한국지반공학회논문집 제28권 11호 2012년 11월 pp. 17 ~ 31

ISSN 1229-2427
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.11.17

연직차수벽의 비정상 지하수 흐름에 대한 이론해 : 순간변위시험(slug test) 적용과 투수계수 산정

Analytical Solution for Transient Groundwater Flow in Vertical Cutoff Walls : Application of Slug Test and Evaluation of Hydraulic Conductivity

임 지 희[1] Lim, Jee-Hee　　이 동 섭[2] Lee, Dong-Seop

웽 테 바오[3] Nguyen, The Bao　　최 항 석[4] Choi, Hang-Seok

Abstract

No analytical solution exists for evaluating in-situ hydraulic conductivity of vertical cutoff walls by analyzing slug test results with consideration of transient flow. There is an analytical solution proposed to interpret a slug test performed in a partially penetrated well within an aquifer. However, this analytical solution cannot be directly applied to the cutoff wall because the solution has been developed exclusively for an infinite aquifer instead of a narrow cutoff wall. To consider the cutoff wall boundary conditions (i.e, constant head boundary and no flux boundary condition), the analytical solution has been modified in this study to take into account the narrow boundaries by introducing the imaginary well theory. Type curves are constructed from the currently derived analytical solution and compared with those of a partially penetrated well within an aquifer. The constant head boundary condition provides faster hydraulic head recovery curve than the aquifer case. On the other hand, no flux boundary condition leads to slower hydraulic head recovery. The bigger the shape factor and deviation of the well and the smaller the width of the vertical cutoff wall are, the more effect of boundary condition was observed. The type curves obtained from the analytical solution for a cutoff wall are similar to those made by the numerical method in the literature.

요 지

순간변위시험(slug test) 결과를 이용하여 비정상 흐름을 고려한 연직차수벽의 투수계수를 평가할 수 있는 이론해는 지금까지 제시된 바가 없다. 무한 대수층에 부분 관입된 우물(well)형상에 적용 가능하도록 기존 문헌에서 제시한 이론해는 좁은 지중연속벽체 형상의 연직차수벽의 경계조건을 고려할 수 없다. 이러한 연직차수벽 경계조건을 고려하기 위해, 본 연구에서는 가상 우물이론(imaginary well theory)을 도입하여 두 가지 경계조건(즉, 일정 수두 조건과 불투수 조건)을 만족하도록 새로운 이론해를 유도하였다. 제안된 이론해를 이용하여 구한 연직차수벽에서 시간에 따른 수위 회복 곡선(Type Curve)을 무한 대수층의 경우와 비교한 결과, 일정 수두 경계조건을 적용할 경우, 우물의 수위 회복이 무한 대수층의 결과보다 빠르게 진행되고 반면에 불투수 경계조건을 적용할 경우는 더 느리게 진행되었다. 또한, 우물의 형상비가 클수록, 연직차수벽의 폭이 좁을수록, 우물의 편심 정도가 클수록, 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계조건의 영향이 커진다. 본 논문에서 제시한 이론해를 통해 산정된 Type Curve는 기존 문헌에서 수치해석을 통해 산정된 Type Curve와 유사한 경향을 보였다.

1 비회원, (미)퍼듀대학교 토목공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil Engineering, Purdue Univ., USA)

2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea Univ.)

3 비회원, GS건설 사원 (GS E&C, HCM City MRT CP2, Viet Nam)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3326, Fax: +82-2-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr; 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 5월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Keywords : Slug test, Type curve method, Vertical cutoff wall, Analytical solution, Imaginary well theory, Hydraulic Conductivity

1. 서 론

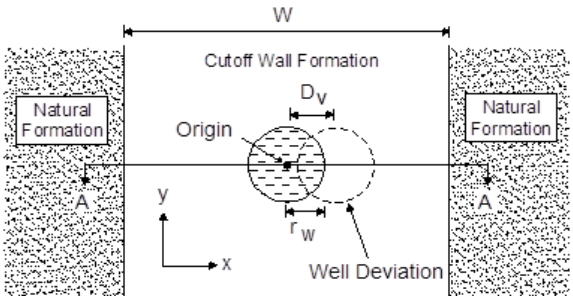
연직차수벽은 오염지반에 지하수의 이동에 의한 오염물의 확산을 효율적으로 방지할 수 있는 수동적 원위치 오염 처리공법 중 하나로, 연직차수벽의 기하학적 형태는 트렌치 굴착장비 구성이나 규모에 따라 정해지며 특수한 굴착장비의 경우 깊이 20～25m, 폭 0.5～1.5m까지 굴착이 가능하다. 따라서 일반적인 연직차수벽은 오염지역을 둘러 감싸도록 주로 폭이 좁고 긴 지중 연속벽체와 같은 형태로 시공된다.

연직차수벽의 현장 투수계수는 기하학적 구조의 제한성 때문에 일반 양정시험(pump test) 보다 순간변위시험(slug test)을 통해 구하는 것이 일반적이다(Teeter와 Clemence, 1986; Yang et al., 1993; Britton et al., 2002; Choi and Danniel, 2006a, 2006b; Choi, 2007). 순간변위시험은 시험방법 자체는 비교적 간단한 편이나 부분 관입된 단일정(single well) 내에 비정상 흐름을 고려해서 지반의 투수계수를 산정하기 위한 시험결과 해석이 어렵다. 특히, 연직차수벽의 경우는 좁은 지중 연속벽체 형태이므로 해석해를 위한 경계 조건이 복잡하다. 과거에는 연직차수벽의 횡방향 경계 조건을 고려하지 않고 무한한 대수층으로 가정한 방법들을 사용해 지반의 투수계수를 산정해 왔다. Choi and Danniel (2006a)은 순간변위시험 결과를 분석하여 현장 투수계수를 산정하는 해석방법에는 Type Curve법과 선형 Line-fiiting법으로 분류하였는데, Cooper법(Cooper et al., 1967; Papadopulos et al., 1973)과 KGS법(Kansas Geological Survey: Hyder et al., 1994)은 대표적인 Type Curve법에 속하고, Bouwer and Rice법(Bouwer and Rice, 1976; Bouwer, 1989)은 대표적인 선형 Line-fitting법에 속한다. Type Curve법은 순간변위시험 중 유발되는 지하수의 비정상 흐름이 그대로 모사되므로 지반의 압축성을 고려할 수 있다. 이와 반대로, 선형 Line-fiiting법은 순간변위시험 중 발생하는 지하수 흐름을 정상상태로 단순화하여 지반의 압축성이 무시된다. 그러나, 앞서 언급한 두 가지 Type Curve법은 횡방향 경계가 무한한 대수층을 가정하기 때문에 연직차수벽의 좁은 지중 연속벽체 형태의 경계 조건을 고려하지 못하는 한계를 갖는다. Choi(2002) and Nguyen (2007)이 수치해석 프로그램인 Slug_3D를 통해 산정된 연직 차수벽의 경계 조건을 고려하여 제한된 조건에 대한 Type Curve를 제안한 바 있으나, 지반의 압축성이 작아질수록 Type Curve간의 차이가 뚜렷하지 않아 정확한 투수계수 및 압축계수를 산정하는데 어려움이 있다 (Cooper et al., 1967).

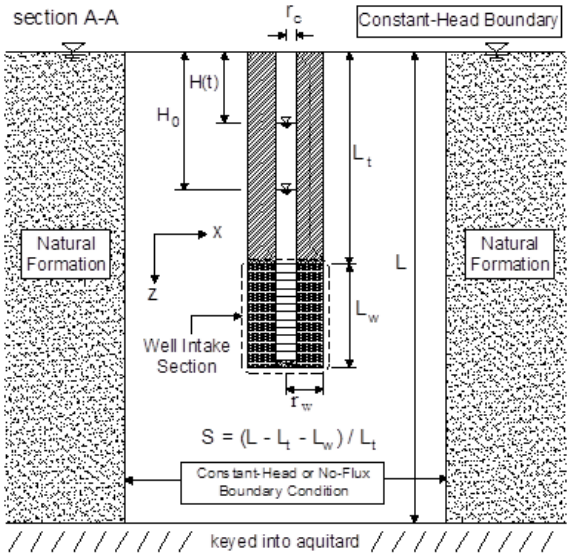
본 연구에서는 기존 연구에서 발표된 무한 대수층에 부분 관입된 단일정에 순간 변위시험을 실시할 때 발생되는 비정상 흐름을 고려할 수 있는 해석적 이론해(Hyder, 1994)를 바탕으로 가상 우물법(imaginary well theory)을 도입하여 연직차수벽의 경계조건을 합리적으로 고려하여 현장투수계수를 평가할 수 있는 이론해를 유도하고 이를 이용하여 일련의 Type Curve를 제시하였다. 연직차수벽의 경계조건은 기존 문헌에서 제시한 두 가지 조건에 대하여 이론해를 유도하였다. 첫째로 주변지반(대수층)에 비하여 연직차수벽의 투수계수가 매우 작다고 가정하여 연직차수벽과 주변지반의 경계면에 Dirichlet 경계 조건인 일정 수두 조건(constant head boundary condition)을 적용하였고, 둘째로 연직차수벽과 주변지반 사이에 투수성이 매우 낮은 필터케익이 존재한다는 가정 하에 경계면에 Neumann 경계 조건인 불투수 경계조건(no flux boundary condition)을 적용하였다. 또한, 우물이 연직차수벽 중앙에 수직으로 시공되지 못하는 경우를 모사하기 위해 단일정 중심과 경계면 사이의 편차거리 변수를 이론해에 포함시켰다.

