

## 수정 Bouwer and Rice 법을 이용한 필터케이크가 존재하는 연직차수벽의 현장 투수계수 산정법

### Modification of Bouwer and Rice Method to Evaluate Hydraulic Conductivity of Cutoff Wall Considering Filter Cake Development

웡 테 바오<sup>1</sup> The-Bao Nguyen

이 철 호<sup>2</sup> Lee, Chulho

곽 태 훈<sup>3</sup> Kwak, Taehoon

최 항 석<sup>4</sup> Choi, Hangseok

#### Abstract

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 applied to analyzing slug test results to estimate the hydraulic conductivity of vertical cutoff walls. 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 has been 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.

#### 요 지

순간변위시험(Slug test)을 통해 대수층의 투수계수를 구할 때, 시험결과 해석에 적용하는 line-fitting법 중 가장 일반적인 방법이 Bouwer and Rice법이다. Bouwer and Rice법을 적용하여 압축성이 크고 벽체의 두께가 얇은 연직차수벽의 투수계수를 산정할 때는 세심한 주의가 필요하다. 그리고 연직 차수벽과 주변 지반 사이에 형성된 상대적으로 투수성이 낮은 영역, 즉 필터케이크(Filter cake)는 Bouwer and Rice법을 연직차수벽의 투수계수 산정시, 이 방법을 직접 적용하기 어렵게 만든다. 본 논문에서는 기존의 Bouwer and Rice법의 한계를 극복하기 위해서 유선망 개념을 도입한 수정 Bouwer and Rice법을 제안하였다. 수정된 Bouwer and Rice법은 연직차수벽의 투수계수를 산정할 때 필터케이크를 포함한 연직차수벽의 기하학적 조건을 효율적으로 반영할 수 있도록 한다. 또한, 수정 Bouwer and Rice법의 적용성을 검증하기 위한 사례 연구가 본 논문에서 수행되었다.

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

1 고려대학교 건축사회환경시스템공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, & Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축사회환경시스템공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, & Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축사회환경시스템공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, & Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축, 사회환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental, & Architectural Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

연직 차수벽은 오염된 지반을 정화하기 위해 도입할 수 있는 다양한 생화학적 처리방법의 효율성을 증대시키기 위한 수동적인 처리방법의 하나로, 지하수의 이동에 의한 오염물의 확산을 효율적으로 막을 수 있다. 연직차수벽 시공시, 굴착하게 되는 트렌치 형태나 규격은 굴착장비에 따라 달라지는데, 특수하게 고안된 백호우의 경우에는 폭 0.5~1.5m에 깊이 20~25m 트렌치를 굴착 할 수 있다. 일반적인 설계규정에 따르면, 연직차수벽의 투수계수는  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 를 넘지 않아야 한다 (Nguyen et al., 2008).

연직차수벽의 현장 투수계수는 단일정에서 순간변위 시험(Slug test)을 통해 구할 수 있다(Teeter and Clemence, 1986; Yang et al., 1993; Britton et al., 2002; Choi and Daniel, 2006a & b; Choi, 2007). 순간변위시험 결과를 분석하여 현장 투수계수를 산정하는 해석방법에는 Type curve법과 line-fitting법이 있는데, Bouwer and Rice법 (Bouwer and Rice, 1976; Bouwer, 1989)은 대표적인 line-fitting법이다(최항석 등, 2007; Choi et al., 2008). 하지만, 수평방향으로 경계가 없는 일반 자연대수층 조건과 좁고 긴 벽체 형태를 갖는 연직차수벽의 기하학적 경계조건은 Bouwer and Rice법을 적용시, 큰 차이가 있다. 연직차수벽의 경우는 우물정에서 물이 유입 또는 배출되는 부분(well intake section)이 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계에 인접하므로 순간변위시험시 이 경계에 의한 영향이 크다. 따라서, 연직차수벽에서의 순간변위시험 데이터를 분석하기 위해 기존의 Bouwer and Rice법을 그대로 적용할 수 없다. 이 같은 한계를 극복하기 위해 Teeter and Clemence(1986)는 연직차수벽의 투수계수를 추정하는데 유선망(flow net)을 도입하여 Bouwer and Rice법을 수정하는 법을 제안하였다. Britton et al.(2002)은 연직차수벽의 순간변위 시험시 적용할 수 있는 형상계수를 제안하였고, 최근 Choi and Daniel(2006a)은 연직 차수벽의 경계조건을 고려하여 투수계수를 추정하는데 Type curve법을 위한 일련의 Type curve 도표와 수정된 line-fitting법을 제안하였다. 또한, Choi(2007)은 연직차수벽에서 순간변위시험을 모사하는데 효과적인 수치모형을 제안하였다.

연직차수벽의 또 다른 중요한 고려 사항은 연직차수벽과 주변지반 사이에 존재하는 필터케이이크이다. 필터케이이크는 상대적으로 불투수막에 가까운 낮은 투수성

을 가지고 있어 연직차수벽의 순간변위시험을 해석할 때 이를 반드시 고려해야 한다. Choi and Daniel(2006b)은 연직차수벽과 흙 사이에 있는 필터케이이크를 흐름이 없는 경계조건(no flux boundary condition)으로 취급할 수 있음을 제안 하였다.

