

# 압축성이 큰 지반에서 순간변위(충격)시험 해석을 위한 선형 커브피팅법(Linear Curve Fitting Methods)의 적용

## Application of Linear Curve Fitting Methods for Slug Test Analysis in Compressible Aquifer

최 항 석<sup>1</sup> Choi, Hangseok

이 철 호<sup>2</sup> Lee, ChulHo

웡 텐 바오<sup>3</sup> Nguyen, The Bao

### Abstract

The linear curve fitting methods such as the Hvorslev method and the Bouwer and Rice method provide a rapid and simple means to analyze slug test data for estimating in-situ hydraulic conductivity ( $k$ ) of geologic material. However, when analyzing a slug test in a relatively compressible aquifer, these methods have difficulties in fitting a straight line to the semi-logarithmic plot of the test data that shows a concave-upward curvature because the linear curve fitting methods ignore the role of the compressibility or specific storage ( $S_s$ ) of an aquifer. The comparison of the Hvorslev method and the Bouwer and Rice method is made for a partially-penetrating well geometry to show analytically that the Hvorslev method estimates higher hydraulic conductivity than the Bouwer and Rice method except that the well intake section locates very close to the bottom of the aquifer. The effect of fitting a straight line to the slug test data is evaluated along with the dimensionless compressibility parameter ( $a$ ) ranging from 0.001 to 1. A modified linear curve fitting method that is expanded from Chirlin's approach to the case of a partially penetrating well with the basic-time-lag fitting method is introduced. A case study for a compressible glacial till is made to verify the proposed method by comparing with a type curve method (KGS method).

### 요 지

Hvorslev법이나 Bouwer and Rice법과 같은 선형 커브피팅법은 대수층의 현장 투수계수를 구하기 위해 실시하는 순간변위시험 혹은 순간충격시험(slug test) 결과를 효과적이고 간편하게 해석하도록 한다. 그러나, 대수층의 압축성이 클 경우, 순간변위시험의 결과가 반대수 그래프에서 선형적이지 않고 상향으로 오목한 곡선 형태를 갖게 되므로, 대수층의 압축성을 무시하는 기존의 선형 커브피팅법은 이런 경우에 그대로 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 두 선형 커브피팅법을 부분 관통된 우물의 경우에 대하여 비교 분석하여 대부분의 경우에 Hvorslev법이 Bouwer and Rice법에 비하여 과다하게 현장 투수계수를 산정함을 보였다. 또한, 각기 다른 커브피팅 방법에 따른 순간변위시험 해석결과를 무차원 압축 매개변수( $a$ )의 범위 0.001에서 1까지에 대하여 비교 분석하였다. 마지막으로, 압축성이 큰 대수층의 순간 변위시험 해석을 위하여 Chirlin의 방법을 부분 관통된 우물의 형상을 고려할 수 있도록 확장하여 수정된 선형 커브피팅법을 제시하였다. 제안된 방법의 현장 적용성을 검토하기 위해 빙적토 대수층에서 실시된 순간 변위시험 결과를 이용하여 사례분석을 하였다.

**Keywords :** Bouwer and Rice method, Compressible aquifer, Hvorslev method, Linear curve fitting, Slug test

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil, Environ. and Architectural Engrg., Korea University, hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

2 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environ. and Architectural Engrg., Korea University)

3 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environ. and Architectural Engrg., Korea University)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

순간변위(충격)시험은 대수층의 현장 투수계수 산정에 간편하게 적용할 수 있어 여러 분야에서 폭넓게 사용되어지고 있다. 순간변위시험은 우물 케이싱내의 수위를 순간적으로 상승 또는 하강시켜 시간에 따른 케이싱내의 수위 회복을 측정하여 투수변화율을 산정하고 이를 분석하여 현장 투수계수를 산정한다.

순간변위시험에서 물의 흐름은 지반의 압축성 혹은 비저유계수(sepecific storage)에 기인한 비정상류를 형태를 보인다. 이는 순간변위시험을 통한 투수계수 산정을 보다 복잡하게 만드는 요인이 된다. 순간변위시험을 해석하는 방법에는 Cooper법(Cooper et al. 1967; Papadopoulos et al. 1973)과 KGS법(Kansan Geological Survey: Hyder 1994; Hyder and Butler 1995)과 같이 대수층의 압축성을 고려하여 산정하는 type curve법이 있고, 이와는 대조적으로 단순히 지하수의 흐름을 정상류로 가정한 Thiem Equation에 의존하여 대상지반의 압축성으로 인한 비정상 흐름을 무시한 선형 커브피팅법이 있다. Hvorslev법(Hvorslev 1951)과 Bouwer and Rice법(Bouwer and Rice 1976; Bouwer 1989)들이 이 선형 커브피팅법 범주에 속한다.

본 연구에서는 현장 투수계수를 구하기 위한 순간변위시험에서 커브피팅법의 범주에 속하는 Hvorslev법과 Bouwer and Rice법을 비교 분석 하였다. 투수계수 산정시 동일한 커브피팅법에 대하여 상기 두 방법에서 제안한 다른  $\ln(R_e/r_w)$ 값을 적용하였다. 일반적으로 압축성을 고려한 시간에 따른 우물내 수위회복 관계는 반대수 그래프상에서 상방향으로 오목한 형태를 갖기 때문에 이를 제안된 커브피팅 방법들에 의해 선형화하여 해석에 적용하였다. 동일한 순간 변위시험 결과에 대하여 선형화 시키는 피팅법에 따라서 다른 투수계수가 산정되도록 한다. 순간변위시험 결과 해석시, 대수층의 압축성을 고려하기 위한 Chirlin(1989) 방법을 부분 관통된 우물 형상을 고려할 수 있도록 확장한 수정된 선형 커브피팅법을 본 논문에서 제시하였다.

## 2. 선형 커브피팅법

Hvorslev법과 Bouwer and Rice법은 순간변위시험시 우물로 들어오고 나가는 지하수의 흐름을 정상류라 가정한 Thiem Equation에 기반을 두고 대상 지반의 압축

성을 무시한 근사법이다. 이런 단순화된 해석에서는 우물 케이싱내에서 수위  $H(t)$ 가 시간에 따라 지수함수로 변하며, 그 수위의 변화율을 각 시간별로 우물 케이싱내의 수위에 비례한다고 가정한다(Dax, 1987):

$$H(t) = H_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

그림 1은 부분 관통(partially penetrated)하는 우물에서 순간변위시험의 개략도를 나타내고 여기서  $H_0$ 는 우물 케이싱내 초기수위( $t=0$ )이고,  $t$ 는 순간변위시험이 시작 후 경과된 시간이다.