2. 비정상 흐름에 대한 이론해 유도

Fig. 1은 연직차수벽내에서 수행되는 순간변위시험 모식도를 보여준다. 시공된 연직차수벽의 폭과 깊이는 각각 W와 L로 표기하였다. L_t는 지하수면부터 우물 유입부까지 거리를 나타내고, L_w는 필터팩(filter pack)의 길이를 나타낸다. Butler(1996)는 필터팩을 구성하는 입상재료가 일반적으로 대상 지반에 비해 투수성이 매우 크므로 우물 스크린의 필터팩을 통해 물이 흐를 때 수리적 저항이 거의 없어 순간변위시험 결과에 영향을 주지



(a) Plan view



(b) Vertical cross section A-A

Fig. 1. Slug test configuration in vertical cutoff wall

않는다고 밝혔다. 필터팩의 외경과 우물 케이싱의 내경은 각각 r_w와 r_c로 나타낸다. 제안된 이론해에서 지반 투수계수의 비등방성을 고려하기 위해 수평방향 투수계수 K_h와 수직방향 투수계수 K_v를 따로 표기하였다. 우물케이싱에서 초기수두강하(Rising-head 시험시)는 H_0으로 표기하고, 우물케이싱에서 임의의 시간에서의 수두는 $H(t)$로 표기하였다. $H(t)$는 점차 감소하여 순간변위시험 종료 시에는 0으로 수렴된다. D_v는 평면상에서 우물의 중심이 연직차수벽의 중심에서부터 떨어진 거리를 의미한다.

Hyder et al.(1994)은 Fourier 및 Laplace 변환을 이용하여 무한 대수층에 부분 관입된 단일정 내 비정상 흐름에 관한 이론식을 제시하였다. 이 때 우물 관입시 지반 내 교란이 발생하는 것을 고려하여 반지름 r_{sk}을 기준으로 지반을 두 구역으로 나누어 교란 영역을 고려할 수 있도록 하였다. 무한대수층 내 순간변위시험에 대한 지하수 흐름 지배 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 h_i}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial h_i}{\partial r}+\left(\frac{K_{zi}}{K_{hi}}\right)\frac{\partial^2 h_i}{\partial z^2}=\left(\frac{S_{si}}{K_{hi}}\right)\frac{\partial h_i}{\partial z},\quad r>r_w \tag{1}$$

여기서, h_i는 대수층 내 수두를 나타내며, i는 r_{sk}를 기준으로 나뉜 두 구역을 의미낸다. $r_w<r\leq r_{sk}$인 경우, i=1이며, $r_{sk}<r$인 경우, i=2이다. S_{si}는 구역에 따른 비저류계수를 의미하며, t는 시간을 의미한다.

자유수면을 가진 무한 대수층의 경계 조건을 고려하여 Hyder et al.(1996)에 의해 제시된 정규 수두($\phi=H(t)/H_0$)를 Laplace 형식으로 나타내면 다음 식 (2), (3)과 같다.

$$\widetilde{\phi}_1=\frac{\gamma F_s^{-1}(F_s f_2)}{2+\gamma p\Omega^*},\quad 1<\frac{r}{r_w}\leq\frac{r_{sk}}{r_w}\ \text{(구역 1)} \tag{2}$$

$$\widetilde{\phi}_2=\frac{\gamma F_s^{-1}(F_s f_3)}{2+\gamma p\Omega^*},\quad \frac{r_{sk}}{r_w}\leq\frac{r}{r_w}<\infty\ \text{(구역 2)} \tag{3}$$

여기서, 역 유한 푸리에 sine 변환 함수인 $F_s^{-1}(F_s f)$ 및 Ω^*는 다음 식 (4), (5)와 같다.

$$F_s^{-1}(F_s f)=\frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}[1+(-1)^{n+1}]\frac{f}{n}sin\frac{n\pi}{4\beta}sin\frac{n\pi(1+2(L_t/L_w))}{4\beta}sin\frac{n\pi z}{2L_w\beta} \tag{4}$$

$$\Omega^*=\frac{16\beta}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}[1+(-1)^{-1}]\frac{f_1}{n^2}sin^2\frac{n\pi}{4\beta}sin^2\frac{n\pi(1+2(L_t/L_w))}{4\beta} \tag{5}$$

여기서, f는 f_1, f_2, f_3을 의미하며, 다음 식 (6)~(8)과 같이 0차 및 1차 수정 Bessel 함수인 $K_0(x)$, $K_1(x)$, $I_0(x)$, $I_1(x)$을 포함한다.

$$f_1=\frac{\triangle_2 K_0(v_1)-\triangle_1 I_0(v_1)}{v_1[\triangle_2 K_1(v_1)+\triangle_1 I_1(v_1)]} \tag{6}$$

$$f_2=\frac{\triangle_2 K_0(v_1(r/r_w))-\triangle_1 I_0(v_1(r/r_w))}{v_1[\triangle_2 K_1(v_1)+\triangle_1 I_1(v_1)]} \tag{7}$$

$$f_3=NK_0(v_2(r/r_w))\frac{I_0(v_1(r_{sk}/r_w))K_1(v_1(r_{sk}/r_w))+K_0(v_1(r_{sk}/r_w))I_1(v_1(r_{sk}/r_w))}{\gamma v_1[\triangle_2 K_1(v_1)+\triangle_1 I_1(v_1)]} \tag{8}$$

여기서, $\triangle_1$, $\triangle_2$, v_i는 다음 식 (9)~(11)과 같다.

$$\triangle_1 = K_0(v_1(r_{sk}/r_w))K_1(v_2(r_{sk}/r_w)) - \frac{N}{\gamma}K_0(v_2(r_{sk}/r_w))K_1(v_1(r_{sk}/r_w)) \quad (9)$$

$$\triangle_2 = I_0(v_1(r_{sk}/r_w))K_1(v_2(r_{sk}/r_w)) + \frac{N}{\gamma}K_0(v_2(r_{sk}/r_w))I_1(v_1(r_{sk}/r_w)) \quad (10)$$

$$v_i = \sqrt{\left(\frac{A_i}{a^2}\right)\omega^2 + R_i p} \quad (11)$$

이 때, $A_i = K_{zi}/K_{hi}$, $a = L_w/r_w$, $N = v_1/v_2$, $\alpha = 2r_w^2 L_w S_{s2}/r_c^2$, $\gamma = K_{h2}/K_{h1}$, $\beta = L/L_w$, $\lambda = S_{s2}/S_{s1}$, $R_1 = \gamma\alpha/2\lambda$, $R_2 = \alpha/2$, $\omega = n\pi/\beta(n = 1,2,3,...)$을 의미한다.

2.1 연직차수벽 경계에 일정 수두 경계조건 적용시 이론해

본 논문에서 연직차수벽과 주변지반 사이의 경계 조건을 고려하기 위해서 가상우물이론(imaginary well theory)을 도입하였다. 무한 대수층에 가상우물이론을 도입함으로써 두 가지 다른 경계 조건을 적용할 수 있다. 각각의 적용 방식은 Fig. 2 (a), (b)와 같다.

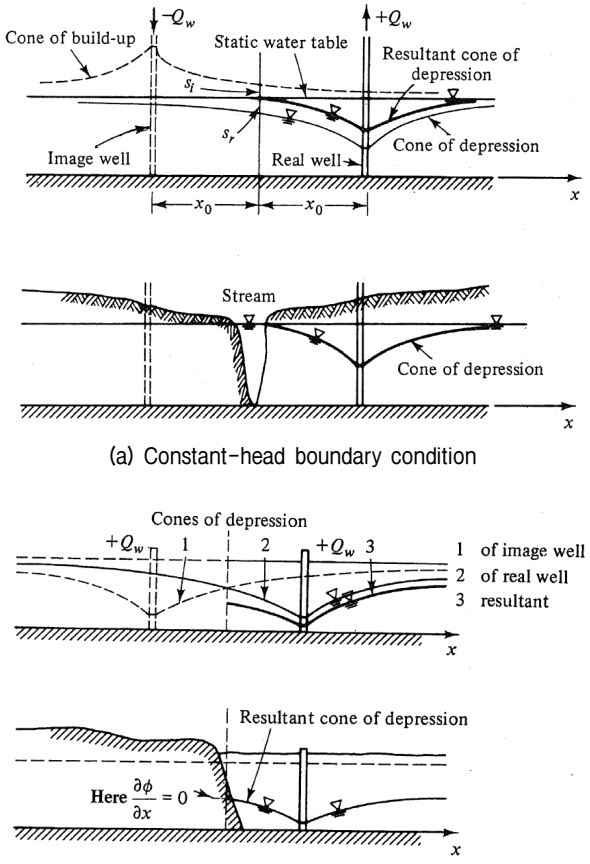


Fig. 2. Configuration of different boundary conditions (reprinted from Bear (1979))

먼저, 일반적으로 주변지반에 비해 연직차수벽의 투수계수가 매우 작으므로(Choi et al., 2008) 모든 수두 손실이 연직차수벽 내에서만 발생한다고 가정하여 연직차수벽과 주변지반의 경계면에 일정 수두 조건(constant head boundary condition)을 적용하였다.

일정 수두 경계조건를 고려하기 위해서는 실제 우물에서 연직차수벽과 주변지반 사이의 경계면까지 이격된 거리의 두 배 거리에 위치한 가상의 우물에 실제 우물과 유량의 크기는 같고 방향이 반대인 지하수가 유입되는 경우로 모사할 수 있다(Fig. 2(a)). 연직차수벽의 경우는 실제 우물의 양 측면에 일정 수두 경계가 부여되기 때문에 거울효과(mirror effect)를 고려하여 수평 방향으로 무한히 많은 가상우물이 존재한다고 가정하였다(Bear, 1979). 연직차수벽의 폭 W와 편차거리 D_v를 고려하여 도식한 가상우물의 위치는 Fig. 3과 같다.

