

## 연직차수벽에서 필터케익을 고려한 순간 변위시험 해석시 유선망을 이용한 수정 Bouwer and Rice법의 적용

### Modification of Bouwer and Rice method using flow net to evaluate hydraulic conductivity of vertical cutoff wall considering filter cake development

웡 테 바오<sup>1)</sup>, The Bao Nguyen, 콧태훈<sup>2)</sup>, Taehoon kwak, 안용훈<sup>2)</sup>, Yonghoon An, 최항석<sup>3)</sup>, Hangseok Choi

<sup>1)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea University

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea University

<sup>3)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea University

**SYNOPSIS** : As a conventional line-fitting method, the Bouwer and Rice method has been popularly adopted to estimate the hydraulic conductivity of an aquifer through a slug test. Because a vertical cutoff wall is usually very compressible and features a small wall thickness, the Bouwer and Rice method should be carefully used for the vertical cutoff wall. In addition, a relatively impermeable layer, called a filter cake, formed at the interface between the cutoff wall and the natural soil formation makes it difficult to use the Bouwer and Rice method directly. In order to overcome such limitations, the original Bouwer and Rice method is modified by incorporating the concept of the flow net method. In this modification, the geometry condition of cutoff walls including the filter cake is effectively considered in evaluating the hydraulic conductivity of a vertical cutoff wall.

**Keywords** : Filter cake, Slug test, Vertical cutoff wall, Bouwer and Rice method, flow net method

## 1. 서론

연직 차수벽은 오염지반의 처리방법 중 하나로 지하수의 이동에 의한 오염물의 확산을 효율적으로 막을 수 있다. 연직차수벽의 트렌치 형태는 굴착장비에 따라 정해지는데 특수한 백호우의 경우 깊이 20~25m, 너비 0.5~1.5m까지 굴착이 가능하다. 연직차수벽의 투수계수는 일반적으로  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 를 넘지 않아야 한다(Nguyen The Bao 등 2008).

연직차수벽의 현장 투수계수는 현장에서 순간변위시험(Slug test)을 통해 구할 수 있다(Teeter 와 Clemence (1986), Yang 등. (1993), Britton 등.(2002), Choi 와 Daniel (2006a & b), Choi (2007)). Bouwer and Rice법(Bouwer 와 Rice 1976, Bouwer 1989)은 순간변위시험을 통해 대수층의 투수계수를 예측하는 line-fitting법 중에 하나이다(최항석 등. (2007), choi 등. (2008)). 하지만, 수평방향으로 경계가 무한한 대수층 조건과 좁은 벽체 형태를 갖는 연직차수벽의 경계조건은 Bouwer and Rice법 적용시 큰 차이가 있다. 우물정에서 물이 유입 또는 배출되는 부분은 연직차수벽의 경계가 인접하므로 연직차수벽의 순간변위시험 데이터를 분석하는데 Bouwer and Rice법을 그대로 적용할 수 없다. 이 같은 한계를

극복하기 위해 Teeter 와 Clemence(1986)는 연직차수벽의 투수계수를 추정하는데 유선방법을 써서 Bouwer and Rice법을 수정하였다. Britton 등.(2002)은 연직차수벽의 순간변위 시험에서 쓰는 형상계수를 제안하였고, 최근 Choi 와 Daniel(2006a)은 연직 차수벽의 경계조건을 고려하여 투수계수를 추정하는데 Type curve법과 수정된 line-fitting법을 제안하였다. 또한, Choi(2007)은 수치해석으로 연직차수벽에서 순간변위시험을 모사하는데 효과적인 수치모형을 제안하였다.

연직차수벽의 또 다른 중요한 측면은 연직차수벽과 지반 사이에 존재하는 필터케이크이다. 필터케이크는 상대적으로 불투수막에 가까운 낮은 투수성을 가지고 있어서 연직차수벽의 순간변위시험을 해석할 때 이를 반드시 고려해야 한다. Choi 와 Daniel (2006b)은 연직차수벽과 흙 사이에 있는 필터케이크를 흐름이 없는 경계조건(no flux boundary condition)으로 취급하였다.