여기서  $\lambda$ 는 임의의 양의 계수이고 그림 1의 순간변위시험의 기하학적인 조건을 고려하여 식 (2)로 표시할 수 있다.

$$\lambda = \frac{2L_w k t}{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)} \quad (2)$$

여기서 유효반경( $R_e$ )은 순간변위시험 도중 방사방향으로 수위변화의 한계선을 의미하는 등가의 반경으로 정의된다. Hvorslev법과 Bouwer & Rice법에서는 이 유효반경이 오직 우물의 형상조건에만 의존한다고 보았다. 식 (2)의  $\lambda$ 를 (1)에 대입하여 투수계수의 항으로 나타내면 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$k = -\frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2L_w} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right) \quad (3)$$

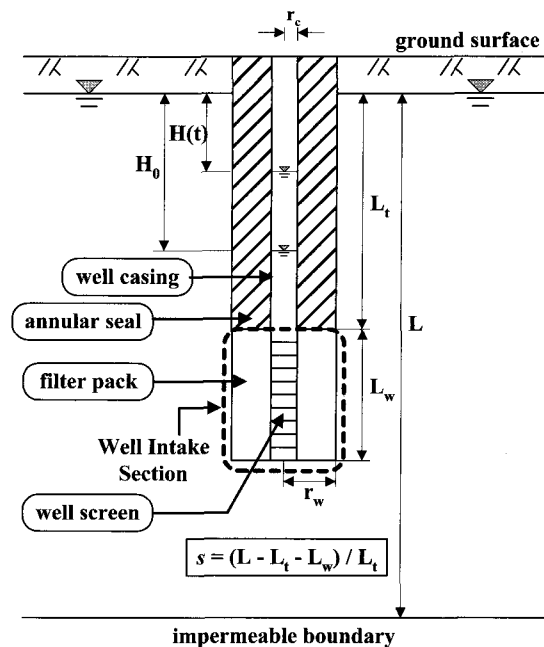


그림 1. 비피압 대수층에서 순간 변위시험의 개략도

우물의 기하학적 형태가 주어지면 순간변위시험의 결과를 반대수 그래프에 표시한 선형화된 곡선의 기울기를 통해  $\ln(H(t)/H_0)/t$  값을 구할 수 있다.

### 3. Hvorslev법 vs. Bouwer and Rice법

Hvorslev(Hvorslev, 1951)법은 지하수 흐름의 기하학적 조건에 따라 경험적인  $\ln(R_e/r_w)$  값들을 제시하고 있다. 특히, 부분 관통된 우물의 경우, Hvorslev는 등방조건에 대하여  $\ln(R_e/r_w)$  값을 다음의 식 (4)로 표시하였다.

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \ln\left(\frac{1}{2} \frac{L_w}{r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2} \frac{L_w}{r_w}\right)^2}\right) \quad (4)$$

$\ln(R_e/r_w)$  값은 오직 우물의 유입부(well intake section) 형상에만 관련되어 있으며 수평방향과 수직방향의 경계를 무한하다는 가정하에 얻어진다.

Bouwer and Rice(Bouwer and Rice 1976; Bouwer 1989)법은  $R_e$  값을 각각의 기하학적인 조건에 대한 전기저항 네트워킹 상사로 구하며, 대수층에서 부분 관통이나 완전 관통 우물에 대하여 각각 식 (5)와 (6)의  $\ln(R_e/r_w)$  항으로 표현된다. 여기서  $s$ 는 대수층 상하부 경계와 우물 유입부의 상대적 위치를 나타내는 무차원 값으로 우물 유입부의 위치에 따라 0부터  $\infty$ 까지 값을 갖는다.

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left\{ \frac{1.1}{\ln\left[\frac{L_w}{r_w} \left(\frac{L}{L_w} + s\right)\right]} + \frac{A + B \ln\left[\frac{L_w}{r_w} \left(\frac{s}{s+1}\right) \left(\frac{L}{L_w} - 1\right)\right]}{\frac{L_w}{r_w}} \right\}^{-1} \quad (5)$$

여기서,  $s = \frac{L - (L_t + L_w)}{L_t}$  이다.

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left\{ \frac{1.1}{\ln\left[\frac{L_w}{r_w} \frac{L}{L_w}\right]} + \frac{C}{\frac{L_w}{r_w}} \right\}^{-1} \quad (6)$$

$A$ 와  $B$ ,  $C$  계수는 우물의 형상비( $L_w/r_w$ )와 관련된 함수이고 Bouwer and Rice(1976)는 이 값들을 그래프로 제

시하였고, Butler(1998)는 이 계수들을 적절한 다항식으로 표현 하였다.

식 (5)의  $\ln(R_e/r_w)$  값은 대수층 상부와 하부의 경계조건의 영향을 받으므로 우물의 형상비( $L_w/r_w$ ) 뿐만 아니라  $L/L_w$ 비와  $s$ 값의 함수가 된다. 대수층 상부 경계조건은 순간변위시험이 진행되는 도중에 지하수위가 일정하게 유지되도록 하고 대수층 바닥은 수직방향 흐름이 없는 경계조건(no flux)을 적용하였다. 완전 관통 우물인 경우 식 (6)에서와 같이  $\ln(R_e/r_w)$  값은  $s$ 의 함수로 표현되지 않는다( $s=0$ ).

본 논문에서는 투수계수를 산정할 때 사용되는 기존의 두 가지 선형 커브피팅법을 비교 분석하였다. 이 두 가지 방법의 차이점은 반대수 그래프상에 순간변위시험 결과를 직선으로 표시할 때  $\ln(R_e/r_w)$  값을 산정하는 데 있다. 그러므로  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$  비는  $\ln(R_e/r_w)_{Hvorslev}/\ln(R_e/r_w)_{B-R}$  비와 같다고 볼 수 있다(여기서 B-R은 Bouwer and Rice법을 의미한다.).  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 의 경향은 그림 2와 3, 4에서  $L_w/r_w$  와  $L/L_w$ ,  $s$ 에 따라서 나타내었다. 부분 관통 우물인 경우에,  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 는 식 (4)와 (5)를 비교해서 얻을 수 있다. 그림 2에서는 우물의 유입부분이 대수층 중간부분에 위치할 때( $s=1$ ),  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 와  $L_w/r_w$ 의 관계가 3가지 다른  $L/L_w(=5, 11, 30)$ 값에 대해서 표시되었다.  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 의 최대값은  $L_w/r_w=5$ 인 부분에서 나타나며  $L_w/r_w$  값이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 모든 우물 형상비에 대하여, Hvorslev법은 항상 Bouwer and Rice법에서 구한 투수계수보다 큰 값을 가지는 것으로 나타난다. 특히,  $L/L_w$  값이 작을 수록 Hvorslev법이 Bouwer