본 연구에서는 연직차수벽에 존재하는 필터케이이크를 고려하기 위한 수정 Bouwer and Rice법의 적용을 제안 하였다. 그리고 필터케이이크의 특징을 고려하여 필터케이이크를 흐름이 없는 경계조건으로 수치해석 프로그램인 Slug\_3D(Choi and Daniel, 2006a & b; Choi, 2007)의 경계조건을 수정하여 해석을 수행하였다. 연직차수벽과 주변지반 사이에서 필터케이이크를 고려한 조건과 고려하지 않은 조건을 각자 유선망 형태로 나타낼 수 있다. 이러한 유선망을 사용한 Teeter and Clemence(1986)의 접근방법으로 연직차수벽의 순간변위시험에 대한 Bouwer and Rice법의 오차를 수정하는데 적용할 수 있다. 또한, EMCON(1995)의 사례를 통해 본 논문에서 제안한 방법의 적용성을 검증하였다.

## 2. 필터 케이이크의 특성 및 영향

필터케이이크는 연직차수벽 시공 중 연직차수벽과 지반 사이의 경계면에서 형성된다. 연직차수벽을 시공할 때 트렌치의 안정성을 확보하기 위해 주로 무게비 6%의 벤토나이트-물 슬러리를 굴착된 프렌치에 채워 넣는다. 필터케이이크는 수두차이에 의해서 슬러리입자가 흙 사이로 침투하고 필터링되어 굴착면에 생성되며, 일반적으로 연직차수벽 시공이 완료된 이후에도 제거되지 않고 완성된 연직차수벽과 지반 사이의 경계면에 존재한다. 필터케이이크의 형성은 주변지반의 토체의 입도와 슬러리에 섞여있는 미세입자 크기에 영향을 받는다(Filz et al., 1997; Henry et al., 1998). Henry et al.(1998)은 실내시험을 통해 필터 케이이크의 투수계수가  $3 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 에서  $2 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  범위를 갖음을 보였는데, 이 범위는 연직 차수벽의 설계 투수계수인  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 보다 매우 작은 값을 알 수 있다.

필터케이이크는 투수계수가 매우 작아서 연직차수벽의 전체적인 통수능에 영향을 끼친다. 필터케이이크의 유무에 따라 연직차수벽의 수리학적 경계조건이 달라진다. 따라서 연직차수벽의 투수계수는 필터케이이크와 뒤채움재의 복합적인 영향을 받는다. 투수계수가 작은 필터케이이크 층의 존재는 연직차수벽 내에서 전체적인 흐름의

경계조건을 바꾸기 때문에 순간변위시험을 통한 연직차수벽의 투수계수 추정에 어려움을 야기한다(Nguyen et al., 2008; Choi and Daniel, 2006b). D'Appolonia(1980)은 경험적으로 필터케이크의 두께는 일반적으로 3mm 이하라고 밝혔다. Britton(2001)은 필터케이크의 중요도를 고려하여 두께의 대푯값으로 5mm를 선택했다.

Choi and Daniel(2006b)은 순간변위시험을 통해 연직차수벽의 투수계수를 예측할 때, 필터케이크의 효과를 고려하는 방안을 제시한바가 있다. 유한차분 수치해석 프로그램인 Slug-3D(Choi, 2007)을 이용하여 6mm 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 and Daniel(2006b)의 연구 결과를 적용하였다.

그림 1은 필터케이크를 고려한 연직차수벽에서 순간변위시험 모식도를 나타낸다. 연직차수벽의 두께와 깊이는 각각 W와 L로 표기하였다.  $L_t$ 는 지하수면부터 우물 유입부까지 거리를 나타내고,  $L_w$ 는 필터팩(filter pack)의 길이를 나타낸다. Butler(1996)는 필터팩은 일반적으

로 대상 지반에 비해 투수성이 매우 크므로 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 감소하여 순간변위시험 종료 시에는 0에 수렴한다. 순간변위시험에서 시간에 따라 수두의 회복되는 것을 나타내기 위하여, 초기수두강하로 정규화한  $H(t)/H_0$ 를 해석에 고려하였다.

### 3. 필터케이크를 고려한 연직차수벽의 투수계수 산정 방법

#### 3.1 연직차수벽에서 Bouwer and Rice법 적용

기존 Bouwer and Rice법을 필터케이크가 존재하는 연직차수벽의 순간변위시험 해석에 적용할 수 있는지를 파악하기 위하여 Slug\_3D(Choi, 2007)를 수정하여 임의의 연직차수벽의 투수계수  $k_{real}$ 를 고려한 순간변위시험을 모사하였다. 필터케이크의 존재는 Choi and Daniel(2006b)가 제안한 물의 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 평면상에서 수두변화의 경계범위를 의미한다. Bouwer and Rice(1976)는  $R_e$  값을 아래와 같은  $\ln(R_e/r_w)$ 항으로 예측하였다.

