은 실수나 오류가 더욱 흔하다. 아래에서는 기존의 국내연구 성과를 반영한 양수시험 사례해석을 통해 표준적인 고려사항을 제시하고자 한다.

### 3. 양수시험 사례분석

본 연구에서 재분석(revisit)하고자 하는 양수시험 사례는 Lee (1998)와 Lee and Lee (1999)에 보고된 것이다. 양수시험 지역은 강원도 원주시 부론면에 있으며 비교적 평탄한 지형이다. 시험지역의 수리지질층으로 상부토양과 풍화 편마암층(weathered gneiss)이 지표에서 약 1.6 m 깊이까지 나타나며 그 아래 4 m 깊이까지는 풍화를 받지 않은 편마암층이 분포한다. 그리고 34 m 아래에는 비교적 신선한 화강암반층이 나타나며, 그 상부에 이 지역의 주대수층인 단열암반층이 30 m 두께로 분포한다(Lee, 1998; Lee and Lee, 2000b). Lee and Lee (1999)는 관정에서 획득한 코어로그 자료 및 보어홀 이미지(BIPS)자료를 통해 단열밀도가 매우 높고, 그리고 단열방향이 임의적임(random)을 알았으며, 또 예비 양수시험결과 이차원 Theis 특성곡선에 비교적 잘 매칭되는 것을 근거로 이 단열대수층을 연속체로 보는 것이 무방하다고 하였다. 수리지질층의 수직분포로 보았을 때 단열대수층은 피압 혹은 누수의 성격을 보인다(Lee, 1998; Lee and Lee, 1999, 2000a).

이 연구지역에서는 4개의 관정(C-I, PW, C-II, C-III)이 거의 일직선으로 배열되어 있다(see Lee and Lee (1999)). 시험에 관계된 양수정(PW) 상부 5.02 m에 C-I 관측정이 그리고 하부 22.15 m 거리에 C-III 관측정이 있다. 상세한 관정제원은 표 1과 같다. 양수정과 C-I 관측정은 34 m 아래까지 관통되어 있으나 단열이 발달한 본대수층의 범위를 벗어난 깊이이다. 양수시험은 1998년 2월에 실시되었으며 양수정은 PW, 관측정은 C-I과 C-III이다. 양수량은 평균 17.59 L/min (=25.33 m<sup>3</sup>/day), 양수 지속시간은 500분(8.33시간) 그리고 양수회복 관찰시간은 약 600분이었다(test no. 7 in Lee and Lee (1999)). 그러나 본 연구에서는 현업의 일반적인 양수시험 상황을 고려하여 회복자료에 대한 분석은 제외하였다. 그림 1은 본 양수시험을 통해 획득한 양수정과 관측

정에서의 지하수위 변동자료이다. 이 자료에 대한 수리상수 추정에는 윈도우즈용 AQTESOLV<sup>®</sup>(버전 3.50, HydroSLOVE, Inc.)를 이용하였다. 해석하는 현업에서 가장 일반적으로 널리 사용되는 Theis (1935) 법과 Cooper-Jacob (1946) 법을 적용하였다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 연속체 모델 적용

###### 4.1.1 양수정

그림 2는 몇 가지 연속체 해석해를 양수정(PW)에 적용한 결과이다. 기본적으로 자동매칭을 실시한 후에 후반기 자료에 보다 잘 부합하도록 일부 조정하였다. 피압대수층 해석해인 Theis (1935)법을 적용한 그림 2(a)에서 보다시피 초기자료는 우물저장 효과로 특성곡선과 수위강하자료가 잘 매칭되지 않지만 이후 자료는 비교적 잘 부합한다. 이때 수평 대수직수리전도도 이방성은 없는 것( $K_z/K_r=1$ )으로 해석하였는데 이를 0.1, 0.01

로 변화시키며 해석해본 바 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 이 해석해로 추정된 투수량계수는  $0.4681 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 저류계수는 1.476이다. 저류계수의 경우 이론적, 실제적 범위를 크게 벗어나므로 신뢰성이 없다.