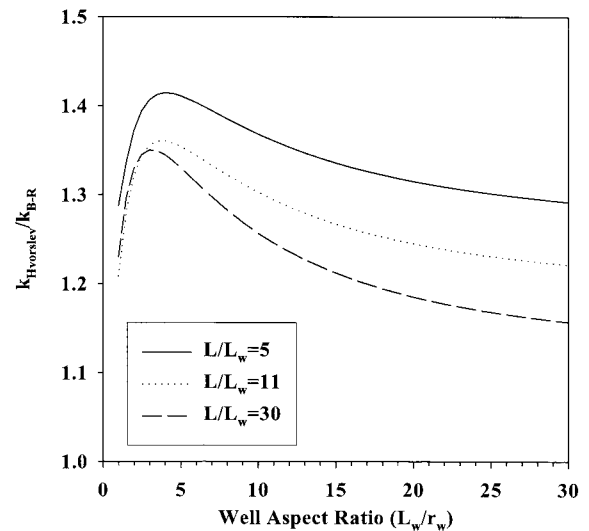


그림 2. Hvorslev법과 Bouwer and Rice법에서  $L_w/r_w$ 의 영향( $s=1$ ,  $L/L_w=5, 11, 30$ )

and Rice법에 비해 투수계수가 더 크게 산정한다.

그림 3에서는  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 와  $L/L_w$ 의 관계를  $s=1$ 일때, 4가지  $L_w/r_w$ (=5, 10, 15, 20)값에 대해 비교하였다.  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 은  $L_w/r_w$ 이 작을때 크게되며,  $L/L_w$ 이 증가함에 따라 점차 감소한다. 마찬가지로,  $L/L_w$ 의 전 구간에서  $k_{Hvorslev}$ 값이  $k_{B-R}$ 값 보다 크게 나타난다. 우물 유입부의 상대위치에 따른 영향은 그림 4(a)와 (b)에 표시하였다. 그림 4(a)에서,  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 와  $s$ 의 관계를  $L_w/r_w=10$ 에 대하여 3가지 다른  $L/L_w$ 값에 대하여 표시하였다. 그림 4(b)에서는,  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 와  $s$ 의 관계를  $L/L_w=11$ 에 대하여 4가지 다른  $L_w/r_w$ 값에 대하여 표시하였다. 이 두 가지 비교에서, 우물 유입부의 위치가 지하수위에 접근함에 따라(즉,  $s$ 가 증가함에

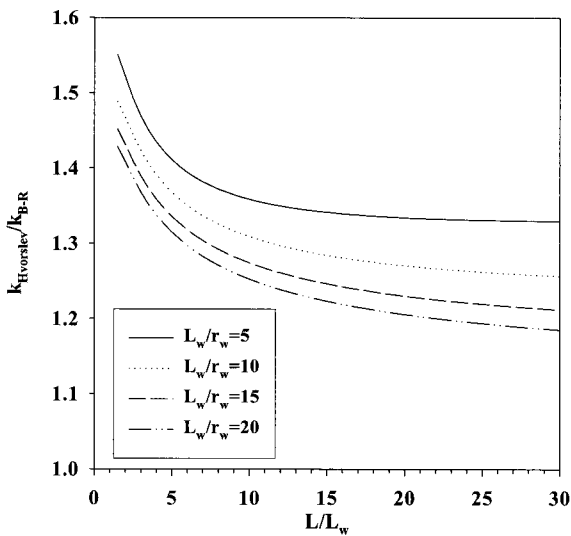
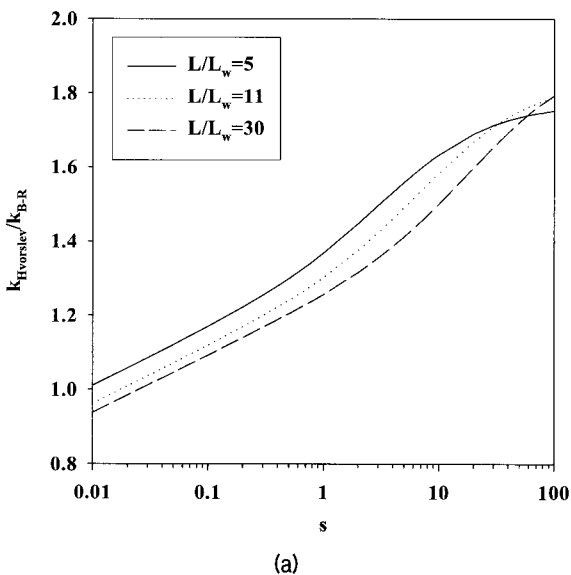


그림 3. Hvorslev법과 Bouwer and Rice법에서  $L/L_w$ 의 영향( $s=1$ ,  $L_w/r_w=5, 10, 15, 20$ )



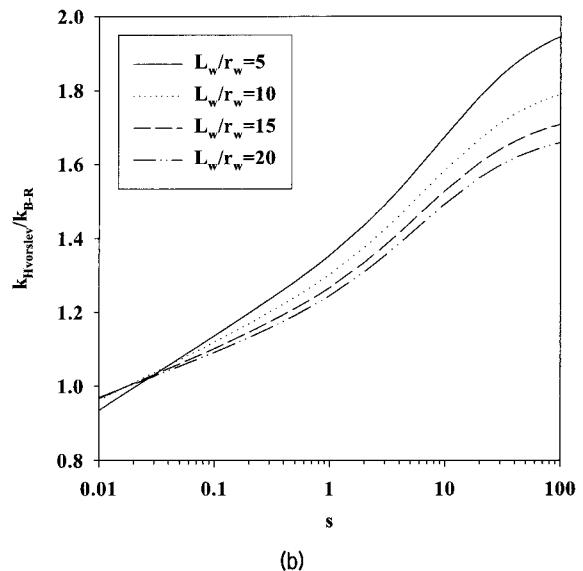
(a)

따라)  $k_{Hvorslev}/k_{B-R}$ 값은 점차 증가함을 알 수 있다. 매우 작은  $s$ 값( $s<0.01$ )을 제외한 모든 범위에서 Hvorslev법으로 구한 투수계수 값이 Bouwer and Rice법으로 구한 값 보다 크게 평가되었다.