실제 우물의 위치를 $(0,z,t)$로 설정하고, 가상우물들의 위치를 각각 $(W-2D_v,z,t),(2W,z,t)$, $\cdots,((2n-1)W-2D_v,z,t),(2nW,z,t)$ (여기서, $n=-\infty\sim\infty$인 정수)로 설정한 후, 각 가상우물의 위치로 Hyder et al.(1994)이 제안한 식 $\phi(r,z,t)$을 평행 이동시켜 교번하며 더한다. 이러한 방식으로 일정 수두 조건을 반영한 정규화된 수두 함수 $\phi(r,z,t)_{constant}$를 구할 수 있다. 이 때, 수두 함수 $\phi(r,z,t)$는 원통좌표를 사용하기 때문에 음의 r값은 존재하지 않는다. 따라서 실제 우물의 우측에 위치하는 가상 우물은 평행이동 후 z축 대칭을 통해 가상 우물을 이론해에 고려한다. 이를 정리하여 일정 수두 경계조건에 대한 수두 함수 $\phi(r,z,t)_{constant}$는 다음 식 (12)과 같이 나타낼 수 있다.

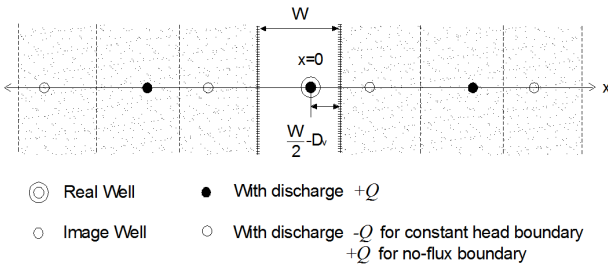


Fig. 3. Locations of image wells

$$\phi(r,z,t)_{constant} = \phi_1(r,z,t) + \sum_{n=-\infty}^{-1} \phi_2(r-2nW,z,t)$$
$$- \sum_{n=-\infty}^{0} \phi_2(r-(2n-1)W+2D_v,z,t)$$
$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \phi_2(-(r-2nW),z,t)$$
$$- \sum_{n=1}^{\infty} \phi_2(-(r-(2n-1)W+2D_v),z,t) \quad (12)$$

이렇게 구해진 수두 함수 $\phi(r,z,t)_{constant}$을 이용해서 일정 수두 경계조건에 대한 시간에 따른 실제 우물 내 정규화 된 수위 $(H(t)/H_0)_{constant}$는 다음 식 (13)와 같이 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{H(t)}{H_0}\right)_{constant} = \int_{z=L_t}^{L_t+L_w} \phi(r_w,z,t)_{constant} dz \quad (13)$$

2.2 연직차수벽 경계에 불투수 경계조건 적용시 이론해

필터케이크는 연직차수벽 시공 중 연직차수벽과 지반 사이의 경계면에서 형성된다. 연직차수벽을 시공할 때 트렌치의 안정성을 확보하기 위해 벤토나이트-물 슬러리를 굴착된 트렌치에 채워 넣는다. 이때 수두차이에 의해서 물과 함께 미세 슬러리입자가 주변지반의 공극 사이로 침투하고 필터링되어 필터케이크가 굴착면에 생성된다. 트렌치 굴착 도중에 생성된 필터케이크는 일반적으로 연직차수벽의 뒤채움이 완료된 이후에도 제거되지 않고 완성된 연직차수벽과 지반 사이의 경계면에 존재한다(Nguyen et al., 2008; Henry et al., 1998).

Henry et al.(1998)은 실내시험을 통해 필터케이크의 투수계수가 $3\times10^{-11} m/s$에서 $2\times10^{-10} m/s$범위를 가짐을 보였는데, 이 범위는 연직 차수벽의 설계 투수계수인 $1\times10^{-8} m/s$ 보다 매우 작은 값임을 알 수 있다. 따라서, 필터케이크는 상대적으로 불투수막에 가까운 낮은 투수성을 가지고 있어서 필터케이크가 형성된 연직차수벽과 지반 사이의 경계면을 흐름이 없는 경계조건 또는 불투수 경계조건(no flux boundary condition)으로 취급할 수 있다(Nguyen et al., 2008; Choi and Daniel, 2006b; Nguyen et al., 2011). 불투수 경계조건을 고려하기 위해서는 실제 우물에서 연직차수벽과 주변지반 사이의 경계면까지 이격된 거리의 두 배 거리에 위치한 가상의 우물에 실제 우물과 유량의 크기와 방향이 같은 지하수가 유입되는 경우로 모사할 수 있다(Fig. 2(b)). 따라서, 일정 수두 경계조건의 경우와 마찬가지로 Fig. 3과 같이 설정한 가상우물로 평행 이동시킨 수두 함수들을 모두 합산하여 구할 수 있다.

이렇게 계산된 불투수 경계 조건을 고려한 수두 함수 $\phi(r,z,t)_{no-flux}$는 다음 식 (14)과 같다. 또한, 식 (14)으로부터 실제 우물 내 정규화 된 수위$(H(t)/H_0)_{no-flux}$를 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi(r,z,t)_{no-flux} = \phi_1(r,z,t) + \sum_{n=-\infty}^{-1} \phi_2(r-2nW,z,t)$$
$$+ \sum_{n=-\infty}^{0} \phi_2(r-(2n-1)W+2D_v,z,t)$$
$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \phi_2(-(r-2nW),z,t)$$
$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \phi_2(-(r-(2n-1)W+2D_v),z,t) \quad (14)$$

$$\left(\frac{H(t)}{H_0}\right)_{no-flux} = \int_{z=L_t}^{L_t+L_w} \phi(r_w,z,t)_{no-flux} dz \quad (15)$$

2.3 연직차수벽 투수계수 산정방법 (Type Curve법)

전술한 연직차수벽의 두 가지 경계조건에 따라 산정된 시간에 따른 정규화된 우물 케이싱 내 수위변화(일정 수두 경계조건의 경우: $(H(t)/H_0)_{constant}$, 불투수 경계조건의 경우: $(H(t)/H_0)_{no-flux}$)를 이용해 현장 순간변위시험에 대한 연직차수벽 형상에 따른 Type Curve를 도출할 수 있다. Type Curve는 시간을 무차원 시간변수인 $\beta_p(=K_hL_wtr_c^2)$로 변환하여 표현한다. 무차원 압축지수 $\alpha_p(=S_sL_wr_w^2/r_c^2)$와 β_p의 적용은 대수층을 부분적으로 관통하는 우물에 대해 수학적으로 타당성이 입증되었다(Hyder, 1994; Hyder et al., 1994). 일치성 평가(matching process)를 통해 현장 순간변위시험 결과와 가장 근접하는 Type Curve를 이용하여 연직차수벽의 투수계수(K_h)와 비저류계수 (S_s)를 다음 식 (16), (17)과 같이 예측할 수 있다.

$$S_s = \frac{\alpha_p}{L_w}\left(\frac{r_c}{r_w}\right)^2 \quad (16)$$

$$K_h = \frac{1.0\,r_c^2}{L_w t_{1.0}} \quad (17)$$

여기서, 물의 흐름은 수평방향이 지배적이라고 보고, 투수계수로 수평방향 투수계수인 K_h를 사용하였다. 또한, $t_{1.0}$은 현장 순간변위시험 결과와 가장 잘 일치하는 Type Curve에서 β_p가 1.0일 때의 시간을 의미한다.

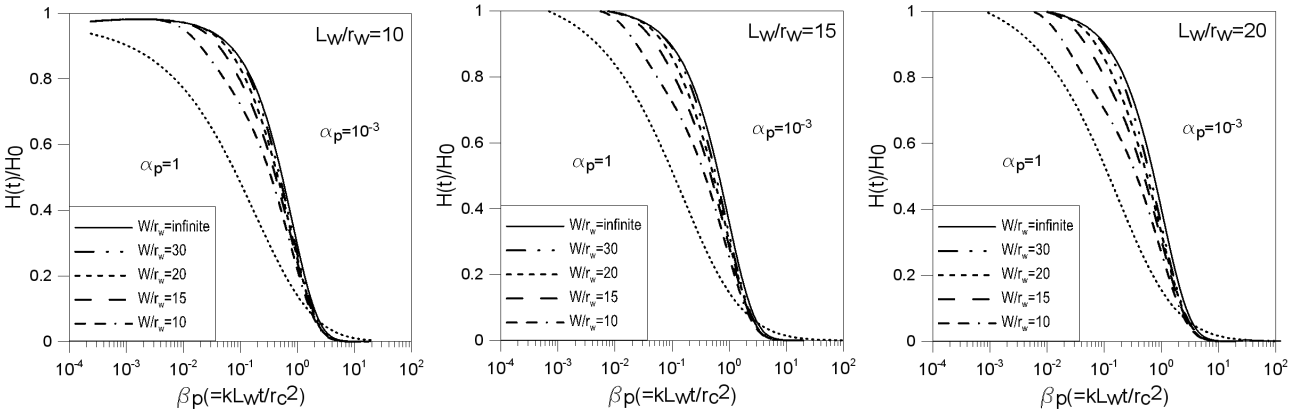
3. 연직차수벽의 영향 조건에 따른 Type Curve

연직차수벽의 기하학적 조건을 고려하여 유도된 이론식을 통해 연직차수벽의 폭과 편심 정도에 따른 영향을 살펴보았다. 연직차수벽의 투수계수가 등방성이라고 가정하고, $S=1$인 경우 즉, 대수층 중앙에 우물의 필터팩이 위치한 경우, 우물의 형상비 L_w/r_w에 따른 Type Curve를 비교하였다. 연직차수벽의 시공 깊이는 임의로 11m로 고정하였고, 필터팩의 외경(r_w)과 우물 케이싱의 내경(r_c)은 각각 0.1m, 0.02m로 고려하였다. 또한, 관입에 의한 교란은 무시하였다. 즉, Hyder(1994)가 유도한 이론식에서 r_{sk} 내부와 외부에 동일한 투수계수와 압축지수를 적용하였다.