그림 2(b)는 Cooper-Jacob (1946)법을 적용한 결과이다. 후반기 자료에 부합하도록 한 결과 투수량계수  $0.4476 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 저류계수는 1.522로 추정되었다. 이 역시 저류계수는 신뢰할 수 없다. 이 그림에서는 Theis 법에서 잘 보이지 않던(로그축 때문에 부각이 잘 안됨) 후반기 자료의 해석해와의 분리(deviation)가 잘 드러나는데 이는 하천경계, 영향반경 확대에 따른 고투수성 매질 혹은 상부대수층 누수의 영향으로 볼 수 있는데(Seong *et al.*, 2005), 여기서는 수리지질층 분포 및 자연수위 등을 고려하였을 때 누수에 의한 것으로 평가하였다(Lee, 1998; Lee and Lee, 2000a). 이는 Hantush-Jacob (1955)과 같은 누수 해석해를 적용하였을 경우 의견상 보다 매칭이 잘 되는 것으로도 일부 뒷받침된다(그림 2(c);  $T=0.3967 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=1.834$ ). 한편 보정

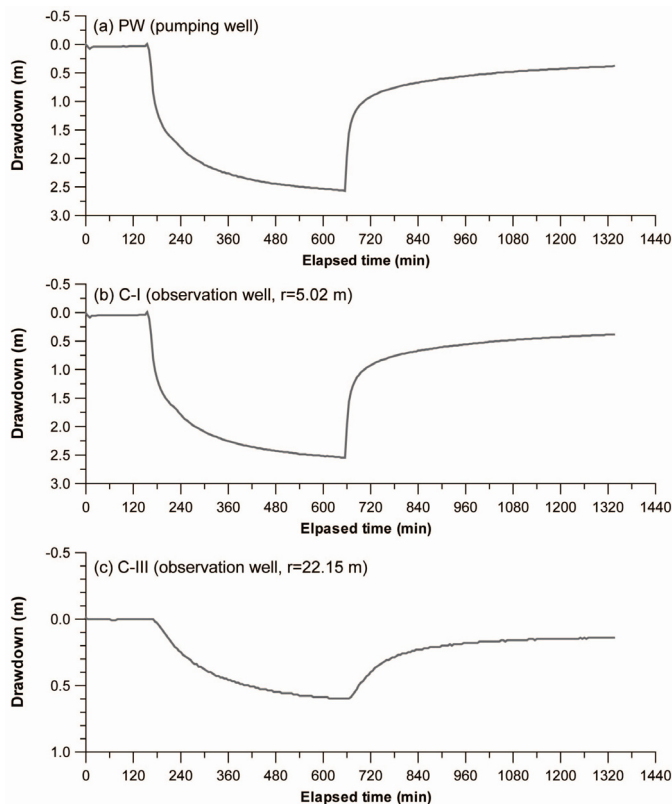


Fig. 1. Drawdowns measured at (a) pumping well, (b) C-I observation well and (c) C-III observation well in the pumping test. Data are from Lee (1998) and Lee and Lee (1999).

수위를 이용하는 자유면 대수층 Theis해의 경우 피압대수층에 비해 매칭이 다소 불량한 것으로 나오나 추정 수리상수( $T=0.401 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=2.186$ )는 거의 유사하다.

양수정 지하수위 강하에 대해 몇 가지 해석해를 적용한 결과 본 대수층에 대해서는 연속체 모델의 적용이 전반적으로 가능함을 파악하였고 투수량계수의 경우 어떤 해를 적용해도 비교적 안정적인 값이 추정되었으나 저류계수는 신뢰할 수 없다. 다만 양수정의 경우 완전히 해결되지 않은 우물저장효과 그리고 고려하지 못한 우물손실 등의 영향이 있으므로 투수량계수에 대해서도 관측정 분석 결과를 이용하여 다시 평가해볼 필요는 있다.