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

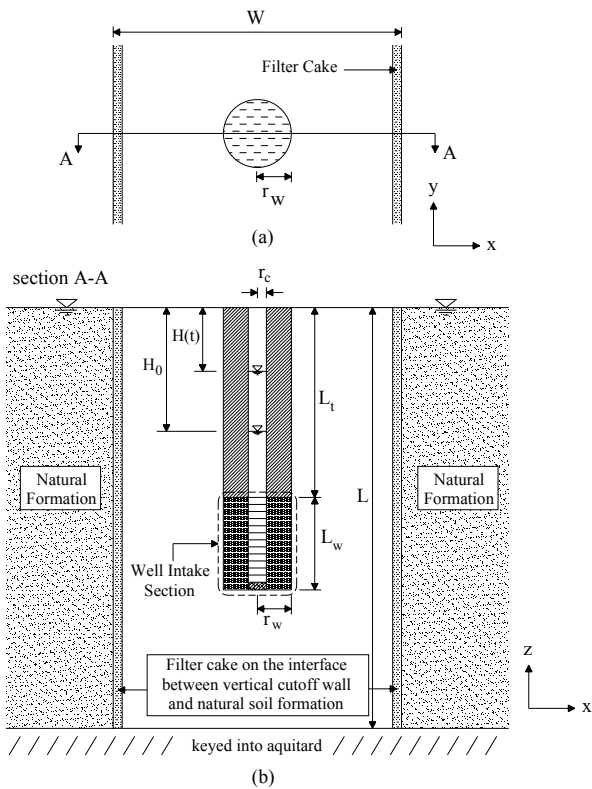


그림 1. 필터케이크가 존재하는 연직차수벽의 순간변위시험 모식도

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

여기서 변수 A, B는 우물 형상비( $L_w/r_w$ )에 관련된 함수이며 Bouwer and Rice(1976)에 의해 제시되었다. 본 연구에서는 Hvorslev(1951)가 제안한 basic time lag formulation인  $H(t)/H_0$ 가 1과 0.37 이 되는 점에서 직선을 연결하여 순간변위시험 결과를 분석하였다. 그러므로  $k_{best-fitting}/k_{real}$  비는 Bouwer and Rice법을 적용할시 발생하는 오차 정도를 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(연직차수벽의 압축성이 비교적 작은 경우) 투수계수는 과소평가 된다( $k_{best-fitting}/k_{real}$ 은 1보다 작다). 연직차수벽의 두께가 줄어들수록 과소평가가 정도가 커진다. 반면에,  $\alpha_p$ 가 0.03보다 클 때(연직차수벽의 압축성이 비교적 큰 경우) 투수계수는 과대평가되는 경향이 있다.

기존 Bouwer and Rice법을 적용하여 예측한 투수계수가 연직차수벽의 압축성이 비교적 작은 경우( $\alpha_p < 0.03$ )에 과소평가에 영향을 주는 주요 요소는 연직차수벽의

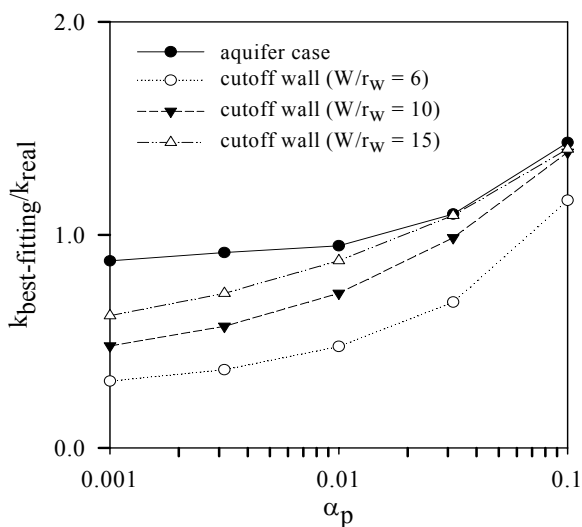


그림 2. Bouwer and Rice법으로 해석한 필터케이크를 고려할 때 연직차수벽의 순간변위시험 결과( $L_w/r_w = 10$ ,  $L/L_w = 11$ )

두께임을 알 수 있다. 연직차수벽에서 순간변위시험을 시행할 때, 수두회복에 대한 경계조건의 효과는 양수정의 경계조건의 효과와 유사하다. 양수문제의 가상-우물 이론(Ferris, 1959)을 필터케이크가 존재하는 연직차수벽의 경계조건을 흐름이 없는 경계조건과 비교할 수 있다. 이 조건은 수평방향 경계가 없는 대수층의 경우와 비교해서 수두의 회복이 느려지게 된다. 순간변위시험에서는 수두회복이 늦어질수록 투수계수는 작게 평가된다.