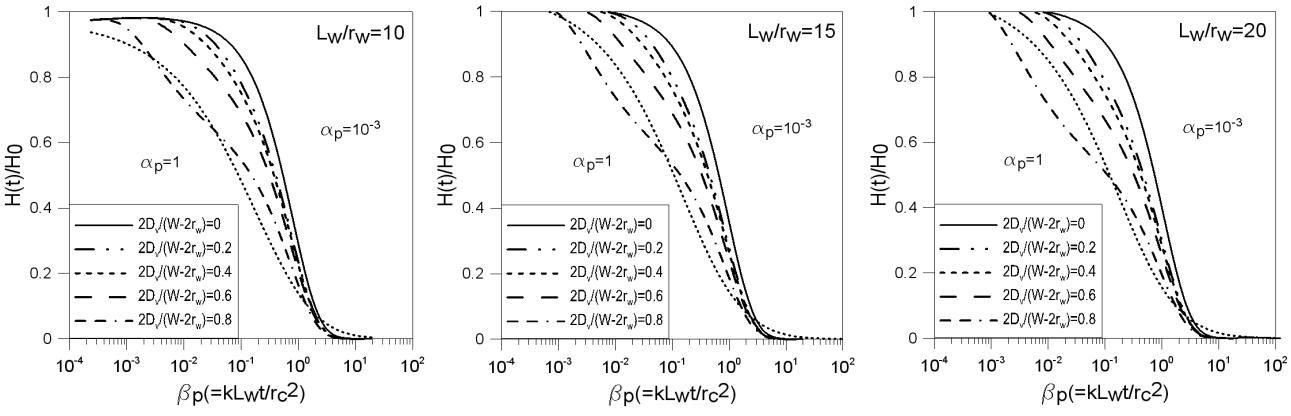
먼저, 연직차수벽 폭의 영향을 살펴보기 위해 편심이 없는 경우, W/r_w=infinite, 30, 20, 15, 10의 경우를 고려하였고, 편심 정도에 따른 영향을 살펴보기 위해 W/r_w =15인 경우, 정규화된 우물의 편심비율인 $2D_v/(W-2r_w)$가 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8인 경우를 비교하였다.

3.1 연직차수벽 경계에 일정 수두 경계조건 적용시 Type Curve

연직차수벽과 주변 지반 사이를 일정 수두 경계조건으로 가정할 때, 우물의 형상비 L_w/r_w에 따라 구해지는 Type Curve는 Fig. 4와 같다. 연직차수벽의 폭이 좁아질수록, 우물의 편심 정도가 커질수록 우물 내 수위 회복이 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 일정 수두 경계 조건의 경우, 연직차수벽의 순간변위시험시, 우물 케이싱 내 수두 회복이 횡방향 경계가 구속되지 않는 무한한 대수층에서보다 빠르게 발생하기 때문이다. 따라서, 연직차수벽의 폭이 좁아질수록, 우물의 편심 정도



(a) Effect of width of vertical cutoff wall ($D_v=0$)



(b) Effect of well deviation ($W/r_w=15$)

Fig. 4. Type curves for the constant-head boundary condition with various aspect ratios

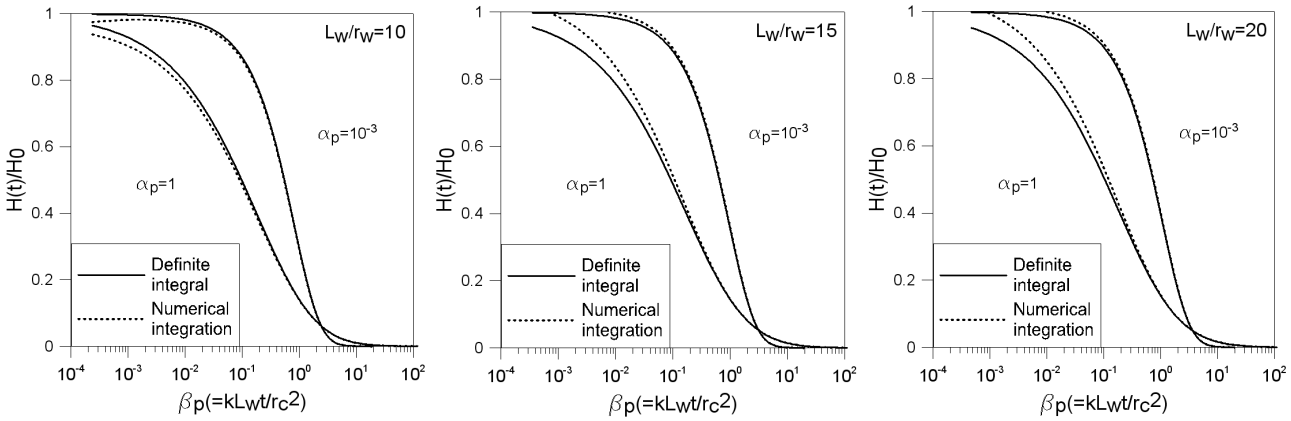


Fig. 5. Comparison between definite and numerical integrals

가 커질수록 경계 조건의 영향이 증가하여 수위 회복 속도에 더 큰 차이가 나타난 것으로 보인다. 연직차수벽 폭에 따른 수위 회복의 차이는 약 β_p=0.01에서부터 발생하였다. 또한 우물의 형상비가 작을수록 β_p에 따른 수위 회복은 약간 먼저 발생하며, 연직차수벽 폭의 영향은 적게 나타나는 것으로 보인다. 우물의 편심 정도에 따른 영향을 살펴보면, 편심 정도가 커질수록 작은 β_p 구간에 미치는 영향이 커졌으며, 이 역시 우물의 형상비가 작을수록 편심 영향은 적게 나타났다.

또한, 지반의 무차원 압축 매개변수 α_p가 1인 경우와 10^{-3}인 경우를 살펴보았으며, α_p가 1인 경우 수위 회복이, α_p가 10^{-3}인 경우에 비해 훨씬 빠르게 발생했다. 또한, 상대적으로 압축성이 큰 α_p가 1인 경우, 연직차수벽의 폭 및 우물의 편심 정도에 따른 Type Curve들이 모두 일치하여 연직차수벽 폭 및 우물의 편심 정도에 따른 영향은 거의 없었다. Fig. 4의 α_p가 1인 경우는 편의상 하나의 Type Curve로 표시하였다.

한편, Type Curve의 시작점이 1과 정확히 일치하지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 경계 조건을 고려하여 수정한 이론해를 적분하는 과정에서 수치적분을 사용하였기 때문이다. 무한 대수층을 가정한 Hyder(1994)는 수학적 정적분을 통해 Type Curve를 유도하였으나, 본 논문에서 유도한 가상우물이론을 이용한 연직차수벽에 적용할 수 있는 이론해에서는 피적분함수가 매우 복잡하여 수치적분을 적용하였다. 수치 적분 방법으로는 세 점을 사용한 가오스 적분을 사용하였다. 두 적분방법의 차이를 확인하기 위해 무한 대수층 조건에 대한 수학적 정적분 결과와 수치적분 결과를 비교하면 β_p가 작은 부분에서는 수치적분이 잘 맞지 않으나 시간이 경과 할수록 거의 일치하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5). 이는 순간변위시험에서 우물의 지하수가 배출되는 초기 시점에, 필터팩의 길이 내 수두 간의 차이가 매우 크게 나타나기 때문인 것으로 보인다.

3.2 연직차수벽 경계에 불투수 경계조건 적용시 Type Curve

앞 절에서 언급한 대로 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계에 투수계수가 매우 작은 필터케이크가 존재하는 경우, 이 경계면을 불투수 경계조건으로 취급할 수 있다. 따라서 연직차수벽의 경계에 불투수 경계조건을 적용하는 경우, 우물의 형상비 L_w/r_w에 따라 구해지는 Type Curve는 Fig. 6과 같다. 연직차수벽의 폭이 좁아질수록, 우물의 편심 정도가 커질수록 우물 내 수위 회복이 느리게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 불투수 경계조건의 경우, 연직차수벽의 순간변위시험시, 우물케이싱 내 수두 회복이 횡방향 경계가 구속되지 않는 대수층에서보다 느리게 발생하기 때문이다. 따라서, 연직차수벽의 폭이 좁아질수록, 우물의 편심 정도가 커질수록 경계 조건의 영향이 커져 수위 회복 속도에 더 큰 차이가 나타난 것으로 보인다.