본 연구에서는 필터케이크를 포함한 연직차수벽에 Bouwer and Rice법의 수정을 제안하였다. 그리고 필터케이크의 특징을 고려하여 필터케이크를 흐름이 없는 경계조건으로 수치해석 프로그램인 Slug\_3D(Choi 와 Daniel (2006a &b), Choi (2007))에 적용하여 해석을 수행하였다. 연직차수벽과 지면사이에서 필터케이크를 고려한 조건과 고려하지 않은 조건을 각자 유선망 형태로 나타낼 수 있다. 이러한 유선망을 사용한 Teeter 와 Clemence 1986)의 접근방법으로 연직차수벽의 순간변위시험에 대한 Bouwer and Rice법의 오차를 수정하는데 적용할 수 있다.

## 2. 필터 케이크의 특성 및 영향

필터케이크는 연직차수벽 시공 중 연직차수벽과 지반 사이의 경계면에서 형성된다. 연직차수벽을 시공할 때 트렌치의 안정성을 확보하기 위해 주로 6%의 벤토나이트-물 슬러리를 굴착된 프렌치에 채워 넣는다. 필터케이크는 수두차이에 의해서 슬러리입자가 흙 사이로 침투하고 걸려져서 굴착면에 생성되며, 연직차수벽 시공이 완료된 이후에도 제거되지 않고 표면에 부착되어 있을 수 있다. 필터케이크의 형성은 인접한 흙의 형태와 슬러리에 섞여있는 입자크기에 영향을 받는다(Filz 등. (1997), Henry 등. (1998)). 일반적으로 필터 케이크의 투수계수 범위는  $3 \times 10^{-9} cm/s$ 에서  $2 \times 10^{-8} cm/s$ 로 알려져 있다(Henry 등. 1998). 이 범위는 앞서 말한 연직 차수벽의 설계 투수계수인  $1 \times 10^{-6} cm/s$ 보다 매우 작은 값을 알 수 있다.

필터케이크는 투수계수가 매우 작아서 연직차수벽의 전체적인 투수능에 영향을 끼친다. 필터케이크는 연직차수벽의 표면에 생기는 막이며 필터케이크의 유무에 따라 수리학적 경계조건이 달라진다. 따라서 연직차수벽의 투수계수는 필터케이크와 뒤채움재의 복합적인 영향을 받는다. 그러나 투수계수가 작은 필터케이크층의 존재는 연직차수벽 내에서 전체적인 흐름의 경계조건을 바꾸기 때문에 순간변위시험을 통한 연직차수벽의 투수계수 추정에 어려움을 야기한다(Nguyen 등. (2008), Choi 와 Daniel (2006b)). D'Appolonia(1980)은 필터케이크의 두께는 일반적으로 0.3cm이하라고 밝혔다. Britton(2001)은 필터케이크의 중요도를 고려하여 두께의 대푯값으로 0.5cm를 선택했다.

Choi 와 Daniel (2006b)은 연직차수벽에서 필터케이크의 효과를 고려하는 방안을 제시한바가 있다. Slug-3D (Choi 2007)을 이용하여 0.6cm 두께의 필터케이크를 모사하는 수치해석을 통해 필터케이크를 연직차수벽에서 수평흐름이 제한된 경계조건(no flux boundary condition)을 적용함이 타당하다고 밝혔다. 따라서 본 논문에서는 연직차수벽의 필터케이크를 고려하는데 Choi 와 Daniel(2006b)의 연구 결과를 적용하였다.

필터케이크를 고려한 연직차수벽의 순간변위시험 단면도를 그림1에서 볼 수 있다. 연직차수벽의 두께와 깊이는 각각 W와 L로 표기하였다. 연직차수벽의 Y-방향의 길이는 두께, 깊이에 비하여 매우 큰 값을 가진다.  $L_t$ 는 지하수면부터 우물 유입부 까지 거리를 나타내고  $L_w$ 는 필터팩(filter pack)의 길이를 나타낸다. Butler(1996)는 필터팩은 일반적으로 대상 지반에 비해 투수성이 크기때문에 우물 스크린의 필터팩을 통해 물이 흐를 때 저항이 거의 없어 순간변위시험에 영향을 주지 않는다고 밝혔다. 필터팩의 외경과 우물 케이싱의 내경은  $r_w$ 와  $r_c$ 로 나타낸다. 우물케이싱에서 초기수두강하(Rising-head시험)는  $H_0$ 으로 표기하고, 우물케이싱에서 임의의 시간에서의 수두는  $H(t)$ 로 표기하였다.  $H(t)$ 는 점차 감소하

여 순간변위시험 종료시에는 0에 수렴한다. 시험에서 수두의 회복되는 것을 나타내기 위하여, 수두강하를 정규화하여  $H(t)/H_0$ 를 사용한다.