### 3.2 유선망을 이용하여 필터케이크 존재를 고려한 수정 Bouwer and Rice법

그림 1에서 보듯이 대부분의 순간변위시험의 우물 형상비( $L_w/r_w$ )는 10보다 크므로(EMCON, 1995; Butler, 1998), 우물의 유입/유출부(필터팩)에서 수평방향의 흐름이 지배적이므로, Bouwer and Rice법의 적용시, 지하수의 흐름은 수평방향만 존재한다고 가정한다. 따라서, 주어진 임의의 깊이에서의 유선망의 형태는 수직방향으로 동일하다고 가정하므로 우물 주변으로 방사형으로 퍼져나가는 2차원의 유선망을 해석에 적용할 수 있다. Teeter and Clemence(1986)는 연직차수벽의 경계조건 효과로 인해 나타난 Bouwer and Rice법의 오류를 수정하는데 유선망법(flow net method)의 사용을 제안하였다. 수정 계수( $f^*$ )는 순간변위시험의 기하학적 형상을 유선망으로 작도하여 추정할 수 있다. 하지만, Teeter and Clemence(1986)가 제안한 방법은 연직차수벽에 필터케이크가 형성되지 않고 모든 수두 손실은 연직차수벽 내에서 일어난다고 가정하여 연직차수벽의 경계를 일정 수두조건으로 설정하였다. 이들 방법에서는 Bouwer and Rice법으로 얻은 투수계수는 유선망 작도에 의해 구해진 수정 계수( $f^*$ )를 사용하여 하향 조정한다.

필터케이크가 존재하지 않는 경우, 동일한 우물정과 연직차수벽의 기하학적 조건에서  $R_e > W/2$ 경우가 우물의 유입부에서 등수두 경계조건까지 거리가  $R_e < W/2$  경우보다 가깝기 때문에 순간변위시험시, 우물을 통해 유입/유출되는 유량이 크다. Bouwer and Rice법을 사용하여 투수계수를 구할 때,  $R_e > W/2$ 인 경우는 유선망을 통해 투수계수 산정시 수정이 필요하다(Choi and Daniel, 2006b). 대수층 단위 깊이 당 유량은 다음 유선망의 구성요소로 나타낼 수 있다.

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

$Q/L$ 는 대수층 또는 연직차수벽의 단위 깊이 당 유량이고,  $k$ 는 대수층 또는 연직차수벽의 투수계수,  $H$ 는 총 수두 손실,  $N_f$ 는 유로 채널수(number of flow channel),  $N_d$ 는 수두손실 칸수(number of potential drop)이다.

연직차수벽과 대수층에서 얻어진 순간변위시험 결과를 분석하여 수정 Bouwer and Rice법의 적용방법을 다음과 같이 설명한다. 각 경우는 동일한 투수계수  $k$ 와 총 수두 손실  $H$ 를 갖는다고 가정한다. 만약 연직차수벽의 유선망의  $N_f/N_d$ 값이 대수층의 유선망의  $N_f/N_d$ 값 보다 크다면 연직차수벽의 단위깊이 당 유량이 더 크게 산정된다(식 (4)). 따라서  $R_e > W/2$  경우 연직차수벽 투수계수가 경계조건에 의한 유입 또는 유출 유량증가로 인해 실제 투수계수 보다 크게 평가된다. 이러한 오차를 수정하기 위하여 Teeter and Clemence(1986)는  $R_e > W/2$ 와 같은 경우 수정 계수( $f^*$ )를 다음과 같이 제시하였다.

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

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

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

Choi and Daniel(2006b)은 연직차수벽의 압축성이 비교적 작고( $\alpha_p < 0.03$ 일 때) 필터케이크가 존재하지 않는 경우, 유선망법과 Bouwer and Rice법을 결합하여 오류를 효율적으로 수정할 수 있다고 보고하였다. Teeter and Clemence(1986)과 Choi and Daniel(2006b)의 연구에서는 순간변위시험에서 Bouwer and Rice법의 수정계수( $f^*$ )를 예측할 때 필터케이크의 존재를 무시하고 해석을 수행하였다. 본 연구에서 Bouwer and Rice법의 수정계수를 필터케이크가 존재할 경우까지 확대 적용하였다. 연직차수벽과 주변지반 사이의 경계는 필터케이크의 매우 낮은 투수계수를 고려하여 수평방향으로 흐름이 없는 경계조건으로 설정하여 유선망을 작도하였다.

그림 3은 필터케이크를 고려한 연직차수벽의 두께가 다른 4가지 경우 유선망을 보여준다. 필터케이크가 존재할 때, 수정계수( $f^*$ )의 값을 구하면  $W/r_w$ 가 6, 10일

때 각각 약 2.1, 1.5로 예측된다.  $R_e$ 값이  $W/2$ 보다 작을 경우, 수정 계수( $f^*$ )는 1이다.  $R_e > W/2$ 경우는, 투수계수와 총 수두 손실이 같으면 연직차수벽으로 유입/유출되는 유량은 대수층의 경우와 비교하여 더 작다. 따라서, 필터케이크 존재를 고려하면 투수계수의 예측값이 실제 투수계수보다 작아지므로 반드시 수정계수( $f^*$ )로 보정하여야 한다. Bouwer and Rice법과 유선망법을 결합하여 보완한 해석결과를 그림 4에 제시하였다. 필터케이크가 존재하고 뒤채움재의 압축성이 비교적 작을 때( $\alpha_p < 0.03$ ) 기존 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 투수계수 예측을 개선할 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 약간은 과대평가 될 수도 있지만, 이는 다소 보수적인 설계를 유도함으로써 적용 가능성이 있다. 그러나, 뒤채움재의 압축성이 비교적 클 때( $\alpha_p > 0.03$ ), 그림 4에서 보듯이, 수정 Bouwer and Rice법은 투수계수를 과대 평가하게 된다. 이러한 결과가 도출되는 이유는, 원칙적으로 Bouwer and Rice법은 대상지반의 압축성을 고려할 수 없기 때문에  $\alpha_p$ 의 범위에 따라 투수계수가 과대평가될 수 있기 때문