일련의 그림 2와 3, 4를 통해서  $s$ 값이 매우 작을때(그러나 이 범위는 현장에서는 적용되지 않는 범위임)를 제외하고는 Hvorslev법이 Bouwer and Rice법에 비해 순간변위시험을 통한 투수계수를 과대하게 평가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향이 발생하는 이유는 각 방법마다 대수층의 상부와 하부 경계의 조건을 다르게 가정하기 때문이다. Hvorslev법은 대수층의 두께가 우물 유입 부분의 길이에 비해 상대적으로 작거나( $L/L_w$ 값이 작을때), 또는 유입부가 지하수위에 근접해 있을때( $s$ 가 클때)에는 투수계수를 과다하게 산정하는 경향이 있으므로, 이런 경우에는 Hvorslev법이 적합하지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 Hvorslev법이 Bouwer and Rice법에 비해 투수계수가 크게 산정되는 경향에 대해서는 Ferris and Kowles(1963)나 Boutler(1996)등의 다른 문헌에서도 보고되고 있다.

#### 4. 피팅방법의 비교 분석

Hvorslev법 또는 Bouwer and Rice법은 순간변위시험을 통한 현장 투수계수 값을 산정하기위해 반대수 그래프에서 상방향으로 오목한 시간-수위 관계를 직선형으로 맞추는 선형 커브피팅법을 적용한다. 만약 압축성이 큰 대수층의 경우는 곡선의 곡률이 커서 단순한 선형



(b)

그림 4. Hvorslev법과 Bouwer and Rice법에서  $s$ 의 영향: (a)  $L/L_w=5, 11, 30$ 이고  $L_w/r_w=10$  일때; (b)  $L_w/r_w=5, 10, 15, 20$ 이고  $L/L_w=11$ 일때

회귀방법을 사용하기에는 무리가 있다. 대수층의 압축성에 따른 곡물의 크기는 그림 5에 도식되었으며, 이때  $\alpha$ 는 무차원의 압축 매개변수이고( $\alpha = S_s L_w r_w^2 / r_c^2$ ),  $\beta$ 는 무차원의 시간 매개변수이다( $\beta = k L_w t / r_c^2$ ). 그림 5에서  $\alpha$ 값의 범위는 0.001에서 1.0사이로 고려되었다. 임의의 우물형상( $r_w = 10\text{cm}$ ,  $r_c = 2.54\text{cm}$ ,  $L_w = 100\text{cm}$ )에 대하여 선택된  $\alpha$ 값의 범위를 비저류계수( $S_s$ )로 표현하면  $6.45 \times 10^{-7}$ 과  $6.45 \times 10^{-4}\text{cm}^{-1}$ 값이 된다. 일반적인 점토의  $S_s$ 값은  $10^{-6}$ 에서  $10^{-4}\text{cm}^{-1}$ 범위, 그리고 모래에서는  $10^{-7}$ 에서  $10^{-5}\text{cm}^{-1}$  범위를 갖는다(Freeze and Cherry 1979). 따라서, 본 논문에서 선택된  $\alpha$ 값의 범위는 일반적인 대수층의 압축성을 대표한다고 볼 수 있다.

곡선으로 나타나는 순간변위시험 결과를 직선으로 피팅하기 위해, 일반적으로 3가지 방법이 고려되어진다. 먼저, Hvorslev(1959)가 제안한 basic time lag formulation인  $H(t)/H_0=1.0$  과 0.37의 두 점을 피팅에 사용하는 방법이다. 두 번째 방법은 곡선형태의 시험결과를 두 개의 직선 성분으로 가정하고, 두 번째 직선부분을 피팅에 사용한다. 두 번째 접근 방법은 순간 변위시험 도중 지하수위가 우물의 유입부 보다 낮게 되는 경우(즉,  $L_t$ 가 아주 작은 경우), 시험결과를 분석하기 위해 제안되었는데(Bouwer 1989), Butler(1996)는  $L_t$ 가 충분히 큰 값을 가질 경우에도 경험적으로 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. Butler(1996)는  $H(t)/H_0$ 의 피팅 범위를 Hvorslev법의 경우에는 0.25에서 0.15, Bouwer and Rice법의 경우에는 0.3에서 0.2로 제안하였다. 마지막 피팅방법은 전체 데이터를 회귀분석을 통해 선형화 하는 방법이다. 이

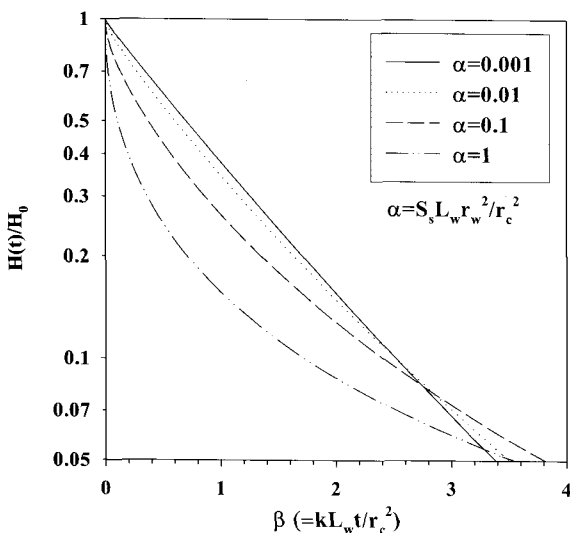


그림 5. 압축성을 고려한 순간 변위시험 결과의 곡물 비교( $L_w/r_w = 10$ ,  $L/L_w = 11$ ,  $s = 1$ )

방법은 일반적으로 많이 적용되는 방법이나, 회귀분석에 적용할 데이터값의 범위 산정에 대해 아직 신뢰할 수 없다는 문제점이 있다.

압축성이 큰 대수층에서 순간변위시험을 통한 투수계수 산정시, 전술한 피팅방법들을 비교하여 그림 6에 나타냈다. KGS법으로 얻어진 순간 변위시험 데이터 값을 커브피팅한 6가지 직선들이 그림 6에서 비교되고 있다. 첫 번째 방법을 적용할 때, 즉 비교적 초기시간의 값을 피팅에 고려하여 두 쌍의 피팅 범위가 선택되었다:  $H(t)/H_0=1.0-0.5$ 와  $H(t)/H_0=1.0-0.37$ (즉, Hvorslev가 제안한 basic time lag formulation). Butler(1996)가 제안한 두 번째 피팅방법을 적용하기 위하여, 두 가지 다른 쌍의 피팅 범위를 선택하였다. Hvorslev법에 대해서는  $H(t)/H_0=0.5-0.4$ 와 0.25-0.15, Bouwer and Rice법에 대해서는  $H(t)/H_0=0.5-0.4$ 와 0.3-0.2). 마지막 피팅방법에서는, 선형회귀분석을  $H(t)/H_0=1.0-0.1$ 와 1.0-0.3의 두 가지 데이터 범위에 대하여 실행하였다.  $H(t)/H_0=1.0-0.1$ 에 대한 선형회귀분석은 순간변위시험에서 우물 케이싱내 수두가 90%까지 회복되는 시간범위에 대한 것이고,  $H(t)/H_0=1.0-0.3$ 의 경우는 수두회복이 70%까지의 범위에서 회귀분석이 수행되었다.

