

필터케이크(filter cake)를 고려한 슬러리월 연직차수벽의 현장투수계수 평가

Evaluation of Hydraulic Conductivity of Slurry-wall-type Vertical Cutoff Wall with Consideration of Filter Cake

웡 테 바 오¹ Nguyen, The Bao

이 철 호² Lee, Chul-Ho

최 항 석³ Choi, Hang-Seok

김 상 균⁴ Kim, Sang-Gyun

Abstract

In constructing a slurry trench cutoff wall, bentonite-water slurry is used to secure the stability of sidewalls during excavation before the wall is completed by backfilling. Unexpectedly, a thin but relatively impermeable layer called filter cake can be formed on the excavation surface, which significantly influences the result of slug test analysis in the cutoff wall if not considered. This study is to examine the effect of filter cake on evaluating hydraulic conductivity of the vertical cutoff wall through slug test analysis with the aid of the verified numerical program Slug_3D. The no-flux boundary conditions were adopted in Slug_3D to simulate the filter cake on the interface between the wall and the natural soil. A new set of type curves were built for applying the type curve method. New modification factors were obtained for using the modified line-fitting method. With consideration of filter cake, the type curve method and the modified line-fitting method were adopted to reanalyze the case study taken from EMCON (1995). The previous results achieved by Choi and Daniel (2006) without consideration of filter cake were compared with the present results obtained in this paper. The comparison emphasizes the necessity of considering filter cake when analyzing slug test results in vertical cutoff walls.

요 지

슬러리월 연직차수벽 시공시, 지반을 트렌치 형태로 굴착하고, 굴착시공 중 굴착면 붕괴에 대한 안정성을 유지하기 위하여 벤토나이트와 물을 혼합한 슬러리를 트렌치에 채운다. 이렇게 채워진 벤토나이트 슬러리로 인하여 필터케이크(filter cake)이라 불리는 얇고 투수성이 낮은 층이 트렌치벽 표면에 형성되며, 슬러리가 제거 된 이후에도 굴착면에 잔존하여 연직차수벽에서의 순간변위시험(slug test) 해석 결과에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 기존에 개발된 수치해석 프로그램 Slug-3D를 수정하여 순간변위시험 해석시 필터케이크의 영향을 고려하는 방법을 제시하고 이를 통하여 정확한 연직차수벽의 투수계수를 산출하도록 하였다. 필터케이크의 영향을 고려하기 위하여 Slug-3D에서는 차수벽과 토양층의 경계면에 불투수조건(no-flux)을 경계조건으로 설정하여 해석을 수행하였다. 또한 투수계수 산정에서 기존의 타입커브법(type curve method)을 이용하기 위하여 개선된 type curve를 도출하였고, 선형 커브피팅법(line-fitting method)을 필터케이크가 존재하는 연직차수벽에 적용할 수 있도록 수정 보완 하였다. 본 논문에서 제안된 필터케이크를 고려한 해석방법은 EMCON(1995)에 의해 수행된 현장시험 결과의 재해석을 통하여 타당성을 검토하였다. 또한, 본 연구에서 얻어진 결과를 Choi and Daniel(2006)에 의해 수행된 필터케이크가 존재하지 않는 경우의 순간 변위시험 해석결과와 비교를 통해 필터케이크 고려가 반드시 필요함을 보여준다.

Keywords : Filter cake, Line-fitting method, Slug test, Type curve method, Vertical cutoff wall

1 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Department of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

4 정희원, 청석엔지니어링 상무 (Member, Managing Director, Chung Suk Eng.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 언론보도에 의하면 주한미군이 반환했거나 반환할 예정인 기지 중에서 환경오염 조사를 마친 29곳 중 26곳이 심각한 환경오염에 노출된 것으로 드러났다. 29곳 중 토양만 오염된 기지 10곳, 토양과 지하수가 모두 오염된 기지 16곳을 포함한 26곳이었다. 따라서, 미군기지 이전 후 오염지역 복원을 위한 적절한 처리방안 모색에 막대한 재원이 소요될 예정이다. 이에 연직차수벽은 오염지반 처리에 하나의 해결책으로 적용할 수 있다. 연직차수벽은 오염지역에서 지하수의 흐름을 방지하는 목적으로 건설된다. 지반 내에 존재하는 오염물질은 주로 지하수 흐름에 의한 이류 혹은 확산에 의해 주변으로 퍼져나가기 때문에 적절한 위치에 연직차수벽을 설치함으로써 오염원의 확산을 방지하고 수자원을 보호할 수 있다(정하익 1998; Daniel and Choi 1999; Choi 2002; 한국지반공학회 2004; Choi and Daniel 2006a, 2006b; 최항석과 Daniel 2006).