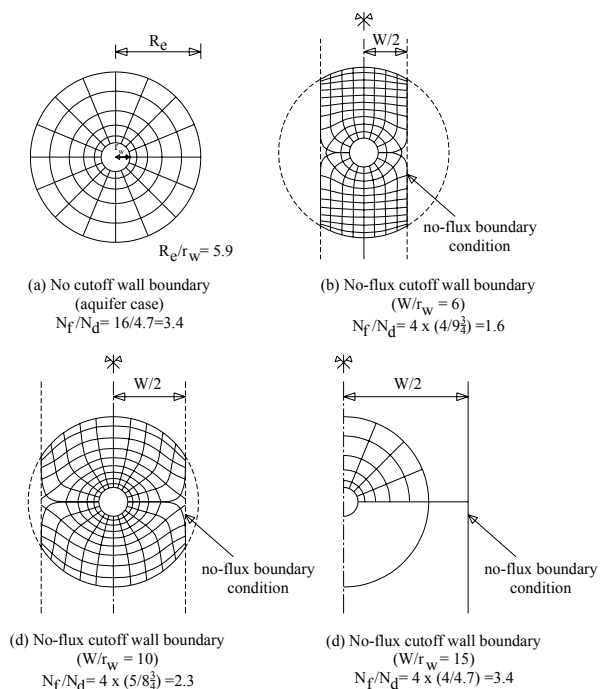
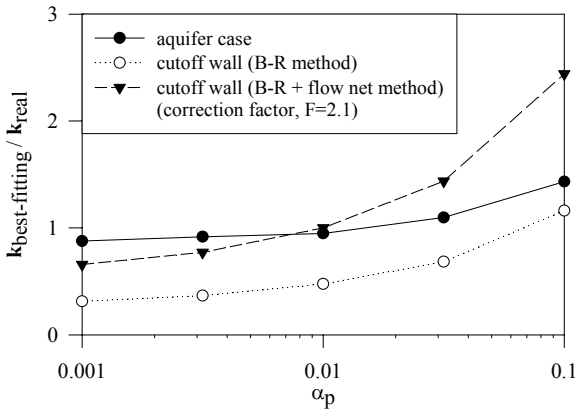
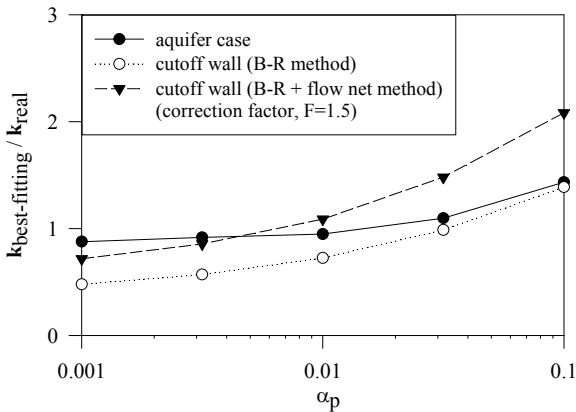


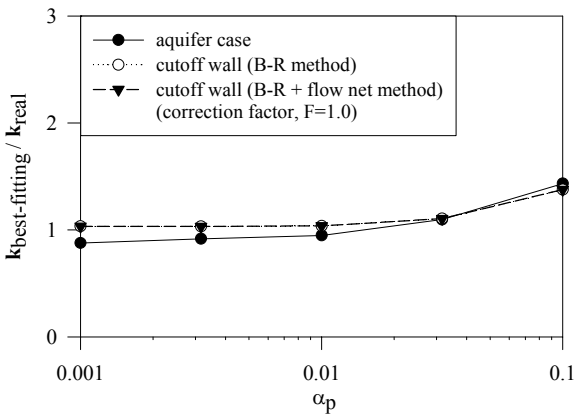
그림 3. 필터케이크를 고려한 연직차수벽과 대수층의 유선망 형태



(a)  $W/r_w=6$  with consideration of filter cake



(b)  $W/r_w=10$  with consideration of filter cake



(c)  $W/r_w=15$  with consideration of filter cake

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

이다. 수정 Bouwer and Rice법을 사용할 때는  $\alpha_p$ 의 값은 0.03보다 항상 작아야 하며, 이 값은 연직차수벽 시공시, 주로 사용하는 흙과 벤토나이트 뒤채움재의  $\alpha_p$  범위이다.

전술한 유선망을 이용한 수정 Bouwer and Rice법으로 구한 연직차수벽의 투수계수는 필터케이크에 의해 순간변위시험 결과해석의 오류를 배제하여 얻어진 순수 연직차수벽 뒤채움재의 현장투수계수이다. 이를 이용하여 연직차수벽 뒤채움재와 필터케이크가 포함된

벽체의 복합투수계수는 각각의 두께를 가중평균한 값으로 다음과 같이 표현할 수 있다(D'Appolonia, 1980; Britton et al., 2005).