#### 4.1.2 관측정

그림 3은 관측정(C-I과 C-III)에 피압대수층 Theis (1935)법과 Cooper-Jacob (1946)법을 적용한 결과

이다. C-I은 양수정에서 5.02 m나 이격한 관측정임에도 불구하고 마치 양수정과 유사한 우물저장 영향이 있는 것처럼 나타났다. 실제로 이 관측정은 양수정과 거의 완벽에 가깝게 일치한다(그림 1 양수반응 참조; Lee and Lee, 1999). 그러므로 양수정과 동일하게 우물저장 영향(물론 우물손실도 있다)이 있다는 전제로 Theis해에 후반기 자료를 매칭하면  $T=0.4673 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=6.05 \times 10^{-4}$ 로 추정된다(그림 3(a)). 그리고 Cooper-Jacob해로는  $T=0.4605 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=6.09 \times 10^{-4}$ 으로 나와 두 해의 결과가 거의 일치한다(그림 3(b)). 투수량계수의 경우 양수정의 그것과 매우 유사하며 저류계수의 경우 피압대수층의 그것에 매우 부합한다. 그런데 만약 일반적인 관측정으로서 우물저장 효과가 없다고 생각하고 초기자료에 주로 매칭을 한다면(그림 4), Theis의 경우  $T=0.2015 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=1.35 \times 10^{-3}$ ,