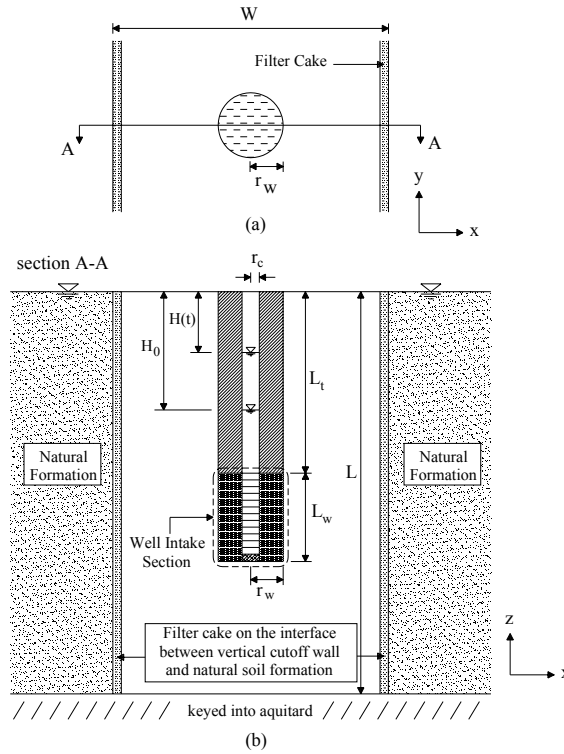


그림 1. 필터케이크가 존재하는 연직차수벽의 순간변위시험 모식도

### 3. 필터케이크를 고려한 연직차수벽의 투수계수 산정 방법

#### 3.1 연직차수벽에서 Bouwer and Rice법 적용

Bouwer and Rice법을 필터케이크를 고려한 연직차수벽의 순간변위시험해석에 적용한 후 정확성을 파악하였다. Slug\_3D(Choi 2007)을 사용하여 임의의 연직차수벽의 투수계수  $k_{real}$ 를 고려하여 순간변위시험을 모사하였다. 필터케이크의 존재는 Choi 와 Daniel (2006b)가 제안한 흐름이 없는 경계조건으로 바꾸어 해석을 수행하였다. 모사된 수두회복 자료로부터 Bouwer and Rice법을 사용하여 연직차수벽의 투수계수  $k_{best-fitting}$  는 다음과 같이 예측할 수 있다.

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

여기서 유효 반경을  $R_e$ 로 나타내며, 이 값은 수평면상에서 수두변화의 경계범위를 의미한다. Bouwer and Rice(1976)는  $R_e$  값을 아래와 같이 예측하였다.

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[ \frac{1.1}{\ln\left[\frac{L_w}{r_w} \left(\frac{L}{L_w} + s\right)\right]} + \frac{A + B \ln\left[\frac{L_w}{r_w} \left(\frac{s}{s+1}\right) \left(\frac{L}{L_w} - 1\right)\right]}{\frac{L_w}{r_w}} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$s = \frac{L - (L_t + L_w)}{L_t} \quad (3)$$

여기서 변수 A, B는 우물 형상비 ( $L_w/r_w$ )에 관련된 함수이며 Bouwer 와 Rice (1976)에 의해 제시되었다. 본 연구에서는 Hvorslev (1951)가 제안한 basic time lag fomulation인  $H(t)/H_0$ 가 1과 0.37 이 되는 점에서 직선을 연결하여 순간변위시험 결과를 분석하였다. 그러므로  $k_{best-fitting}/k_{real}$ 비는 Bouwer and Rice법을 적용할시 발생하는 오차의 범위를 나타낸다. 그림 2는 Bouwer and Rice법을 적용하여 얻은 결과를 비교하여 나타내고 있다.  $k_{best-fitting}/k_{real}$ 비는 Hyder(1994)가 제안한 무차원 압축지수  $\alpha_p (= S_s L_w r_w^2 / r_c^2$ , 여기서  $S_s$ 는 비저류계수(specific storage)를 의미한다)의 함수로 나타내었다. 본 연구에서는  $\alpha_p$ 의 범위를 0.001에서 0.1까지 적용하였다. 그림2에서  $W/r_w$ 가 6, 10, 15인 경우에 대하여 Bouwer and Rice법 적용결과를 비교하면,  $\alpha_p$ 가 0.03보다 작은 값을 가질 때(연직차수벽이 압축성이 비교적 작은 경우) 투수계수는 과소평가 된다( $k_{best-fitting}/k_{real}$ 은 1보다 작다). 연직차수벽의 두께가 작아질수록 과소평가되는 비율도 커진다. 반면에,  $\alpha_p$ 가 0.03보다 클 때(연직차수벽의 압축성이 비교적 큰 경우) 투수계수는 과대평가되는 경향이 있다.