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

$k_{eq}$ 는 연직차수벽 뒤채움재와 필터케이크가 포함된 복합투수계수,  $W$ 는 연직차수벽의 두께,  $k_b$ 은 연직차수벽 뒤채움재의 투수계수,  $L_{fc}$  필터케이크의 두께,  $k_{fc}$ 는 필터케이크의 투수계수이다. 연직차수벽의 두께에 비해 필터케이크의 두께는 아주 작으므로,  $B \approx B + 2L_{fc}$ 라고 가정할 수 있다. 정리하면, 필터케이크의 존재를 고려할 때 기존 Bouwer and Rice법을 사용해서 구한 뒤채움재의 투수계수는 실제 값과 차이가 있기 때문에 유선망을 이용하여 수정 Bouwer and Rice법을 적용하여 연직차수벽의 투수계수를 예측하여야 한다. 본 논문에서는 연직차수벽의 복합투수계수를 구하는 경우 아래와 같은 절차를 제안한다.

1. API 필터 시험(API RP13B, 1990)과 수정된 순간변위시험(Chung and Daniel, 2008)같은 실내시험으로 필터케이크의 투수계수  $k_{fc}$ 를 구한다. 필터케이크의 투수계수 범위는 각각  $3 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 에서  $2 \times 10^{-10} \text{m/s}$  (Henry et al., 1998),  $7 \times 10^{-12} \text{m/s}$ 에서  $4 \times 10^{-10} \text{m/s}$  (Chung and Daniel, 2008),  $2 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 에서  $2.6 \times 10^{-10} \text{m/s}$  (Nguyen et al., 2008) 값을 가짐을 시험을 통해 예측되었다. 필터케이크의 두께  $L_{fc}$ 는 현장이나 실내 실험을 통해서 구한다.
2. 연직차수벽 뒤채움재의 투수계수  $k_b$ 는 순간변위시험을 앞서 제안한 수정 Bouwer and Rice법으로 해석한다. 환산 투수계수는 방정식 (7)을 사용하여 계산한다.

#### 4. 적용 사례분석

필터케이크의 존재를 고려할 때, 본 논문에서 제안된 연직차수벽의 투수계수를 구하는 수정 Bouwer and Rice법을 EMCON(1995)의 실제 사례에 적용시켜 분석하였다. 이 사례는 필터케이크의 고려 없이 Choi and Daniel(2006a)이 해석한 1990년 초에 건설된 캘리포니아 리치몬드의 West Contra Costa Sanitary 매립지의 연직차수벽 순간변위시험 자료를 재해석한 사례이다. 적