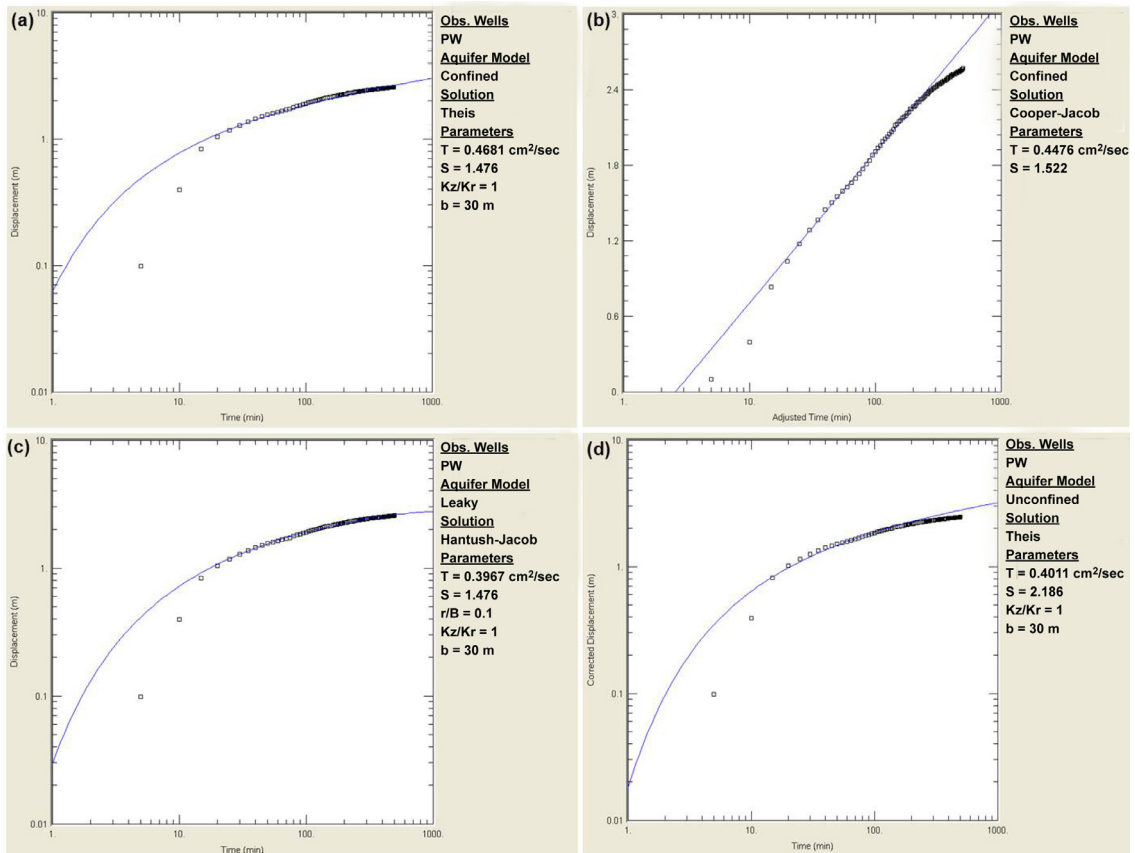


Fig. 2. Curve matching and estimated parameters for drawdown at the pumping well using (a) confined Theis (1935), (b) confined Cooper-Jacob (1946), (c) unconfined Theis (1935) and (d) leaky Hantush-Jacob (1955) solutions.

그리고 Cooper-Jacob은  $T=0.3538 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=8.85 \times 10^{-4}$ 으로 추정되었다. 이 경우에도 피압대수층의 수리상수로 큰 문제가 없어 보이지만 전체적 매칭으로 바람직하지는 않다.

그림 3(c)와 3(d)는 22.15 m 이격한 C-III 관측정의 수위강하를 각각 Theis와 Cooper-Jacob법에 매칭한 결과이다. 근접한 C-I 관정에 비해 비교적 초기 자료의 매칭이 좋으나(우물저장 효과 없으므로) 여전히 후반기 자료는 특성곡선과의 분리를 보여 누수의 영향으로 사료된다. Theis법에 의한 추정 수리상수는  $T=0.8957 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=9.98 \times 10^{-4}$  그리고 Cooper-Jacob법에 의해서는  $T=1.039 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $S=7.94 \times 10^{-4}$ 이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 C-J법이 Theis법에 의해 투수량계수가 크게 추정되었으나(양수정 제외; Young, 1998; Lee and Lee, 1999) 그 차이는 C-I에서는 75%, 그리고 C-III에서는 16%로 크지 않다. 상

보적 관계에 있는 저류계수는 그와 반대현상을 보인다. 그런데 저류계수는 피압대수층에 매우 부합하는 값이 도출되었다.

표 2는 상기 분석을 정리한 것이다. 양수정(PW)은 관측정(C-III)에 비해 투수량계수가 1/2 정도로 작게, 반대로 저류계수는 1000배 이상 크게 추정되었다(이것은 양수정과 수리적 연결성이 매우 탁월하여 양수정과 거의 동일한 난류에 의한 우물손실을 보인 C-I 관측정을 제외한 설명이며 Lee and Lee (1999)에서 이들 비선형 우물손실을 보정한 결과 현재보다 4배 정도 큰 투수량계수가 산정됨). 물론 양수정의 저류계수는 신뢰할 수 없으며 무시하여야 한다. 그러나 양수정의 투수량계수는 양수정의 우물저장 효과 및 복잡한 우물손실에도 불구하고 실무적으로 받아들일 만한 수준으로 볼 수 있다. 이는 단공양수시험의 경우 양수정에서 얻은 투수량계수에 대한