Bouwer and Rice법을 써서 해석한 투수계수가 연직차수벽에서 재질의 압축성이 비교적 적은 경우 ( $\alpha_p < 0.03$ ) 과소평가 되는 것을 지배하는 요소는 연직차수벽의 두께임을 알 수 있다. 연직차수벽에 순간변위 시험을 시행할 때 수두회복에 대한 경계조건의 효과는 양수정의 경계조건의 효과와 유사하다. 양수문제의 가상-우물이론(Ferris 1959)에서는 필터케이크가 존재하는 연직차수벽의 경계조건을 흐름이 없는 경계조건으로 나타낼 수 있다. 이 조건은 대수층의 경우와 비교해서 수두의 회복이 느려지게 된다. 순간변위시험에서는 수두회복이 늦어질수록 투수계수는 작게 평가된다.

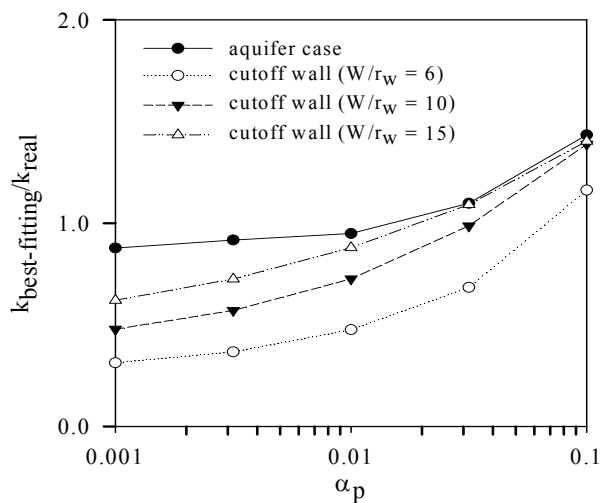


그림 2. Bouwer and Rice법으로 해석한 필터케이크를 고려할 때 연직차수벽의 순간변위시험 결과

$$(L_w/r_w = 10, L/L_w = 11)$$

### 3.2 유선망을 적용한 필터케이크 존재시 수정 Bouwer and Rice법

대부분의 순간변위시험의 우물 형상비( $L_w/r_w$ )는 10보다 커서(EMCON 1995, Butler 1998)(그림 1)우물의 유입/유출부(필터팩)에서 수평방향의 흐름이 지배적이므로, Bouwer and Rice법의 적용시 지하수의 흐름은 수평방향만 존재한다고 가정한다. 따라서 주어진 깊이에서의 유선망의 형태는 수직방향으로 같다고 볼 수 있다. 이와 같이 유선망을 단순화하였기 때문에 우물 주위로 방사형으로 퍼져나가는 2차원의 유선망을 사용하여 문제를 풀 수 있다. Teeter 와 Clemence (1986) 연직차수벽의 경계조건 효과로 인해 나타난 Bouwer and Rice법의 오류를 수정하는데 유선망법(flow net method)의 사용을 제안하였다. 수정 계수( $f^*$ )는 순간변위 시험의 기하학적 형상을 유선망으로 작도하여 추정할 수 있다. 이 제안은 필터케이크를 고려하지 않고, 모든 수두 손실은 연직차수벽 내에서 일어난다고 가정하여서 연직차수벽의 경계를 일정수두조건으로 설정하였다. Bouwer and Rice법으로 얻은 투수계수는 유선망 작도에 의해 구해진 수정 계수( $f^*$ )를 사용하여 하향 조정한다.