본 논문에서는 순간변위시험을 통한 현장 투수계수 산정에 있어서, 각 피팅방법을 비교하기 위하여  $R(=k_{best-fitting}/k_{real})$ 값을 고려하였다. 여기서,  $k_{best-fitting}$ 값은 제안된 피팅방법들에 의해 산정된 투수계수를 의미하고,  $k_{real}$ 는 KGS법에서 순간 변위시험을 모사하기 위해 적용된 실제 투수계수를 의미한다. KGS법으로 합성된 시험

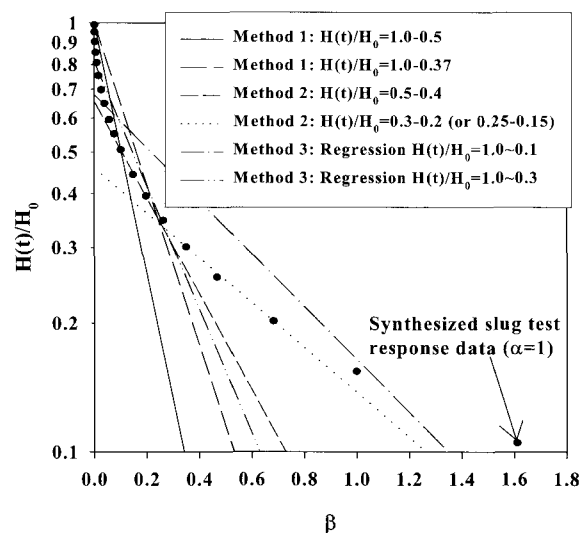


그림 6. 선형 커브피팅 방법의 비교: 합성된 순간 변위시험 결과는 KGS방법을 적용 ( $L_w/r_w = 10$ ,  $L/L_w = 11$ ,  $s = 1$ )

결과는 실제 시험결과를 모사한다고 가정된다. 따라서 R값은 일반적인 피팅방법에서 에러율을 나타내며, 앞에서의  $\beta$ 값과 식(3)에 의해 식(7)로 표현될 수 있다.

$$R = \frac{k_{best-fitting}}{k_{real}} = \frac{\ln\left(\frac{R_c}{r_w}\right) \ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right)}{2\beta} = -1.152 \ln\left(\frac{R_c}{r_w}\right) \frac{\log\left(\frac{H(t)}{H_0}\right)}{\beta} \quad (7)$$

전술한 대로,  $\ln(R_c/r_w)$ 값은 대수층에서 우물형상에 따라 결정되고  $\log(H(t)/H_0)/\beta$ 는 커브피팅한 직선의 기울기이다.

대수층에서  $L_w/r_w = 10$ ,  $L/L_w = 11$ ,  $s = 1$ 과 같은 임의의 우물형상에 대하여(Hvorslev법에 대하여  $\ln(R_c/r_w) = 2.303$  그리고 Bouwer and Rice법에 대하여  $\ln(R_c/r_w) = 1.775$ ), 세 가지 피팅방법을 그림 7에 비교하였다.  $\alpha$ 값에 대한  $R(k_{best-fitting}/k_{real})$ 값의 경향을 Bouwer and Rice법에 대하여 그림 7(a)에, 그리고 Hvorslev법에 대하여 그림 7(b)에 각각 도식하였다. 비교적 압축성이 작은 대수층(즉, 작은  $\alpha$ 값)에서는 Bouwer and Rice법이 적용된 모든 피팅방법에 대해 투수계수가 약 10% 정도 과소평가한다. 그러나, 압축성이 큰 대수층(즉, 큰  $\alpha$ 값)에서는 피팅방법들 간의 오차 폭이 크다.

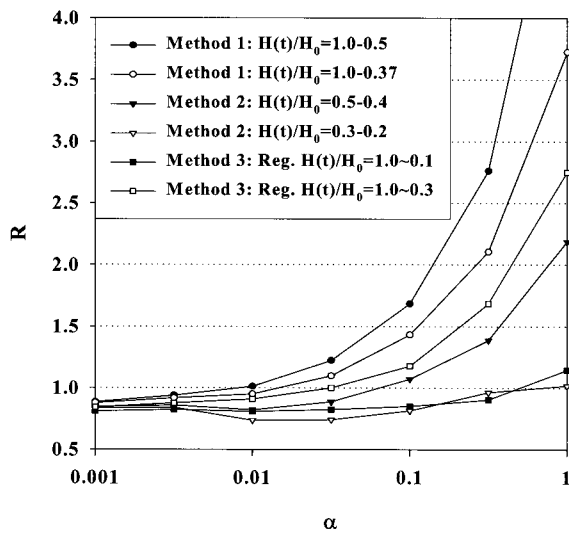
비교적 초기시간의 데이터를 강조한 첫번째 피팅방법에서는  $\alpha$ 값이 작을 경우, 데이터가 직선에 가까워 R값에 거의 영향을 주지 못한다. 하지만,  $\alpha$ 값이 큰 경우에는 Bouwer and Rice법은 투수계수를 매우 과대하게 산정한다. 예를 들면, 피팅범위를  $H(t)/H_0=1.0-0.37$ 로 한

경우,  $\alpha=1$ 일 때  $R=3.7$ 이다. 따라서, Hvorslev가 제안한 basic time lag formulation은  $\alpha$ 값이 클 경우에는 큰 오차를 유발 한다.

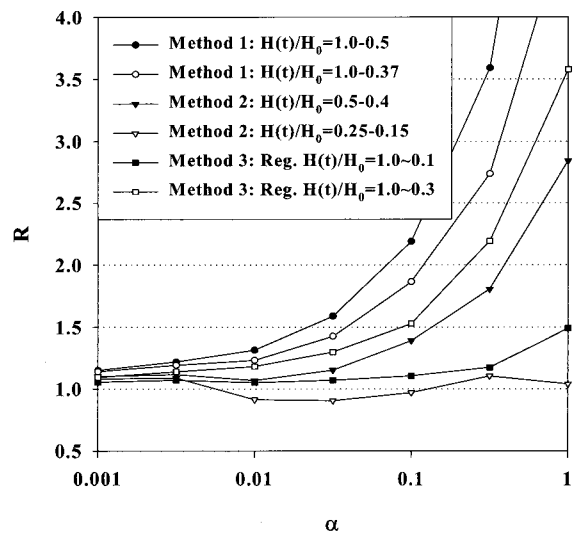
두 번째 피팅방법에서는 피팅 범위가  $H(t)/H_0=0.5-0.4$  경우, 첫 번째 피팅방법과 유사한 경향을 보여준다. Butler(1996)가 Bouwer and Rice법에 대해 추천한 피팅 범위  $H(t)/H_0=0.3-0.2$ 인 경우는 R값이 모든  $\alpha$  범위에서 1에 근접한다. 따라서, 순간변위시험 결과를 Bouwer and Rice법으로 해석할 때 Butler(1996)의 제안이 실제 투수계수와 유사한 값을 줄 수 있음을 알 수 있다.