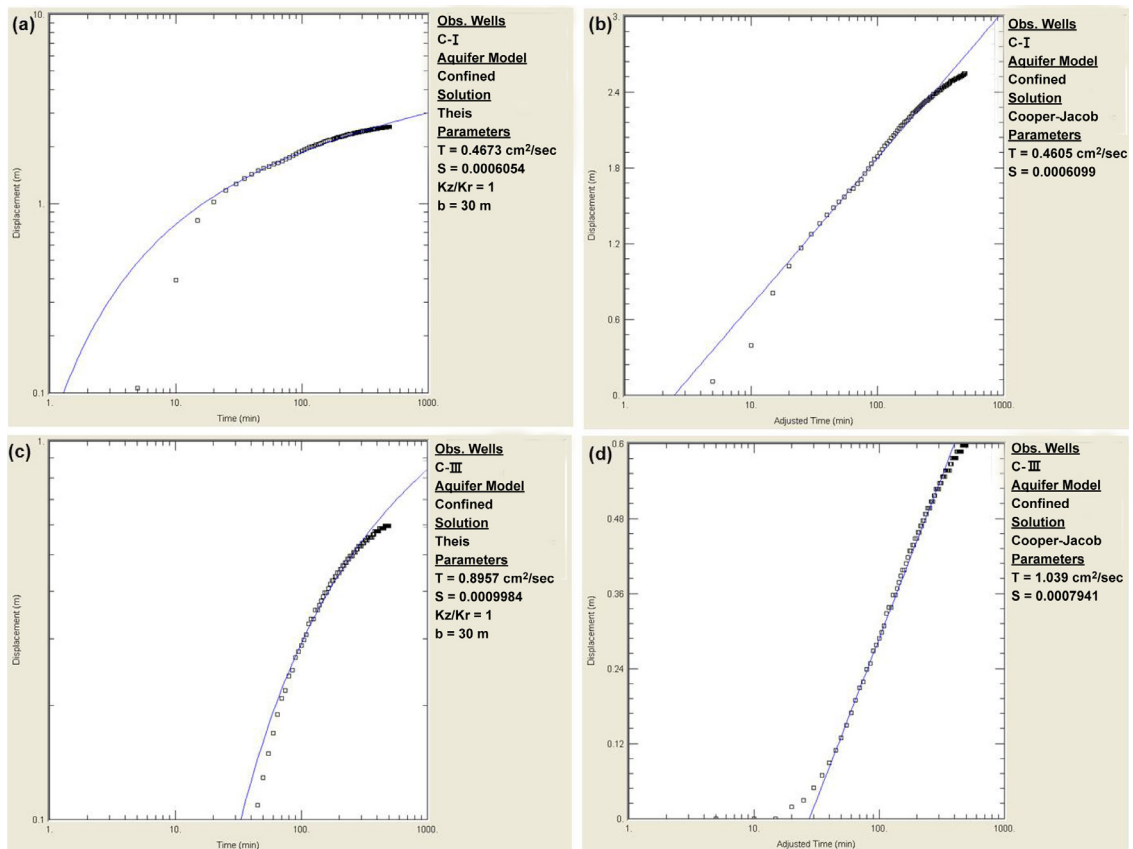


Fig. 3. Curve matching and estimated parameters for drawdowns at the observation wells, C-I and C-III using confined Theis (1935) ((a) and (c)), and confined Cooper-Jacob (1946) solutions ((b) and (d)).



판단이 어떠한지 여부를 잘 보여준다.

**4.2 실무적 제언**

상기한 기존의 연구와 구체적 사례 그리고 다양한 경험을 통하여 아래와 같은 기술적 제언이 가능하다.

1) 양수시험 해석 시 해당 대수층에 대한 가용한 (수리)지질자료를 검토하여 연속체 모델의 적용이 가능(층적대수층 혹은 단열암반대수층, 단열의 발달정도, 방향성 등)한지 판단한다. 예비적으로 Theis법 등의 매칭을 통해 적용가능성을 평가하는 것도 유용하다.

2) 현실적으로 연속체 모델을 적용할 수밖에 없는 상황이라면 이들의 매칭에 주의하는 것이 필요하다. 수리시험 전산프로그램으로 해석할 때 자동매칭에 지나치게 의존하지 말고 이후 매뉴얼(비주얼) 매칭으로 보완하는 것이 바람직하다. 단열암반대수층 시험자료의 경우 이상적인 매칭은 현실적으로 불가능하다는 것도 유념할 필요가 있다.

3) 단공양수시험이라도 구한 투수량계수는 실무적 수준에서 신뢰할 수 있다. 다만 우물저장 영향을 배제하기 위하여 가능하면 Cooper-Jacob법으로 분

석하되 초기 자료에 매칭은 피하고, 이 방법은 특히 자유면 대수층에서 실제보다 2배 이상 과다 산정될 수 있음에 유의해야 한다(Halford *et al.*, 2006).