$R_e$ 는 Bouwer and Rice (1976)가 제안한 공식으로 구할 수 있다(참조 식(2)). 필터케이크가 존재하지 않는 경우 동일한 기하학적 조건에서  $R_e > W/2$ 경우가 우물의 유입부에서 등수두 경계조건까지 거리가  $R_e < W/2$  경우보다 가깝기 때문에 순간변위시험시 우물을 통해 흐르는 물의 양이 많다. Bouwer and Rice법을 사용해서 투수계수를 구할 때,  $R_e > W/2$ 인 경우는 필터케이크가 없는 경우라도 아래 유선망을 통해 투수계수 산정시 수정이 필요하다(Choi 와 Daniel 2006b).

$$\frac{Q}{L} = kH \frac{N_f}{N_d} \quad (4)$$

$Q/L$ 는 대수층 또는 연직차수벽의 단위 깊이 당 흐름이고,  $k$ 는 대수층 또는 연직차수벽의 투수계수,  $H$ 는 총 수두 손실,  $N_f$ 는 flow channel의 수,  $N_d$ 는 등수두면의 개수이다.

연직차수벽과 대수층에서 각자 수행한 두 가지 순간변위시험의 자료를 분석하였다. 각 사례는 동일한 투수계수  $k$ 와 총수두  $H$ 를 가진다고 가정한다. 만약 연직차수벽의 유선망의  $N_f/N_d$ 가 대수층의 유선망의  $N_f/N_d$ 보다 크다면 연직차수벽의 단위깊이 당 유량이 더 크게 산정된다(식 (4)). 따라서  $R_e > W/2$  경우 연직차수벽 투수계수가 경계조건에 의한 유량증가로 인해 실제 투수계수 보다 크게 평가된다. 이러한 오차를 수정하기 위하여 Teeter 와 Clemence (1986)는  $R_e > W/2$ 와 같은 경우 수정 계수( $f^*$ )는 아래와 같다고 하였다.

$$f^* = \frac{\left(\frac{N_f}{N_d}\right)_{R_e < \frac{W}{2}}}{\left(\frac{N_f}{N_d}\right)_{R_e > \frac{W}{2}}} \quad (5)$$

따라서 수정된 투수계수( $k_{corrected}$ )는 다음과 같다.

$$k_{corrected} = k_{B-Rmethod} \times f^* \quad (6)$$

Choi 와 Daniel (2006b)은 연직차수벽의 압축성이 비교적 작고( $\alpha_p < 0.03$ 일 때) 필터케이크의 효과를 고려하지 않았을 때, 유선망법과 Bouwer and Rice법을 결합하여 오류를 효율적으로 수정할 수 있다고

보고하였다. Teeter 와 Clemence(1986), Choi 와 Daniel(2006b)의 연구에서는 순간변위시험에서 Bouwer and Rice법의 수정계수( $f^*$ )를 예측할 때 필터케이크의 연직차수벽에 대한 효과를 고려하지 않았다. 본 연구에서 Bouwer and Rice법의 수정계수를 필터케이크가 존재할 경우까지 확대 적용하였다. 연직차수벽은 유선망에 나타난 필터케이크의 효과를 고려하여 흐름이 없는 조건으로 수정할 수 있다.

그림 3은 필터케이크효과를 고려한 연직차수벽의 4가지 경우 유선망을 나타낸 것이다. 연직차수벽 중앙으로부터의 수위 변화는 고려하지 않았다. 필터케이크가 존재 할 때 수정 계수( $f^*$ )의 값을 구하면  $W/r_w$ 가 6, 10일 때 약 2.1, 1.5로 예측된다.  $R_e$  값이  $W/2$ 보다 작을 때 수정 계수( $f^*$ )는 1이다. 투수계수와 총 수두 손실이 같으면 흐르는 물의 양은 대수층의 경우와 비교해서  $R_e > W/2$ 일때 연직차수벽의 경우가 더 적다. 필터케이크 존재를 고려하면 투수계수의 예측값이 실제 투수계수보다 작아지므로 반드시 수정계수( $f^*$ )로 보정하여야 한다.