세 번째 피팅방법에서 선형회귀분석시 두 가지 다른 데이터 범위( $H(t)/H_0=1.0-0.1$ 과  $1.0-0.3$ )에 대하여 상이한 경향을 보여준다. 우물 케이싱내 수두회복이 90%까지 순간 변위시험을 계속한다면 회귀분석시 데이터 범위를  $H(t)/H_0=1.0-0.1$  까지 이용할 수 있고, 이 경우 R값은 0.8에 근접한다. 이 사실은 모든  $\alpha$  범위에서 오차가 20%미만임을 의미한다. 그러나 현장에서 순간변위시험을 진행할 때 시간제약을 받게 되고 따라서 70%까지 수두회복만 기록했다면,  $H(t)/H_0=1.0-0.3$  범위에서 선형회귀분석을 실시해야 한다. 이때, 큰  $\alpha$ 값에 대한 R값이 약 1.5에서 2.5 값을 갖는다. 선형회귀분석이 순간 변위시험 결과를 피팅하는 가장 일반적인 방법이나, 고려하는 데이터 범위에 따라 잘못된 결과를 얻을 가능성이 있다.

전술한 바와 같이, Hvorslev법과 Bouwer and Rice법의 차이는 오직 각각의 방법에 의해 산정된  $\ln(R_c/r_w)$ 값에 있다. 따라서 Hvorslev법에서 R은  $\ln(R_c/r_w)_{Hvorslev} / \ln(R_c/r_w)_{B-R}$ 의 비율을 각 커브피팅 방법으로 구한 Bouwer and Rice



(a) Bouwer & Rice법



(b) Hvorslev법

그림 7. 압축성에 따른 에러율  $R(k_{best-fitting}/k_{real})$  비교 ( $L_w/r_w = 10$ ,  $L/L_w = 11$ ,  $s = 1$ )

법의 R값에 곱해서 얻을 수 있다. 예를 들면, 임의의 우물 형상( $L_w/r_w=10, L/L_w=11, s=1$ )에 대하여  $\ln(R_e/r_w)_{Hvorslev} / \ln((R_e/r_w)_{B-R})$ 는  $2.303/1.775 \approx 1.3$  이다. 따라서, Bouwer and Rice법의 R값에 1.3배 만큼 상향으로 이동 시키면 Hvorslev 법에 대한 R값을 그림 7(b)와 같이 산정할 수 있다. 가장 일반적으로 사용하는 basic time lag formulation은 Hvorslev 법에서 상대적으로 압축성이 큰 대수층에 대해 투수계수가 상당히 과대평가됨을 알 수 있다. Butler(1996)가 추천한 커브피팅 범위  $H(t)/H_0=0.25-0.15$ 에서 Hvorslev 법은 거의 모든  $\alpha$ 범위에서 투수계수 산출 시 오차율 20% 미만의 좋은 결과를 보여준다.

### 5. 수정 선형 커브피팅법

압축성이 큰 대수층에서 순간변위시험 결과는 반대수 그래프상에서 상방향으로 오목한 형태를 보이기 때문에 대수층의 압축성을 무시하는 Hvorslev법이나 Bouwer and Rice법과 같은 기존의 선형 커브피팅법으로는 시험 결과를 적절하게 해석하기 어렵다. 이는 대수층의 압축성을 무시하는 기존의 선형 커브피팅법에서는 유효반경( $R_e$ )이 오직 우물의 형상에만 의존 한다고 보기 때문이다.

Chirlin(1989)는 대수층의 압축성을 고려하여 완전 관통 우물의 순간변위시험 결과를 해석할 수 있는 선형 커브피팅법을 제시하였다. Chirlin은 Cooper법(Cooper et al. 1967; Papadopulos et al. 1973)의 해를 완전 관통 우물의 경우에 대한 정해로 보고 Hvorslev의 basic time lag formulation을 커브피팅에 적용하였다. 수정된 유효반경( $R_e$ )은 식(7)에서  $R=1$ 인 경우(즉,  $k_{best-fitting} = k_{real}$ )를 만족하는 값으로 이를 식(3)의 유효반경( $R_e$ )을 대신하여 대입함으로써 투수계수를 구하도록 한다. 따라서, 수정 유효반경은 우물형상 이외에 대수층의 압축성에 의존한다. 본 논문에서는 Chirlin이 제안한 방법을 압축성이 큰 대수층에서 부분 관통 우물에 대하여 수정 확장하였다. 수정된  $\ln(R_e/r_w)$ 는 식(7)에서  $R=1$ 로 뒀으므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{R_e'}{r_w}\right) = -\frac{2\beta}{\ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right)} = -\frac{0.868}{\log\left(\frac{H(t)}{H_0}\right)/\beta} \quad (8)$$

여기서,  $\log(H(t)/H_0)/\beta$ 는 피팅한 직선의 기울기이므로  $\ln(R_e'/r_w)$ 는 임의의 피팅방법에 따라 결정된다. 본 논문

에서는 피팅을  $H(t)/H_0=1.0$ 과 0.37을 잇는 직선(즉, Hvorslev가 제안한 basic time lag formulation)을 적용하였다. 따라서, 식(8)은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\ln\left(\frac{R_e'}{r_w}\right) = 2\beta_{0.37} \quad (9)$$

여기서,  $\beta_{0.37}$ 은  $H(t)/H_0=0.37$ 일 때  $\beta$  값이다.  $\beta_{0.37}$ 가  $\alpha$ 의 함수이므로  $\ln(R_e'/r_w)$ 도  $\alpha$ 의 함수가 된다. 압축성이 큰 대수층에 부분 관통된 임의의 우물형상( $L/L_w=11, s=1$ )에 대한  $\ln(R_e'/r_w)$ 의 분포가 우물 형상비( $L_w/r_w=5, 10, 15, 20$ )에 대해  $\alpha$ 의 함수로 그림 8에 도식되었다.