4) 관측정이 없는 단공양수시험에서 구한 저류계수는 신뢰성이 없다. 그러므로 굳이 이 시험으로 저류계수를 추정하고자 많은 노력을 하는 것은 비효율적이다. 현실적 대안(관측정이 있는 인근지역 양수 시험자료 등)이 없다면 Driscoll (1979)의 지적처럼 피압대수층의 저류계수 0.0005 그리고 자유면대수층은 0.1로 추정하는 것도 무방하다.

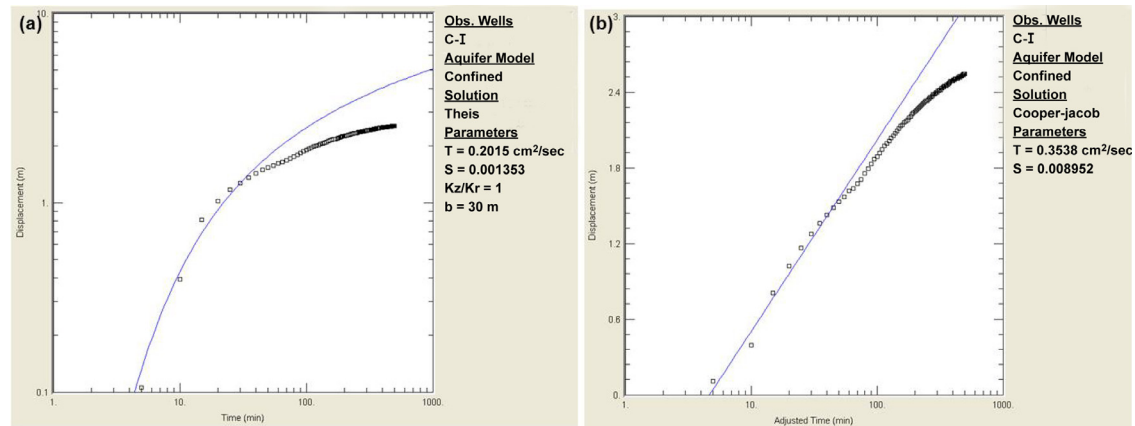
5) 한편 상기 방법으로 수리상수 추정이 완료되면 해석해와의 매칭이 완벽하더라도 해당 수리상수값이 이론적 범위 내에 있는지 평가한다. 합리적인 범위 내에 있지 않다면 처음으로 돌아가 대수층 개념 모델의 설정부터 다시 검토하는 것이 필요하다.

**5. 결론**

본 연구에서는 우리나라에서 그 동안 수행된 양수시험에 관한 연구를 연대기적으로 살펴보았다. 기

**Table 2.** Estimated hydraulic parameters using some selected approaches.

Well	Theis (1935)		Cooper-Jacob (1946)		Explanation
	T (cm <sup>2</sup> /sec)	S	T (cm <sup>2</sup> /sec)	S	
PW	0.4681	1.476	0.4476	1.522	
C-I	0.4673	6.05×10 <sup>-4</sup>	0.4605	6.09×10 <sup>-4</sup>	
	0.2015	1.35×10 <sup>-3</sup>	0.3538	8.85×10 <sup>-4</sup>	Early data
C-III	0.8957	9.98×10 <sup>-4</sup>	1.0390	7.94×10 <sup>-4</sup>	



**Fig. 4.** Curve matching and estimated parameters for the observation well, C-I, with an emphasis on the early data.



존의 해석해들이 연속체 매질을 대상으로 개발되어 복잡한 우리나라 단열암반 대수층에의 적용성에서 문제점이 노출되었다. 그러나 몇몇 연구자들에 의해 암반 대수층에서의 지하수 흐름특성을 반영할 수 있는 해석법이 제안되었고 그에 따른 학술적 진전 또한 적지 않았다. 그러나 이와 같은 연구결과들은 학술적 분야가 아닌 엔지니어링 현업에서 손쉽게 활용하기에는 기술적 어려움이 있다. 실제로 현업에서는 연속체 모델을 적용할 수 있는지부터 어떤 것이 적절한 매칭인지가 더 문제가 되고 있는 상황이다. 이에 본 연구에서는 현실적으로 많이 사용하고 있는 두 해석법을 적용하여 기존 양수시험자료를 분석하는 과정을 제시하였고 또 그에 따른 몇 가지 기술적 유의점을 제시하였다. 본 연구결과가 현업에서 기술적 도움이 되기를 희망한다.