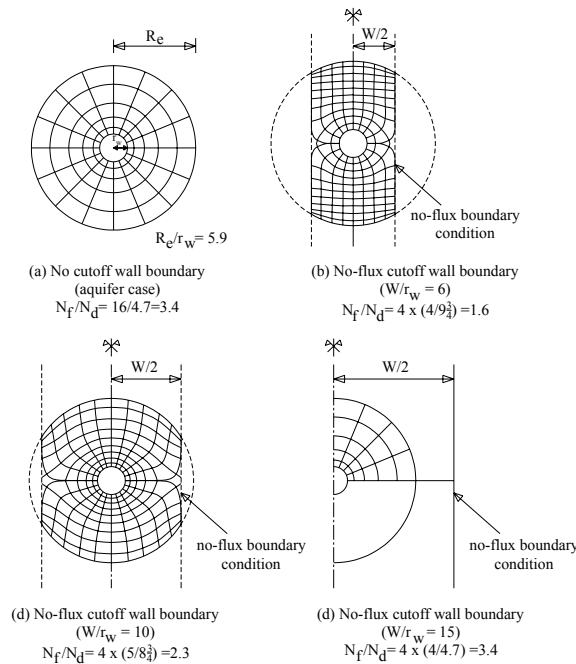


그림 3. 필터케이크를 고려한 연직차수벽과 대수층의 유선망 형태

Bouwer and Rice법과 유선망법을 결합하여 보완한 해석결과를 그림 4에 제시하였다. 필터케이크가 존재하고 뒤채움재의 압축성이 비교적 작을 때( $\alpha_p < 0.03$ ) Bouwer and Rice법을 적용하면 연직차수벽의 투수계수는 과소평가 된다. 이와 같은  $\alpha_p$ 의 조건에서 연직차수벽의 두께가 작을 때( $W/r_w$ 가 작을 경우) 수정 Bouwer and Rice법을 사용하면 부분적으로 투수계수를 정확하게 추정할 수 있다. 비록  $\alpha_p$ 가 0.01에서 0.03( $k_{best-fitting}/k_{real}$ 은 1.5보다 클 수 있다)의 범위에서 수정 Bouwer and Rice법을 사용하면 투수계수가 과대평가 될 수도 있지만, 이것은 보수적인 관점에서 충분히 수용 가능하다. 그러나 뒤채움재의 압축성이 비교적 클 때( $\alpha_p > 0.03$ ) 구한 투수계수는 사용할 수 없다. Bouwer and Rice법은 구성물질의 압축성을 고려할 수 없기 때문에  $\alpha_p$ 의 범위에 따라 투수계수가 과대평가될 수 있고, 수정 Bouwer and Rice법을 사용할 때 역시 수정계수( $f^*$ )에 영향을 끼친다. 수정 Bouwer and Rice법을 사용할 때는  $\alpha_p$ 의 값은 0.03보다 항상 작아야 하며, 이 값은 연직차수벽 시공시 주로 사용하는 흙과 벤토나이트 혼합물의  $\alpha_p$  범위이다.

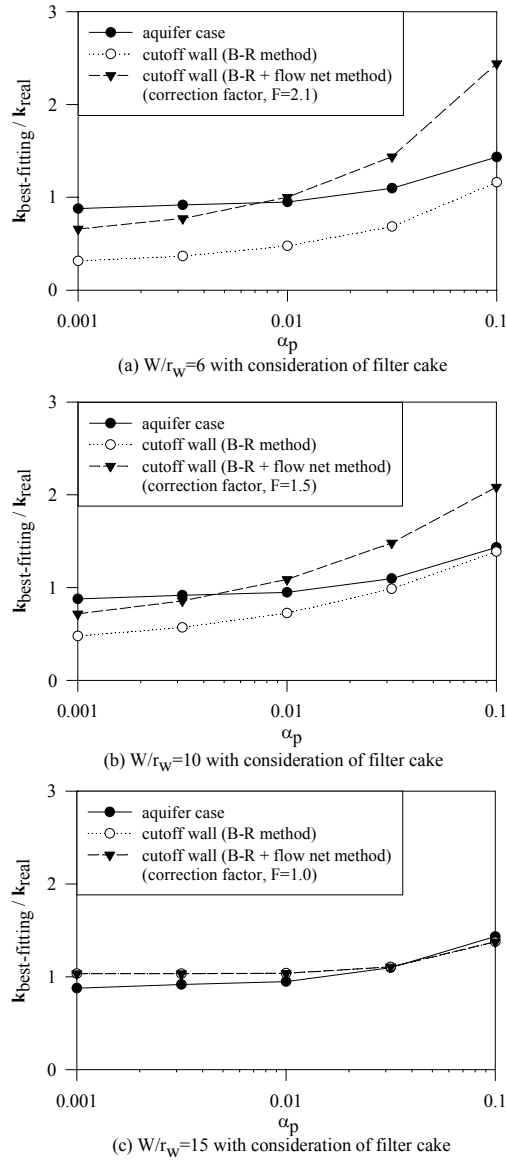


그림 4. 연직차수벽의 순간변위시험에서 필터케이크 고려시 유선방법 해석결과  
( $L_w/r_w = 10$  and  $L/L_w = 11$ )