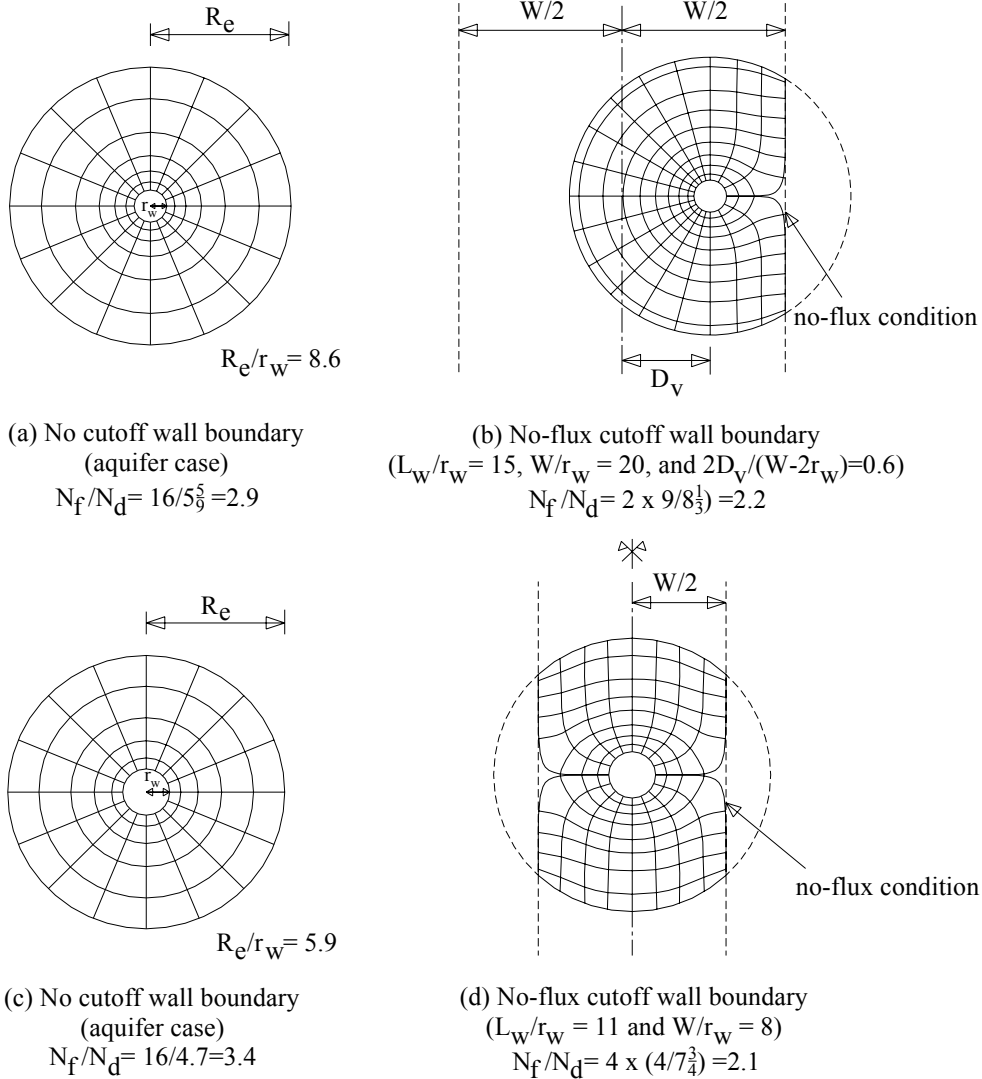


그림 5. 필터케이크를 고려한 M-17/21 연직차수벽과 대수층의 유선망 형태

용사례에 대한 추가적인 정보는 EMCON(1995)나 Choi and Daniel(2006a)에서 찾을 수 있다.

본 논문에서는 매립지역에 건설된 EMCON(1995) 연직차수벽에 필터케이크가 존재한다고 가정하고 기존 해석결과에 대한 재해석을 실시하였다. 마찬가지로 연직차수벽과 주변지반의 경계면은 필터케이크를 고려하여 흐름이 없는 조건을 경계조건으로 적용하였다. 연직차수벽 M-17/21과 M-11/15의 유선망을 그림 5와 그림 6에 각각 나타내었다. 여기서, 연직차수벽의 중심으로부터 이격된 우물 중심의 거리를  $D_v$ 로 나타낸다. 유한차분 해석프로그램인 Slug\_3D를 수행할 때, 우물중심의 연직차수벽의 중심으로부터 이격정도를 무차원의 값인  $sD_v/(W-2r_w)$ 로 나타낸다. M-11/15와 M-17/21의 경우에 수정계수( $f^*$ )를 유선망을 통해 구해보면 각각 1.6,

1.3으로 계산된다. 표 1은 실내시험(EMCON 1995)에서 구한 투수계수, 필터케이크를 고려하지 않고(Choi and Daniel 2006a) 구한 투수계수, 그리고 본 논문에서 제시한 수정 Bouwer and Rice법으로 구한 투수계수를 비교하여 보여준다. 연직차수벽의 순간변위시험 분석에 있어서, 각 해석방법에서 구한 투수계수 차이를 감안할 때, 필터케이크의 효과를 고려하는 것이 바람직하다. 필터케이크의 존재를 고려하지 않으면, 순간변위시험 동안 우물로 유입/유출 유량을 억제하는 필터케이크로 인해 투수계수는 실제보다 작게 예측된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 Teeter and Clemence(1986)가 제안한