## 사 사

본 연구는 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2012-0002628/No. 2010-0001449). 기술적 내용에 대해 깊이 있는 토론을 해주신 대수성시험 전문가 캔자스지질조사소(KGS)의 James Butler 박사께 감사드립니다. 유익한 수정의견을 주신 채병곤 편집위원장님, 한국농어촌공사 김기업 부장님, 한국지질자원연구원 김구영 박사님 그리고 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

## REFERENCES

- Choi, B.S., 1998, A method to investigate an aquifer using single well pumping test. *Technical Journal of Agricultural Engineering*, 60, 1-15 (in Korean).
- Choi, B.S., 1999, Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju island. *Journal of the Korean Society Groundwater Environment*, 6, 180-187 (in Korean with English abstract).
- Choi, B.S., 2007, A method for storativity compensation in single well test analysis. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12, 36-43 (in Korean with English abstract).
- Choi, B.S., 2008, On the generalized empirical equation for effective wellbore radius. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13, 15-20 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.J., Sung, W.M. and Hahn, J.S., 1993, Analysis of pumping test data and the prediction of drawdown for Daejong-Chun area. *Journal of Korean Industrial and Mining Geology*, 26, 541-549 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.M., Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Jun, S.C. and Kwon, H.P., 2010, Estimation of optimal pumping rate, well efficiency and radius of influence using step-drawdown tests. *The Journal of Engineering Geology*, 20, 127-136 (in Korean with English abstract).
- Chung, S.Y., Kim, B.W., Kim, G.B. and Kweon, H.W., 2009, Effects of well parameters analysis techniques on evaluation of well efficiency in step-drawdown test. *The Journal of Engineering Geology*, 19, 71-79 (in Korean with English abstract).
- Cooper, H.H.Jr. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions, American Geophysical Union*, 27, 526-534.
- Dawson, K.J. and Istok, J.D., 1991, *Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests*. Lewis Publishers, Michigan, 344 p.
- Driscoll, D.K., 1979, *Ground Water and Wells*. Johnson Division, Saint Paul, 1089 p.
- Halford, K.J., Weight, W.D. and Schreiber, R.P., 2006, Interpretation of transmissivity estimates from single-well pumping aquifer tests. *Ground Water*, 44, 467-471.
- Hamm, S.Y., 1987, Pumping test analysis using a portable micro computer. *The Journal of the Geological Society of Korea*, 23, 109-119.
- Hamm, S.Y., 1994, Hydraulic parameter evaluation by sensitivity analysis of constant and variable rate pump test in leaky fractal aquifer. *The Journal of Engineering Geology*, 4, 311-319.
- Hamm, S.Y. and Lim, J.U., 1994, Computing hydraulic parameters of fractured aquifers using fractal model of groundwater flow with leakage. *The Journal of Engineering Geology*, 4, 219-229 (in Korean with English abstract).
- Hamm, S.Y., Kim, H.C. and Lim, J.U., 1998a, Hydraulic property of groundwater flow controlled by vertical geologic structure and its field example. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 5, 101-109 (in Korean with English abstract).
- Hamm, S.Y., Lim, J.U., Bae, D.J. and Chwae, U.C., 1998b, A study on the determination of optimal yield from fissured aquifers. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 5, 21-29 (in Korean with English abstract).
- Hamm, S.Y., Cheong, J.Y., Ryu, S.M., Kim, M.J. and Kim, H.S., 2002, Hydrogeological characteristics of bank