본 연구에서 구한 연직차수벽의 투수계수는 필터케이크의 영향을 배제한 순수 연직차수벽의 현장투수계수이다. 이를 이용하여 연직차수벽과 필터케이크가 포함된 복합적인 환산투수계수는 각각의 두께를 가중평균한 값으로 표현할 수 있다(D'Appolonia 1980, Britton 등. 2005).

$$k_{eq} = \frac{W}{\frac{W}{k_b} + \frac{2L_{fc}}{k_{fc}}} \quad (7)$$

$k_{eq}$ 는 환산투수계수,  $W$ 는 연직차수벽의 두께,  $k_b$ 은 연직차수벽 뒤채움재의 투수계수,  $L_{fc}$  필터케이크의 두께,  $k_{fc}$ 는 필터케이크의 투수계수이다. 연직차수벽의 너비에 비해 필터케이크의 두께는 아주 작은 값을 가지므로  $B \approx B + 2L_{fc}$ 라고 가정하였고, 필터케이크의 존재를 고려할 때 Bower and Rice법을 사용해서 구한 뒤채움재의 투수계수는 실제 값과 차이가 있기 때문에 Bower and Rice법의 오류 수정은 꼭

필요하며, 본 논문에서는 연직차수벽의 환산 투수계수를 구하는 경우 아래와 같은 절차를 제안한다.

1. API 필터 시험(API RP13B-1990)과 수정된 순간변위시험(Chung 와 Daniel 2008)같은 시험으로 필터 케이크의 투수계수  $k_{fc}$ 를 구한다. 필터케이크의 투수계수 범위는 각각  $3 \times 10^{-11}$ m/s 에서  $2 \times 10^{-10}$  m/s(Henry 등. 1998), 이거나  $7 \times 10^{-12}$ m/s에서  $4 \times 10^{-10}$ m/s(Chung and Daniel 2008),  $2 \times 10^{-11}$ m/s에서  $2.6 \times 10^{-10}$ m/s(Nguyen et al. 2008)까지의 값을 가진다. 필터케이크의 두께  $L_{fc}$ 는 현장이나 실내시험을 통해서 구한다.
2. 연직차수벽 뒤채움재의 투수계수  $k_b$ 는 순간변위시험을 앞서 제안한 수정 Bower and Rice법으로 해석한다. 환산 투수계수는 방정식 (7)을 사용하여 계산한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 Teeter 와 Clemence (1986)가 제안한 수정Bower and Rice법을 통해 필터케이크 존재를 고려한 연직차수벽의 뒤채움재 물질의 정확한 투수계수를 얻을 수 있다.

필터케이크가 존재하는 경우, 뒤채움재의 압축성이 비교적 작은 경우( $\alpha_p < 0.03$ ) 순간변위시험을 통한 연직차수벽의 투수계수를 Bower and Rice법으로 구하면 과소평가 되는 경향이 있다. 뒤채움재의 압축성이 비교적 큰 경우( $\alpha_p > 0.03$ ), Bower and Rice법을 쓰면 투수계수는 과대평가된다. Bower and Rice법은 재료의 압축성을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