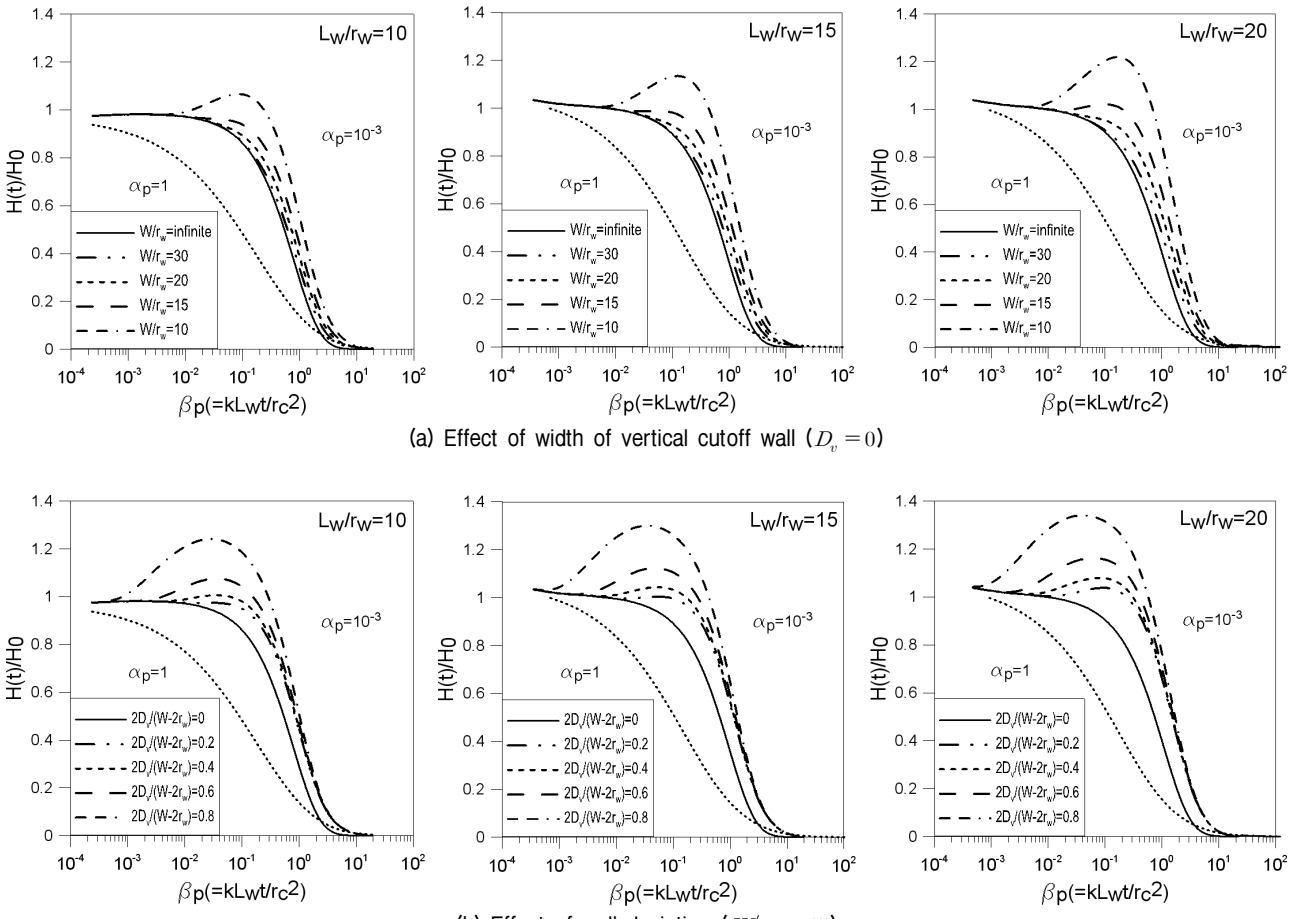
연직차수벽 폭 및 우물의 편심 정도에 따른 영향을 살펴보면, 일정 수두 경계조건의 경우와 마찬가지로, 폭에 따른 수위 회복의 차이는 약 β_p=0.01에서부터 발생하는 것으로 보이며, 편심 정도가 커질수록 작은 β_p 구간에 미치는 영향이 큰 것으로 보인다. 또한, 우물의 형상비가 작을수록 β_p에 따른 수위 회복은 약간 먼저 발생하며, 연직차수벽 폭의 영향 및 편심 영향은 다소 적게 나타났다. 또한, 지반의 무차원 압축 매개변수 α_p가 1인

경우(즉, 상대적으로 압축성이 큰 경우)는, 일정 수두 경계조건에서와 마찬가지로, α_p가 10^{-3}인 경우에 비해 수위 회복이 훨씬 빠르게 발생했으며, 연직차수벽 폭 및 우물의 편심 정도에 따른 영향은 거의 없었다. 따라서 이 경우 역시, 편의상 α_p가 1인 경우는 하나의 Type Curve로 Fig. 6에 표시하였다.

한편, 불투수 경계조건을 적용한 경우, 초기 β_p 범위에서 우물 내 정규화된 수위가 1을 넘는 구간이 발생하였다. 이는 포화상태의 점토 지반에서 압밀에 의해 비정상흐름이 발생하는 경우, 추가적인 하중 증가 없이도 과잉 간극수압이 초기 값보다 일정 기간 증가하다가 다시 감소하는 Mandel-Cryer 효과 또는 지반의 점도 효과(viscous effect)로 설명될 수 있다(Zhu and Yin, 2001). 실제 점토지반에서 압밀이 발생하는 경우, 이러한 현상들이 실험적으로 관찰된 바 있으며(Gibson et al., 1963; Crooks et al., 1984; Conlin and Maddock, 1985; Kabbaj et al., 1988), Mandel-Cryer 효과는 시간에 따른 간극수와 흙 입자 구조간의 변형 적합성이 상호 작용하는 과정에서 전체 응력 증가로 인해 발생하며(Schiffman et al., 1969), 점도 효과는 크리프에 의한 지반의 압축과 매우 느린 간극수압 소산 과정에서 발생한다(Yin et al., 1993). 포아송 비가 작을수록 Mandel-Cryer 효과는 크게 나타나며(McKinley, 1998), 지반의 투수계수가 작을수록 점도 효과는 크게 나타난다(Zhu and Yin, 2001). 연직차수벽의 뒷채움재가 0.05에서 0.2 범위의 작은 포아송 비와 $1\times10^{-8}m/s$ 정도의 매우 낮은 투수계수를 보이므로, 순간변위시험에서의 수위 회복 과정에서 이런 현상이 발생했다고 사료된다.

4. 비정상 흐름에 대한 이론해와 기존 연구결과 비교

Choi(2002) and Nguyen(2007)은 수치해석 프로그램인 Slug_3D를 통해 연직차수벽의 경계조건을 고려한 일련의 Type Curve를 각각 제안하였다. Choi(2002)는 필터케이크가 존재하지 않는 경우에 대하여 연직차수



(a) Effect of width of vertical cutoff wall ($D_v=0$)

(b) Effect of well deviation ($W/r_w=15$)

Fig. 6. Type curves for the no-flux boundary condition with various aspect ratios

벽과 주변 지반의 경계에 일정 수두 조건을 적용하였고, Nguyen(2007)은 투수계수가 상대적으로 매우 낮은 필터케이크가 존재하는 것을 고려하여 연직차수벽과 주변 지반의 경계에 불투수 조건을 적용하였다. 두 경우 모두 현장조건에 따른 다양한 W/r_w값과 우물의 편심을 고려하여 총 120가지 Type Curve를 제시한 바 있다. 본 논문에서 제시된 이론해의 타당성을 검증하기 위하여 기존 연구에서 제시되었던 120가지의 Type Curve 중 L_w/r_w=10인 경우에 대해 본 논문에서 유도된 이론해로부터 얻어진 Type Curve를 두 가지 경계 조건에 따라 다음과 같이 비교하였다.

4.1 연직차수벽의 경계에 일정 수두 조건 적용시

연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계에 일정 수두 조건을 적용하고, 가상우물이론으로 유도된 이론해로부터 얻어진 Type Curve와 수치해석(Slug_3D)을 적용하여 Choi(2002)가 제시한 Type Curve는 Fig. 7에 비교하였다. 각 방법에 따른 Type Curve의 비교는 L_w/r_w=10이고 L/L_w=11이며, 대수층 중간 깊이에 우물의 필터팩이