그림 8에서 구한 대수층의 압축성을 고려한  $\ln(R_e'/r_w)$ 를 식(3)에서  $\ln(R_e/r_w)$ 을 대신하여 대입하면 현장 투수계수를 구할 수 있다. 본 논문에서 제안된 수정 선형 커브피팅법의 해석절차는 다음과 같다;

- (1) 적절한 실내시험이나 문헌을 통해 대수층의 압축성( $S_s$ )을 구한다.
- (2) (1)에서 구한  $S_s$ 와 우물의 형상조건을 고려하여  $\alpha$ 를 계산한다.
- (3) 측정된 우물의 형상비( $L_w/r_w$ )와  $\alpha$ 에 따라 그림 8에서  $\ln(R_e'/r_w)$ 을 보간법으로 구한다.
- (4)  $\ln(R_e'/r_w)$ 을 식(3)에서  $\ln(R_e/r_w)$  대신 대입하여 투수계수를 산정한다.

해석의 간편성을 위하여 본 논문에서는  $H(t)/H_0=1.0$ 과 0.37을 잇는 직선(즉, Hvorslev가 제안한 basic time lag

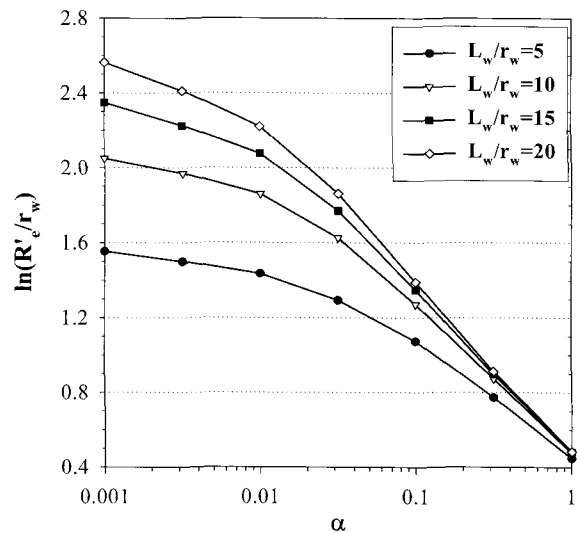


그림 8. 부분 관통 우물의 형상비에 대한  $\ln(R_e'/r_w)$  ( $L/L_w = 11, s = 1$ )

formulation)을 사용하여  $\ln(R_e/r_w)$ 를 구했으나, 앞에서 언급한 여러가지 피팅방법들을 식(8)을 이용하여 수정된 선형 커브피팅법에서 적용할 수 있다.

### 6. 수정 선형 커브피팅법의 적용성 검토(사례분석)

본 논문에서는 미국 Illinois주 Wilsonville의 빙적토로 구성된 대수층에서 수행된 순간변위시험 결과를 수정된 선형 커브피팅법으로 재해석하고 이를 기존의 방법들과 비교함으로써 제안된 방법의 적용성을 검토하였다. 대상지역은 Vandalia Till이라 명명된 투수계수가 일반적으로  $1.2 \times 10^{-8}$ 에서  $7.4 \times 10^{-8}$  cm/sec 범위의 빙적토로 구성되어 있다(Herzog, et al., 1989). 이 지역의 현장 투수계수 산정을 위하여 약 40여회의 순간 변위시험이 수행을 수행하였다. 수행된 순간 변위시험결과 중 AP-2로 명명된 경우를 본 논문의 사례분석으로 적용하였다. 해석에 고려된 대수층의 지질조건 및 우물형상은 표 1에 요약되었다. 주어진 조건에 대하여 현장 투수계수를 본 논문에서 제시한 수정 선형 커브피팅법과 KGS 법으로 각각 산정하여 비교하였다. 두 방법에 의한 투수계수 산정 과정은 그림 9 (a)와 (b)에 각각 도식했다.

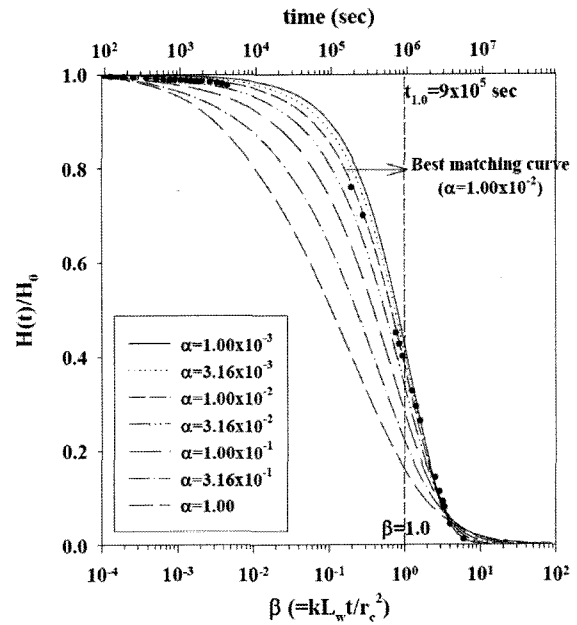
Type curve법의 일종인 KGS법을 적용하기 위해 AP-2 순간 변위시험 결과를 일련의 type curve들과 일치성 여부를 평가한 결과,  $\alpha=1.0 \times 10^{-2}$ 에 근접하고, 이로부터  $\beta=1.0$ 에 해당하는  $t=9.0 \times 10^5$  sec가 그림 9(a)와 같이 결정된다.  $\beta$ 값의 정의로부터 현장 투수계수는  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec로 산정된다.

수정된 선형 커브피팅법을  $H(t)/H_0=1.0$ 과  $0.37$ 을 잇는 직선으로 피팅할 경우, basic time lag( $t_{0.37}$ )이  $1.0 \times 10^6$  sec 이고 KGS법에서 얻어진  $\alpha=1.0 \times 10^{-2}$ 를 적용하면,  $\ln(R_e/r_w)$ 는 그림 8에서 AP-2의 우물형상비  $L_w/r_w=14$ 에 대한 보간법으로 약 2.05로 산정된다.  $\ln(R_e/r_w)=2.05$ 를 식(3)에 대입하여 산정된 현장 투수계수는  $9.5 \times 10^{-8}$  cm/sec이다.