- storage area in Daesan-Myeon, Changwon city, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 595-610 (in Korean with English abstract).
- Hantush, M.S., 1962, Flow of groundwater in sands of non-uniform thickness: 3. Flow to wells. *Journal of Geophysical Research*, 67, 1537-1544.
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E., 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions of American Geophysical Union*, 36, 95-100.
- Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions, ASCE*, 112, 1047-1070.
- Jo, Y.J., Lee, J.Y., Jun, S.C., Cheon, J.Y. and Kwon, H.P., 2010, Estimation of hydraulic parameters from slug, single well pumping and step-drawdown tests. *The Journal of Engineering Geology*, 20, 203-212 (in Korean with English abstract).
- Kang, L.S., Hamm, S.Y., Choi, S.J. and Lee, B.D., 2003, Hydrogeologic property of bedrock aquifer of Mockcheon area applying several pumping tests analyses. *The Journal of Engineering Geology*, 13, 67-82 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.W. and Kim, G.B., 2009, Effect of a monitoring well design on estimated hydraulic parameters in pumping test for unconsolidated sediments. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 787-797 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.W., Kim, G.B. and Kim, G.Y., 2012, Change of hydraulic characteristics due to well drilling and well development in an unconfined aquifer. *The Journal of Engineering Geology*, 22, 27-27 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.Y., Lee, C.W., Kim, Y. and Woo, N.C., 2003, Hydraulic analysis of fractured rock aquifer using a simplified model based on aquifer test. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 359-370 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.Y., Kang, D.H., Kim, S.S., Kim, B.W. and Kwon, B.H., 2008, The scale-dependent of hydraulic conductivity in leaky confined aquifer with high permeability at the Ttaan isle, Gimhae city. *The Journal of Engineering Geology*, 18, 415-422 (in Korean with English abstract).
- Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A., 1990, *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. ILRI Publication, Wageningen, The Netherlands, 377 p.
- Labadie, J.W. and Helweg, O.J., 1975, Step-drawdown test analysis by computer. *Ground Water*, 13, 438-444.
- Lee, C.W., Lee, D.H., Jeong, J.G., Kim, K.Y. and Kim, Y., 2002, Well loss in fractured rock formation with radial flow during pumping test. *Journal of KoSSGE*, 7, 17-23 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., 1998, Use of field observations to characterize a fractured porous aquifer system in Won-Ju, Korea. M.S. thesis, Seoul National University, Seoul, 114p.
- Lee, J.Y., 2010, Problems in determining optimal discharge using step-drawdown tests. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 485-495 (in Korean with English abstract).
- 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, 692-700.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000a, A general solution of determining storage coefficient from multi-step pumping test recovery data. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 7, 20-23.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000b, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 229, 190-201.
- Lee, J.Y., Song, S.H. and Lee, K.K., 2005, Effects of selected time on analysis results in step-drawdown tests. *Journal of KoSSGE*, 10, 59-65 (in Korean with English abstract).
- Moench, A.F., 1985, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. *Water Resources Research*, 21, 1121-1131.
- Neuman, S.P., 1975, Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, 11, 329-342.
- Papadopoulos, I.S. and Cooper, H.H., 1967, Drawdown in a well of large diameter. *Water Resources Research*, 3, 241-244.
- Seong, H., Kim, Y., Lee, C.W., Kim, K.Y. and Woo, N.C., 2005, Analysis of aquifer test data in fractured aquifers and the application of the generalized radial flow. *Economic and Environmental Geology*, 38(2), 177-185 (in Korean with English abstract).
- 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 Geophysical Union*, 16, 519-524.
- Young, S.C., 1998, Impacts of positive skin effects on borehole flowmeter tests in a heterogeneous granular aquifer. *Ground Water*, 36, 67-75.

---

투 고 일 : 2014년 4월 10일

심 사 일 : 2014년 4월 14일

심사완료일 : 2014년 5월 27일