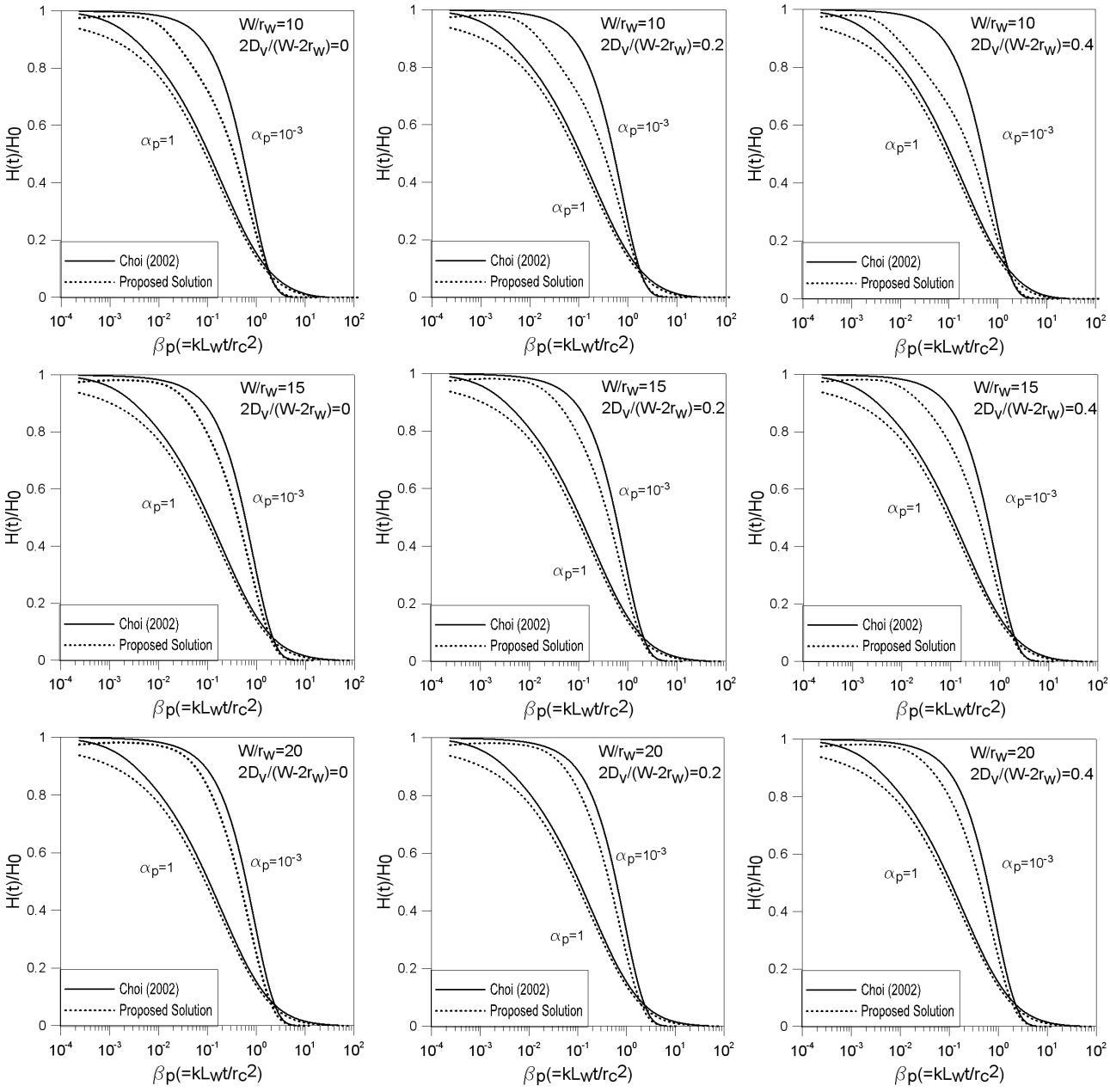


Fig. 7. Type curves for the constant-head boundary condition with $L_w/r_w = 10$ ($L/L_w = 11$ and $S = 1$)

위치한 경우(즉, $S=1$) 조건에 대해 평가되었다.

연직차수벽 뒤채움재의 압축성이 상대적으로 큰 경우($\alpha_p=1$), β_p 값이 미소한 구간을 제외하고두 방법으로 구한 Type Curve가 일치하는 경향을 보였다. 앞에서 언급했듯이 수두회복 초기 데이터의 차이는 수치적분에 의한 오차로 볼 수 있다. 하지만, $\alpha_p=10^{-3}$인 경우, 이론해로 구해진 결과와 Choi(2002)가 제시한 Type Curve간의 오차는 연직차수벽의 폭이 일정한 경우, 우물의 편심 정도가 커질수록 크게 나타났고, 연직차수벽의 폭이 커질수록 오차는 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 본 논문에서 제시한 이론해의 경우 수치해석 결과보다 연직차수벽의 경계 조건의 영향을 크게 받는 것을 의미한다. 특히 β_p가 작은 구간에서 이러한 영향이 더 크게 나타났다.

4.2 연직차수벽의 경계에 불투수 조건 적용시

연직차수벽의 주변 지반 사이의 경계에 불투수 조건을 적용하고, 가상우물이론으로 유도된 이론해로부터 얻어진 Type Curve와 수치해석(Slug_3D)를 적용하여

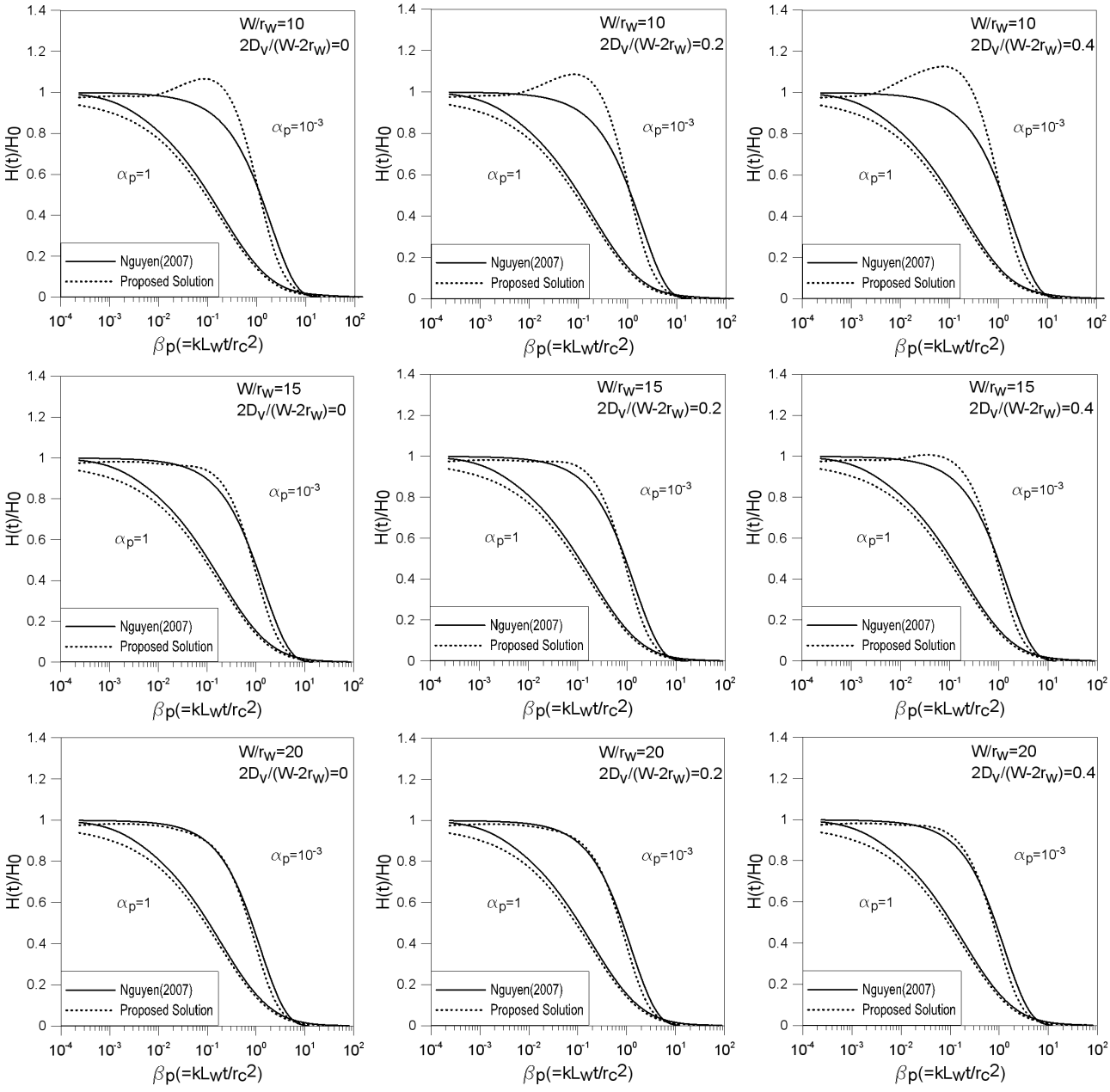


Fig. 8. Type curves for the no-flux boundary condition with $L_w/r_w=10$ ($L/L_w=11$ and $S=1$)

Nguyen(2007)이 제시한 Type Curve는 Fig. 8에 비교하였다. 일정 수두 조건의 경우와 동일하게 각 방법에 따른 Type Curve의 비교는 L_w/r_w=10이고 L/L_w=11이며, 대수층 중간 깊이에 우물의 필터팩이 위치한 경우(즉, $S=1$) 조건에 대해 평가되었다.

Type Curve 비교 결과, 일정 수두 경계 조건을 적용한 경우와 유사하게, 연직차수벽 뒤채움재의 압축성이 상대적으로 큰 경우($\alpha_p=1$), β_p 값이 미소한 구간을 제외하고는 거의 일치하는 경향을 보였으며, 반면에 $\alpha_p=10^{-3}$인 경우, 본 논문에서 제시된 이론해로 구해진 Type Curve가 수치해석으로 구한 Type Curve 보다 연직차수벽 경계 조건에 대한 영향이 더 큼을 확인할 수 있다.

또한, W/r_w=10에 대한 이론해의 경우, 앞 절에서 언급했듯이 포화상태 점토 지반의 압밀 과정에서 발생하는 Mandel-Cryer 효과 또는 지반의 점도 효과(viscous effect)에 의해 정규화된 수두 값이 초기 값보다 증가하였다가 감소하는 경향이 뚜렷하게 발생하였다. 하지만, 이런 경향은 Slug_3D를 이용한 수치해석 결과에서는 발생하지 않았다.

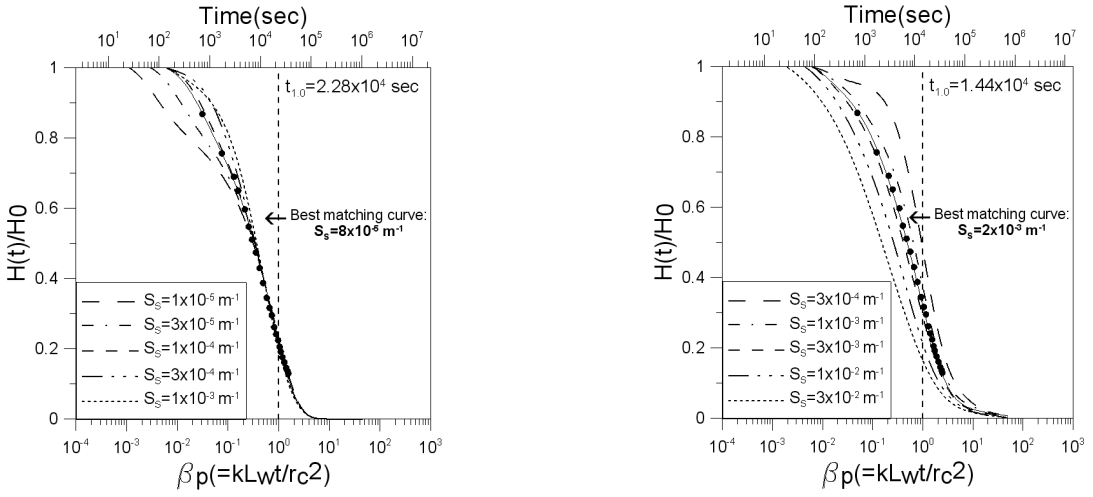
5. 현장 사례조사를 통한 해석결과 비교

본 논문에서 제안한 연직차수벽에 적용할 수 있는 이론해와 이로부터 도식된 Type Curve를 이용하여 연직차수벽에 수행된 순간변위시험 결과가 기록된 EMCON (1995) 사례조사를 재분석 하였다. Choi and Daniel(2006a)과 Nguyen et al.(2008)이 수행한 해석결과와의 비교를 통해 본 논문에서 제시한 이론해의 타당성을 검증하였다. 연구 대상지역은 1990년 초에 건설된 캘리포니아 리치몬드의 West Contra Costa Sanitary 매립지이다. 우물과 연직차수벽의 해석 조건은 Table 1에 제시되었다.