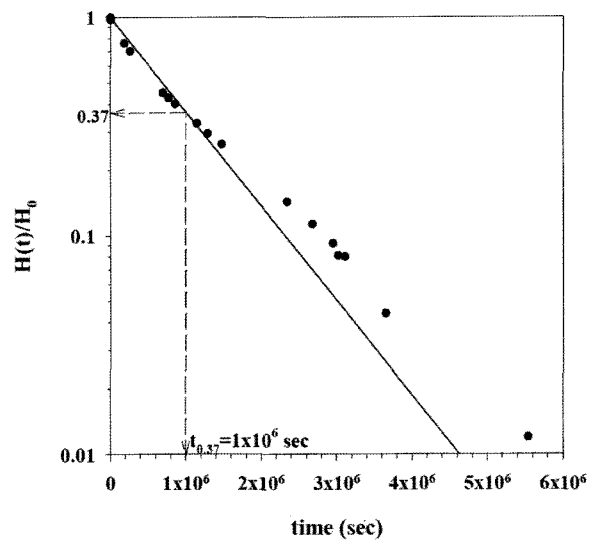
전술한 두 방법을 통해 산정한 AP-2의 현장 투수계수는 오차범위 5% 이내로 잘 일치한다. 한편, 기존의 Hvorslev 법을 적용할 경우 주어진 우물형상에 대해  $\ln(R_e/r_w)$ 값이 2.63이고 이로부터 산정된 현장 투수계수는  $1.2 \times 10^{-7}$  cm/sec이다. 기존의 Hvorslev법은 대수층의 압축성을 무시함으로써 현장 투수계수 산정시 압축성을 고려하는 type curve 법이나 본 논문에서 제시한 수정 선형 커브피팅법에 비하여 투수계수가 20-25% 정도 과대 평가함을 알 수 있다.

표 1. AP-2 사례의 지질조건 및 해석조건

기하학적 변수	값	참고	
우물	$r_c$	2.54 cm	5-cm 내경의 PVC파이프
	$r_w$	5.04 cm	필터팩을 고려한 우물유입부의 반경
	$L_w$	70 cm	필터팩을 고려한 우물유입부의 길이
빙적토 대수층	$L$	1000 cm	-
	$L_t$	465 cm	-
해석변수	$L_w/r_w$	13.9	$L_w/r_w=14$ 적용
	$L/L_w$	14.3	$L/L_w=11$ 적용 ( $L/L_w > 7$ 경우 차이가 미미함)
	$s$	1	우물유입부가 대수층 중앙에 위치한다고 가정



(a)



(b)

그림 9. AP-2 사례에 대한 현장 투수계수 산정과정; (a) KGS법, (b) 수정 선형 커브피팅법



## 7. 결론

- (1) 부분 관통하는 우물에 대해 Hvorslev법과 Bouwer and Rice법을 비교하면 우물 유입부가 대수층의 하부 불투수층과 매우 근접해 있는 경우를 제외하고, 보통 전자가 후자보다 투수계수를 과대평가하는 경향이 있다.
- (2) 압축성이 큰 대수층에서 순간 변위시험을 실시하면 상방향으로 오목한 곡선 형태를 갖는 수두회복 그래프를 얻는다. 이 그래프에 대해 선형 커브피팅을 적용하여 현장 투수계수를 산정하게 된다. 세 가지 커브피팅 방법들 동일한 우물 형상에 대하여 비교한 결과, 오차  $R(k_{best-fitting}/k_{real})$ 의 범위는 대수층의 압축성과 커브피팅 방법에 따라 다양하게 나타났다.
- (3) Boutler(1996)가 제안한 Hvorslev법에 대한 피팅범위 ( $H(t)/H_0 = 0.25 - 0.15$ )와 Bouwer and Rice법에 대한 피팅범위( $H(t)/H_0 = 0.3 - 0.2$ )는 순간 변위시험을 통하여 압축성이 큰 대수층의 투수계수 산정 시에도 유효하게 적용할 수 있다.
- (4) 본 연구에서는 Chirlin(1989)이 제안한 대수층의 압축성을 고려한 완전 관통우물에 대한 선형 커브피팅법을 부분 관통우물에 까지 적용할 수 있도록 수정 확장하였다. 주어진 사례분석을 통해 제안된 수정 선형 커브피팅법의 적용성을 검토한 결과, 순간 변위시험 결과로부터 산정된 현장 투수계수가 대수층의 압축성을 고려할 수 있는 type curve법의 일종인 KGS법과 비교하여 5% 이내의 오차범위를 보였다. 따라서, 본 논문에서 제안된 수정 선형 커브피팅법은 대수층의 압축성이 크고 부분관통 우물의 경우에, 순간 변위시험 결과로부터 현장 투수계수 산정 시, 유용하게 적용될 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 GS건설-고려대 베트남 장학금과 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의

지원을 받아 수행된 연구(신진교수지원연구-기초과학 분야-D00477)의 일부이며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. Bouwer, H. (1989), "The Bouwer and Rice Slug Test-An Update", *Ground Water*, Vol.1.27, No.3, pp.304-309.
2. Bouwer, H., and Rice, R. C. (1976), "A Slug Test for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifer with Completely or Partially Penetrating Wells", *Water Resource Research*, Vol.12, No.3, pp.423-428.
3. Butler, J. J. (1996), "Slug Tests In Situ Characterization: Some Practical Consideration", *Environmental Geoscience*, Vol.3, No.2, pp.154-163.
4. Butler, J. J. (1998), *The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests*, Lewis Publishers.
5. Chirlin, G.R. (1989), "A critique of the Hvorslev method for slug test analysis: The fully penetrating well", *Ground Water Monitoring Review*, Vol.9, No.2, pp.130-138.
6. Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D., and Papadopoulos, I. S. (1967), "Response of a Finite-diameter Well to an Instantaneous Charge of Water", *Water Resource Research*, Vol.3, No.1, pp.263-269.
7. Dax, A. (1987), "A Note on the Analysis of Slug Tests", *Journal of Hydrology*, Vol.91, pp.153-177.
8. Ferris, J. G., and Knowles, D. B. (1963), "The Slug-injection Test for Estimating the Coefficient of Transmissibility of an Aquifer", *Methods of Determining Permeability, Transmissibility, and Drawdown*, US Geological Survey Water Supply Paper, pp.229-304.
9. Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979), *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc.
10. Herzog, B.L., R.A. Griffin, C.J. Stohr, L.R. Follmer, W.J. Morse, and W.J. Su. (1989), *Investigations of failure mechanisms and migration of organic chemicals at wilsonville, Illinois*, Report in Illinois State Geological Survey.
11. Hvorslev, M. J. (1951), *Time Lag and Soil Permeability in Ground-water Observation*, *Waterways Experiment Station*, Bulletin No. 36, Corps of Engineering, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi.
12. Hyder, Z. (1994), *Analysis of Slug Tests in Partially Penetrating Wells*, Ph. D. Thesis, University of Kansas.
13. Hyder, Z., and Butler, J. J. (1995), "Slug Tests in Unconfined Formations: An Assessment of the Bouwer and Rice Technique", *Ground Water*, Vol.33, No.1, pp.16-22.
14. Papadopoulos, S. S., Bredehoeft, J. D., and Cooper, H. H. (1973), "On the Analysis of Slug Test Data", *Water Resource Research*, Vol.9, No.4, pp.1087-1089.

(접수일자 2007. 5. 2, 심사완료일 2007. 10. 24)