결과를 비교해보면 필터케이크의 존재를 고려하는 연직차수벽의 순간변위시험 자료를 수정 Bower and Rice법을 써서 분석 할 때 다른 방법보다 정확한 값을 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 논문을 위한 연구는 한국학술진흥재단의 지원을 받는 연구비(신진교수지원연구-기초과학분야-D00477)로 진행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Nguyen the Bao, 이철호, 최항석, 김상균 (2008) "필터케이크(filter cake)를 고려한 슬러리월 연직차수벽의 현장 투수계수 평가.", **한국지반공학회논문집**, 제24권, 제11호, pp.121-131
2. 최항석, 이철호, Nguyen the Bao (2007) "압축성이 큰 지반에서 순간변위(충격)시험 해석을 위한 선형 커브피팅법(Linear curve fitting method)의 적용, **한국지반공학회논문집**, 제23권, 제11호, pp. 1-9
3. API (1990). "Standard Procedure for Field Testing Drilling Fluids.", API Specification 13B, *American Petroleum Institute*.
4. Bower, H. (1989). "The Bower and Rice slug test—An update." *Ground Water*, 27(3), 304 - 309.
5. Bower, H., and Rice, R. C. (1976). "A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifer with completely or partially penetrating wells." *Water Resour. Res.*, 12(3), 423 - 428.
6. Britton, J. P. (2001). "Soil-bentonite cutoff walls: hydraulic conductivity and contaminant transport." Ph.D. thesis, *Virginia Polytechnic Institute & State Univ.*, Blacksburg, Va.
7. Britton, J. P., Filz, G. M., and Little, J. C. (2002). "Shape factors for single-well tests in soil-bentonite cutoff walls." *Proc., 4th Int. Congress on Environmental Geotechnics, de Mello and Almeida*, eds., 639 - 644.
8. Britton, J. P., Filz, G. M., and Herring, W. E. (2005). "Slug tests in soil-bentonite cutoff walls using a push-in piezometer tip." *Waste Containment and Remediation*, GSP 142 (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
9. Butler, J. J. (1996). "Slug tests in situ characterization: Some practical consideration." *Envir. Geosciences*, 3(2), 154 - 163.



10. Butler, J. J. (1998). *The design, performance, and analysis of slug tests*, Lewis, Boca Raton, Fla.
11. Choi, H. (2007). "Numerical model for analyzing slug tests in vertical cutoff walls." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(10), 1249 - 1258.
12. Choi, H., and Daniel, D. E. (2006a). "Slug test analysis in vertical cutoff walls. I: Analysis Methods." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(4), 429 - 438.
13. Choi, H., and Daniel, D. E. (2006b). "Slug test analysis in vertical cutoff walls. II: Applications." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(4), 439 - 447.
14. Choi, H., Nguyen, T. B., and Lee, C. (2008). "Slug test analysis to evaluate permeability of compressible materials." *Ground Water* 46, no. 4: 647 - 652.
15. Chung, J., and Daniel, D. E. (2008). "Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite." *Geotech. Test. J.*, 31(3), 1 - 9.
16. D'Appolonia, D. J. (1980). "Soil-bentonite slurry trench cutoffs," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 106(4), 399-417.
17. EMCON. (1995). M-11/15, M-17/21, and M-26/E-29 slurry walls postconstruction performance evaluation, West Contra Costa Sanitary Landfill, Richmond, Calif.
18. Filz, G. M., Boyer, R. D., and Davidson, R. R. (1997). "Bentonite-water slurry rheology and cutoff wall trench stability." *Proc., In Situ Remediation of the Geoenvironment*, GSP No. 71, J. C. Evans, eds., 139 - 153.
19. Ferris, J. G. (1959). *Groundwater*, John Wiley & Sons, New York.
20. Henry, L. B., Filz, G. M., and Davidson, R. R. (1998). "Formation and properties of bentonite filter cakes." *Proc., Filtration and Drainage in Geotechnical/ Geoenvironmental Engineering*, GSP No. 78, ASCE, Reston, Va., 69 - 88.
21. Hvorslev, M. J. (1951). "Time lag and soil permeability in ground-water observation." Bulletin No. 36, *Waterways Experiment Station, United States Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss.*
22. Hyder, Z. (1994). "Analysis of slug tests in partially penetrating wells." Ph.D. thesis, Univ. of Kansas, Lawrence, Kan.
23. Nguyen, T. B., Lee, C., Yang, J., and Choi, H. (2008). "Evaluation of hydraulic conductivity of bentonite filter cake using modified fluid loss test." *Proc., KGS Fall National Conference*, Kwangju, Republic of Korea.
24. Teeter, R. M., and Clemence, S. P. (1986). "In-place permeability measurement of slurry trench cutoff wall." *Proc., In Situ' 86, Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, GSP No. 6, 1049 - 1061.
25. Yang, D. S., Luscher, U., Kimoto, I., and Takeshima, S. (1993). "SMW wall for seepage control in levee reconstruction." *Proc., 3rd Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 487 - 492.