본 연구에서 유도한 이론해를 이용하여 연직차수벽

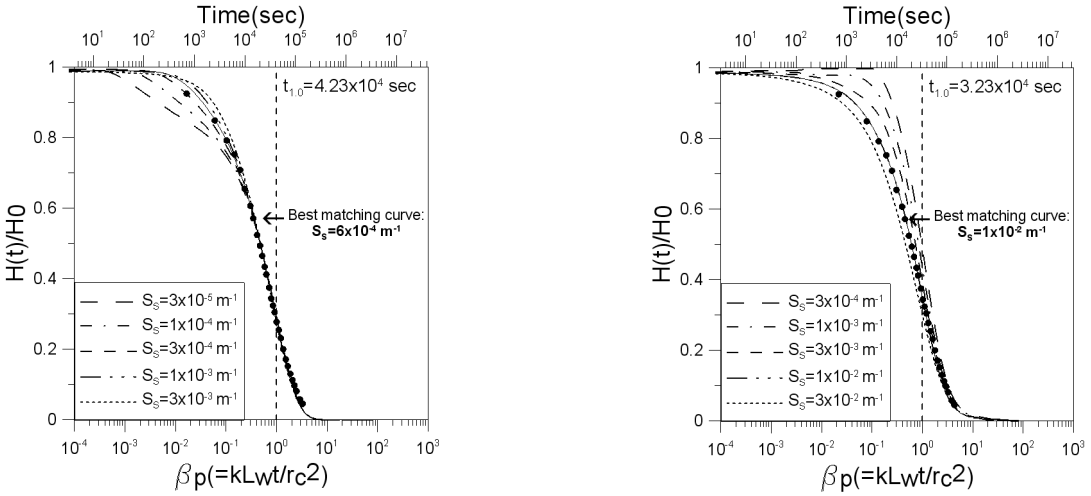
Table 1. Modeling geometry of slug test in vertical cutoff walls (EMCON, 1995)

Type	Geometry variables	Values	
		93-1 (M-11/15 cutoff wall)	94-15 (M-17/21 cutoff wall)
Well	$r_c(m)$	0.025	0.025
	$r_w(m)$	0.105	0.036
	$L_w(m)$	1.15	0.55
Cutoff wall	$L(m)$	9.04	9.26
	$L_t(m)$	4.72	4.42
	$W(m)$	0.92	0.92
	$D_v(m)$	0	0.23



(a) Constant-head boundary condition (b) No-flux boundary condition

Fig. 9. Slug test analysis for Case 93-1 in the M-11/15 vertical cutoff wall (Type curve method)



(a) Constant-head boundary condition (b) No-flux boundary condition

Fig. 10. Slug test analysis for Case 94-15 in the M-17/21 vertical cutoff wall (Type curve method)

의 두 가지 경계 조건에 대해 작성한 Type Curve에 현장의 순간변위시험 결과로 일치성 평가(matching process)를 수행하는 Type Curve법의 해석절차를 Fig. 9와 Fig. 10에 M-11/15와 M-17/21 사례에 대해 각각 나타냈다. M-11/15의 경우, 일정 수두 경계조건에서, 현장 시험결과는 $S_s = 8.0\times10^{-5}m^{-1}$ Type Curve와 가장 잘 일치하였고, 불투수 경계조건에서는 $S_s = 2.0\times10^{-3}m^{-1}$ Type Curve와 가장 잘 일치하였다. M-17/21의 경우, 일정 수두 경계조건에서, 현장 시험결과는 $S_s = 6.0\times10^{-4}m^{-1}$ Type Curve와 가장 잘 일치하였고, 불투수 경계조건에서는 $S_s = 1.0\times10^{-2}m^{-1}$ Type Curve와 가장 잘 일치하였다.

재성형된 시료의 투수계수는 $1.0\times10^{-10}m/s$에서 $2.0\times10^{-8}m/s$의 범위로 실내투수계수 측정시험을 통해 예측되었고, 비교란 시료의 투수계수는 M-11/15 경우, $6.0\times10^{-9}m/s$에서 $4.0\times10^{-8}m/s$의 범위와 M-17/21 경

Table 2. Case study results

Case	Type Curve method (Choi and Daniel(2006a), Nguyen et al. (2008))			Analytical solution (this study)			EMCON's original results		
Constant-head boundary condition									
Case	α_p	$t_{1.0}(s)$	$S_s^a(m^{-1})$	$k^b(m/s)$	$t_{1.0}(s)$	$S_s(m^{-1})$	$k^b(m/s)$	$S_s(m^{-1})$ (lab. test)	$k(m/s)$ (Bouwer & Rice method)
93-1 (M-11/15)	1.3×10^{-1}	2.2×10^{4}	6.7×10^{-3}	2.5×10^{-8}	2.28×10^{4}	8.0×10^{-5}	2.38×10^{-8}	2.5×10^{-2}	3.0×10^{-8}
94-15 (M-17/21)	3.9×10^{-2}	4.0×10^{4}	3.5×10^{-2}	3.0×10^{-8}	4.23×10^{4}	6.0×10^{-4}	2.69×10^{-8}	2.5×10^{-2}	4.0×10^{-8}
No-flux boundary condition									
Case	α_p	$t_{1.0}(s)$	$S_s^a(m^{-1})$	$k^b(m/s)$	$t_{1.0}(s)$	$S_s^a(m^{-1})$	$k^b(m/s)$	$S_s(m^{-1})$ (lab. test)	$k(m/s)$ (Bouwer & Rice method)
93-1 (M-11/15)	7.9×10^{-3}	8.0×10^{3}	3.9×10^{-4}	6.8×10^{-8}	1.44×10^{4}	2.0×10^{-3}	3.77×10^{-8}	2.5×10^{-2}	3.0×10^{-8}
94-15 (M-17/21)	7.1×10^{-3}	2.2×10^{4}	6.2×10^{-3}	5.2×10^{-8}	3.23×10^{4}	1.0×10^{-2}	3.52×10^{-8}	2.5×10^{-2}	4.0×10^{-8}

$a.\ S_s = \dfrac{\alpha_p}{L_w}\left(\dfrac{r_c}{r_w}\right)^2 \quad b.\ k = \dfrac{1.0r_c^2}{L_w t_{1.0}}$

우, $8.0\times10^{-10}m/s$에서 $1.0\times10^{-8}m/s$의 범위로 나타났다. 연직차수벽 뒤채움재의 비저류계수는 $2.5\times10^{-2}m^{-1}$로 실내시험에서 측정되었다(EMCON, 1995).

Choi and Daniel (2006a)은 연직차수벽 시공 중 필터케이크가 형성되지 않았다고 가정하고, 연직차수벽와 주변 지반의 경계를 일정 수두 조건을 적용하여 Type Curve법을 통하여 연직차수벽의 투수계수를 산정하였다. 산정 결과, M-11/15의 투수계수는 $2.5\times10^{-8}m/s$, M-17/21의 투수계수는 $3.0\times10^{-8}m/s$로 평가되었다. 한편, Nguyen et al.(2008)은 본 매립지 현장의 연직차수벽 시공 과정에서 트렌치 벽면에 필터케이크가 형성되었다고 가정하고, 연직차수벽와 주변 지반의 경계를 불투수 조건을 적용하여 Type Curve법을 통하여 연직차수벽의 투수계수를 산정하였다. 산정 결과, M-11/15의 투수계수는 $6.8\times10^{-8}m/s$, M-17/21의 투수계수는 $5.2\times10^{-8}m/s$로 평가되었다. 본 논문에서는 제안된 이론해를 통해 산정한 Type Curve를 이용하여 두 가지 경계 조건을 고려하여 투수계수를 산정하였고, 이를 Table 2에 기존 연구결과와 비교하여 정리하였다.