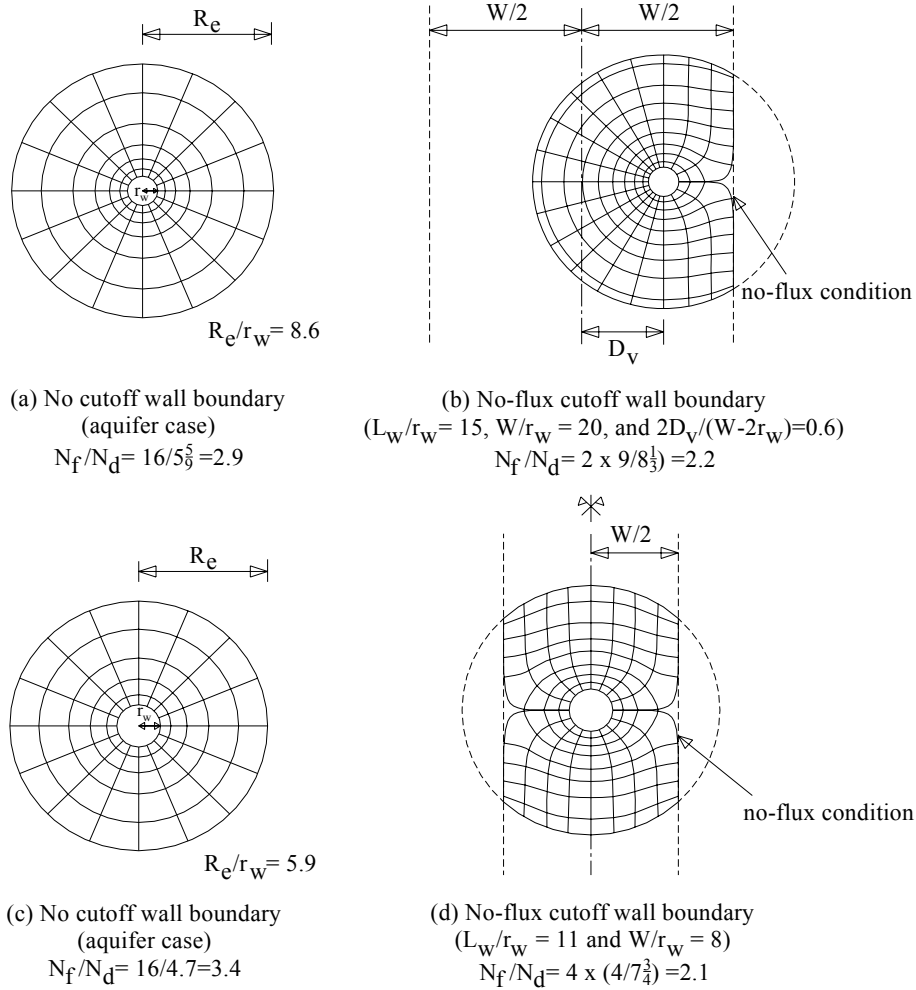


그림 6. 필터케이크를 고려한 M-11/15 연직차수벽과 대수층의 유선망 형태

표 1. 연직차수벽의 사례별 해석 결과

Case	실내시험결과 (EMCON 1995)		필터케이크 고려하지 않음			필터케이크 고려 (본 논문 해석결과)	
	교란시료	비교란시료	Choi and Daniel (2006a)		EMCON 해석결과	유선망으로부터 구한 수정계수	수정 Bouwer & Rice법
			Type curve법	기존 Bouwer & Rice법			
	k (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)	f*	kB-R method × f* (cm/s)
94-15 (M-17/21)	$1.0 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$3.1 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-6}$	1.3	$5.2 \times 10^{-6}$
93-1 (M-11/15)	$1.0 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-6}$	$6.0 \times 10^{-7} \sim 4.0 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$	1.6	$4.8 \times 10^{-6}$

유선망 작도를 통해 기존의 Bouwer and Rice법을 수정하는 방법을 필터케이크가 존재하는 연직차수벽에 확대 적용시켜, 순간변위시험을 통하여 연직차수벽 뒤채움재의 정확한 현장 투수계수를 예측하는 방법을 제시하였다. 연구에서 얻은 결론 및 토의사항을 요약하면, 다음과 같다.

- (1) 필터케이크가 존재하고 뒤채움재의 압축성이 비교적 작을 때( $\alpha_p < 0.03$ ) 기존 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 투수계수 예측을 개선할



수 있다. 중간정도 압축성을 보이는 경우, 즉  $\alpha_p$ 가 0.01에서 0.03의 범위에서는, 수정 Bouwer and Rice 법을 사용하면 투수계수가 약간은 과대평가 될 수도 있지만, 이는 다소 보수적인 설계를 유도함으로 적용 가능성이 있다. 수정 Bouwer and Rice법을 사용할 때는  $\alpha_p$ 의 값은 0.03보다 항상 작아야 한다.

- (2) 본 논문에서는 연직차수벽 뒤채움재와 필터케이프가 포함된 벽체의 복합투수계수를 구하는 절차를 제시하고 각 요소들을 측정하는 방법과 추천값을 제공하였다.
- (3) 수정 Bouwer and Rice법의 적용성과 효율성을 평가하기 위해, 매립지 연직차수벽의 두 가지 순간변위 시험 사례를 재해석하였고, 기존의 결과와 비교해 볼 때 순간변위 시험을 해석하는 경우 필터케이프의 존재를 반듯이 고려해야 함을 알 수 있다. 연직차수벽의 순간변위시험 자료를 분석할 때 필터케이프를 고려하면 연직차수벽의 투수계수가 과소평가 되는 것을 막을 수 있다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. Nguyen the Bao, 이철호, 최항석, 김상균 (2008), 필터케이프(filter cake)를 고려한 슬러리월 연직차수벽의 현장투수계수 평가, *한국지반공학회 논문집*, 제24권 11호, 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, *한국지반공학회 논문집*, 제23권 11호, pp.1-9.
3. API (1990), "Standard Procedure for Field Testing Drilling Fluids", *API Specification 13B*, American Petroleum Institute.
4. Bouwer, H. (1989), "The Bouwer and Rice slug test—An update", *Ground Water*, Vol.27, No.3, pp.304-309.
5. Bouwer, 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.*, Vol.12, No.3, pp.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.*, pp.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*, Vol.3, No.2, pp.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.*, Vol.133, No.10, pp.1249-1258.
12. Choi, H., and Daniel, D. E. (2006a), "Slug test analysis in vertical cutoff walls. I: Analysis Methods", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.132, No.4, pp.429-438.
13. Choi, H., and Daniel, D. E. (2006b), "Slug test analysis in vertical cutoff walls. II: Applications", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.132, No.4, pp.439-447.
14. Choi, H., Nguyen, T. B., and Lee, C. (2008), "Slug test analysis to evaluate permeability of compressible materials", *Ground Water*, Vol.46, No.4, pp.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.*, Vol.31, No.3, pp.1-9.
16. D'Appolonia, D. J. (1980), "Soil-bentonite slurry trench cutoffs", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.*, Vol.106, No.4, pp.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., pp.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., pp.69-88.
21. Hvorslev, M. J. (1951), "Time lag and soil permeability in groundwater 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, pp.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*, pp.487-492.

(접수일자 2009. 9. 4, 심사완료일 2009. 12. 7)