본 논문에서 유도한 이론해를 통해 산정된 투수계수를 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계조건에 따라 특성을 분석하는 것은 의미가 있다. 즉, 일정 수두 경계조건의 경우, 불투수 경계조건에 비해 작은 투수계수가 산정되었다. 이는 앞에서 논의한 바와 같이 일정 수두 경계조건에서의 수두 회복이 더 빠르게 발생하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 순간변위시험 결과로부터 Type Curve법을 이용하여 역으로 산정한 투수계수가 더 작음을 알 수 있다. 지반의 압축지수 또한 불투수 경계조건의 경우, 일정 수두 경계 조건보다 17～25배 더 크게 산정되었는데, 이는 지반의 압축지수가 클수록 수두 회복이 빠르게 나타나기 때문이다. 또한, M-17/21의 경우 두 경계 조건으로 구한 투수계수 차이가 M-11/15보다 작게 나타났다. 이는 앞 절에서 언급한 바와 같이 압축지수가 클수록 경계 조건에 따른 영향이 감소하기 때문이다. M-17/21의 경우, 지반의 압축지수가 M-11/15보다 5～7.5배 크게 산정된 것을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 이론해를 통해 산정된 투수계수를 기존 연구에서 수치해석을 통해 산정한 투수계수(Choi and Daniel, 2006a; Nguyen et al., 2008)와 비교해 본 결과, 4.8～44.6% 사이의 차이를 보였다. 전반적으로 이론해를 통해 산정된 투수계수가 더 작은 값을 나타냈다. 일정 수두 경계조건의 경우, 차이는 4.8～10.3%였으며, 불투수 경계조건의 경우는 32.3～44.6%로 더 큰 차이를 보였다. 이는 불투수 경계조건에 대한 이론해의 Type Curve가 초기 수두회복 단계에서 Mandel-Cryer 효과 또는 지반의 점도효과에 의해 수치해석으로 구한 Type Curve와 다소 차이를 보이기 때문이다. 또한, Table 2에서 EMCON(1995)의 선형 Line-fitting법인 Bouwer and Rice법으로 구한 투수계수와 비교한 결과, 전반적으로 12～32.8% 사이의 차이를 보였다. Bouwer and Rice법이 순간변위시험 도중 정상류 흐름이 발생한다는 가정에 기반을 둔 해석법임을 고려할 때, Bouwer and Rice법으로 구한 투수계수는 본 논문에서 산정한 일정 수두 조건에 대한 투수계수보다 크고, 불투수 경계조건에 대한 투수계수보다 작아야 한다. M-11/15의 경우는 이를 만족하나, M-17/21의 경우는 불투수 경계조건의 투수계수가 Bouwer and Rice법으로 산정된 값보다 작았다.

6. 결 론

본 연구에서는 무한 대수층에 부분 관입된 단일정에 순간변위시험을 실시할 경우에 발생하는 비정상 흐름에 대해 기존 문헌에서 제시한 이론해를 바탕으로 가상우물이론을 도입하여 연직차수벽의 경계 조건을 고려할 수 있는 새로운 이론해를 제시하고 적용성을 검토하였다. 본 논문에서에서 얻은 결론 및 토의사항을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 논문에서 유도한 이론해를 바탕으로 Type Curve법을 적용하여 순간변위시험에 의한 연직차수벽의 투수계수를 평가할 수 있다. 제시된 이론해는 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계조건으로 일정 수두 경계조건과 불투수 경계조건을 모두 고려할 수 있고 우물의 편심 정도 D_e를 적용하여 우물이 연직차수벽 내에서 수직으로 시공되지 못한 경우를 근사적으로 반영할 수 있다.

(2) 연직차수벽 경계를 일정 수두 경계조건으로 가정하는 경우는 무한 대수층과 비교하여 순간변위시험시 우물 케이싱의 수위회복이 빠르게 발생하며, 반대로 불투수 경계조건으로 가정하는 경우에는 느리게 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 제시된 이론해가 순간변위시험시 발생하는 비정상흐름에 대한 경계조건 영향을 적절히 반영하기 때문이다.

(3) 연직차수벽의 형상에 따른 영향을 살펴본 결과, 우물의 형상비가 클수록, 연직차수벽의 폭이 좁아질수록, 우물의 편심 정도가 커질수록 경계조건의 영향이 커진다. 연직차수벽의 폭의 영향 및 편심 정도의 영향은 초기 수두회복 단계에서 크게 나타난다.

(4) 연직차수벽 경계를 불투수 경계조건으로 적용할 경우, 제시된 이론해는 초기 β_p 범위에서 우물 내 정규화된 수위가 1을 넘는 구간이 발생하고 이러한 경향은 연직차수벽의 폭이 좁을수록 뚜렷해진다. 이 현상은 포화상태의 점토 지반에서 압밀에 의해 비정상흐름이 발생하는 경우, 추가적인 하중 증가 없이도 과잉 간극수압이 초기 값보다 일정 기간 증가하다가 다시 감소하는 Mandel-Cryer 효과 또는 지반의 점도 효과(viscous effect)로 설명될 수 있다

(5) 본 논문에서 제시한 이론해를 이용해 기존의 현장시험 사례를 재분석한 결과, 기존 문헌에서 수치해석을 통해 산정된 투수계수보다 전체적으로 4.8～44.6% 가량 작게 산정되었으며, 그 차이가 불투수 경계조건의 경우 더 컸다. 또한, 본 논문에서 재해석을 통해 구한 투수계수는 선형 Line-fitting법인 Bouwer and Rice법으로 구한 투수계수와 12～32.8% 차이를 보였다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. Bear, J. (1979), *Hydraulics of Ground Water*, McGraw-Hill.
2. Bouwer, H. (1989), “The Bouwer and Rice Slug Test-an Update”, *Ground Water*, Vol.27, No.3, pp.304-309.
3. 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.
4. 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.
5. Butler, J. J. (1996), “Slug Tests in Situ Characterization: Some Practical Consideration”, *Envir. Geosciences*, Vol.3, No.2, pp.154.
6. Choi, H. (2002), *Analysis of Slug Tests to Determine Hydraulic Conductivity of Vertical Cutoff Walls*, Ph.D. thesis, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign.
7. Choi, H. (2007), “Numerical Model for Analyzing Slug Tests in Vertical Cutoff Walls”, *J. Geotech. Geoenviron*. Eng., ASCE Vol.133, No.10, pp.1249-1258.
8. Choi, H. and Daniel, D. E. (2006a), “Slug Test Analysis in Vertical Cutoff Walls. Ⅰ: Analysis Methods”, *J. Geotech. Geoenviron*. Eng., ASCE Vol.132, No.4, pp.429-438.
9. Choi, H. and Daniel, D. E. (2006b), “Slug Test Analysis in Vertical Cutoff Walls. Ⅱ: Applications”, *J. Geotech. Geoenviron*. Eng., ASCE Vol.132, No.4, pp.439-447.
10. 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.
11. Conlin, B. H. and Maddock, W. P. (1985), “An Assessment of the Behavior of Foundation Clay at Tarsiut N-44 Caisson Retained Island”, Proc., *17th Offshore Technol. Conf*., OTC 4884, pp.379-388.
12. Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D., and Papadopulos, I. S. (1967), “Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water”, *Water Resour. Res*., Vol.3, No.1, pp.263-269.
13. Crooks, J. H. A., Becker, D. E., Jefferies, M. G., and McKenxie, K. (1984), “Yield Behavior and Consolidation. Ⅰ: Pore Pressure Response”, *Sedimentation consolidation models*, R. N. Young and F. C. Townsend, eds., New York, pp.356-381.
14. EMCON. (1995), *M-11/15, M-17/21, and M-26/E-29 Slurry Walls Post Construction Performance Evaluation*, West Contra Costa Sanitary Landfill, Richmond, Ca.
15. Gibson, R. E., Knight, K., and Taylor, P. E. (1963), “A Critical Experiment to Examine Theories of Three-Dimensional Consolidation”, *Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesboden, Vol.1, pp.69-76.
16. 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.
17. Hyder, Z. (1994), *Analysis of Slug Tests in Partially Penetrating Wells*, Ph.D. thesis, Univ. of Kansas, Lawrence.
18. Hyder, Z., Butler, J. J., McElwee, C. D., and Liu, W. (1994), “Slug Tests in Partially Penetrating Wells”, *Water Resour. Res*., Vol.30, No.11, pp.2945-2957.
19. Kabbaj, M., Tavanes, F., and Leroueil, S. (1988), “In Situ and Laboratory Stress-Strain Relationship”, *Geotechnique*, London, Vol.38, pp.83-100.
20. McKinley, J. D. (1998), “Coupled Consolidation of a Solid, Infinite Cylinder Using a Terzaghi Formulation”, *Computers and Geotechniccs*, Vol.23, pp.193-204.
21. Nguyen, T. B. (2007), *Slug Test Analysis in Vertical Cutoff Walls with Consideration of Filter Cake*, Master thesis, Korea University, Seoul, South Korea.
22. Nguyen, T. B., Lee, C., and Choi, H. (2011), “Slug Test Analysis in Vertical Cutoff Walls with Consideration of Filter Cake”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng*., Vol.137, No.8, pp.785-797.
23. Nguyen, T-B, Lee, C., Choi, H., and Kim, S. (2008), “Evaluation of Hydraulic Conductivity of Slurry-wall-type Vertical Cutoff Wall with Consideration of Filter Cake”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.24, No.11, pp.121-131.

24. Papadopulos, S. S., Bredehoeft, J. D., and Cooper, H. H. (1973), "On the Analysis of Slug Test Data", *Water Resour. Res*., Vol.9, No.4, pp.1087-1089.
25. Schiffman, R. L., Chen, T. F. A., and Jordan, J. C. (1969), "An Analysis of Consolidation Theory", *J. Soil Mech. and Found. Div*., ASCE, Vol.95, No.1, pp.285-309.
26. 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.
27. 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.
28. Yin, J. H., Clark, J. I., Blasco, B. M., and Graham, J. (1993), "Mechanism and Modeling of Abnormal Excess Pore Water Pressure in Clays and Applications in Offshore Engineering", *Proc., 4th Can. Conf. Marine Geotech, Engineering*, Vol.2, pp.401-424.
29. Zhu, J. G. and Yin, J. H. (2001), "Deformation and Pore-Water Pressure Responses of Elastic Viscoplastic Soil", *Journal of Engineering Mechanics*, September, pp.899-908.

(접수일자 2012. 2. 8, 심사완료일 2012. 11. 6)