슬러리월(Slurry wall) 형태의 연직차수벽은 1950년경부터 유럽을 중심으로 주로 지하수를 차수하거나 지중벽체 시공시 이용되었다(Xanthakos 1994). 슬러리월의 시공은 그림 1에서 같이 개착식으로 트렌치(보통 깊이 20-40m)를 약 0.5에서 2.0m 폭으로 굴착하고 이 트렌치를 차수재로 충전하여 지중 연속차수벽체를 형성하는 공법이다. 트렌치 굴착시 벽면의 붕괴를 막기 위해 보통 물 대비 벤토나이트의 무게비 4-7%의 벤토나이트 슬러리(안정액)를 트렌치 내부에 채운 상태로 굴착을 진행하며, 다른 한쪽에서는 굴착이 완료된 트렌치를 흙-벤토나이트

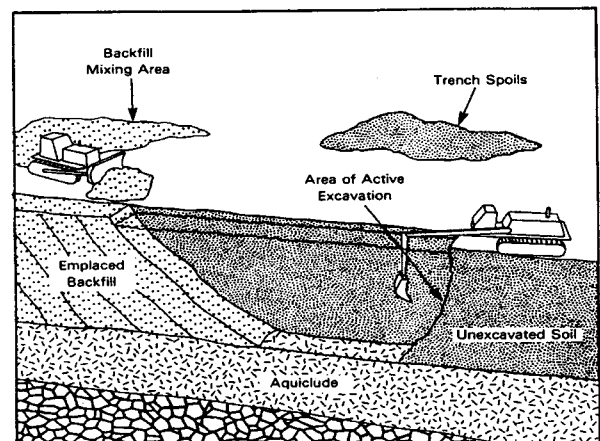
(Soil-Bentonite) 혹은 시멘트-벤토나이트(Cement-Bentonite) 등의 혼합물로 되메우기를 하게 된다(Choi 2002; 한국지반공학회 2004). 일반적으로 흙-벤토나이트 연직차수벽이 설치비용이 가장 저렴하고 화학적 저항성의 범위가 크며, 낮은 투수계수를 갖는다고 알려져 있다.

연직차수벽 설치에 있어서 가장 중요한 요소는 차수벽체 자체의 낮은 투수계수 확보이다. 시멘트-벤토나이트 뒤채움재의 경우는 일반적으로 투수계수가 1×10^{-5} 에서 1×10^{-6} cm/s 범위로 대부분의 복원사업에서 요구하는 1×10^{-6} cm/s 보다 크게 나타낸다. 이는 벤토나이트의 팽창성이 시멘트에 의해 제한되기 때문이다(한국지반공학회, 2004). 일반적으로 설계에 제안된 흙-벤토나이트 뒤채움재 투수계수는 1×10^{-6} 에서 1×10^{-7} cm/s의 범위를 갖는 것이 보통이다. 차수벽체의 투수계수는 흙-벤토나이트와 같은 뒤채움재에 혼합된 벤토나이트 함량에 크게 영향을 받는다. 현재까지의 연구동향은 주로 벤토나이트 함량에 따른 뒤채움재의 실내 투수계수 평가(D'Appolonia, 1980; Ryan 1987; 정하익 1998; Britton 2001; 유동주 등 2006; 이용수 등 2007)와 연직차수벽의 실내 및 현장 투수계수 평가방법(Teeter and Clemence 1986; Manassero 1994; Daniel and Choi 1999; Lee and Benson 2000; Britton 2001; Filz et al. 2001; Choi 2002; Britton et al. 2004; Choi and Daniel 2006a, 2006b; 최항석과 Daniel 2006)에 치중되고 있는 실정이다.

슬러리월 연직차수벽 시공시 트렌치 굴착중 벽면의 붕괴를 막기 위해 벤토나이트 슬러리(안정액)를 트렌치 내부에 채운 상태로 굴착을 진행함에 따라 주변지반의 지하수와 벤토나이트 슬러리액의 비중 차이로 인해 벤토나이트



(a) 트렌치 굴착 및 뒤채움 전경



(b) 시공과정 모식도

그림 1. 슬러리월 형태의 연직차수벽 시공과정(Soil-Bentonite Backfill)

토나이트 미세입자가 트렌치벽면에 흡착되어 얇은 층을 이루게 된다. 형성된 얇은 층을 필터케이크(filter cake)이라 하고, 이 필터케이크는 순수 벤토나이트로 구성 되어있기 때문에 흙-벤토나이트나 시멘트-벤토나이트 뒤채움재에 비해서 보통 100배에서 1000배 정도로 월등히 낮은 투수계수를 갖는다. 필터케이크의 두께는 뒤채움하기 전까지 트렌치 지속시간, 벤토나이트 슬러리의 농도, 그리고 벤토나이트 슬러리의 수위와 주변지반의 지하수위의 차이 등에 따라 결정되는데 일반적으로 약 3-5mm의 두께를 갖는다고 보고되고 있다(Nash 1974; D'Appolonia 1980; Choi 2002). 비록, 필터케이크의 물리적인 거동특성은 Filz et al.(1997)와 Henry et al.(1998)에 의해 연구가 시도되었으나, 이는 초기연구로서 전반적인 거동에 대해 초점을 맞춘 연구이다. 실제로, 슬러리월 형태의 연직차수벽 시공시 필터케이크의 형성은 항상 예측되어지고, 앞서 언급했듯이 그 투수계수가 뒤채움재에 비하여 매우 낮으므로 필터케이크의 형성 메카니즘과 형태 그리고 필터케이크를 고려한 연직차수벽의 투수계수 산정은 반드시 필요하다. 본 논문의 목적은 슬러리월 형태의 연직차수벽의 현장 투수계수를 순간변위시험(slug test)을 통해 평가시 필터케이크를 고려할 수 있는 해석방법을 개발하고 이의 적용성을 평가하는 것이다.

2. 필터 케이크의 특성 및 영향

2.1 연직차수벽 시공 중 필터케이크의 형성

연직 차수벽 축조에는 (1) 트렌치(Trench) 굴착, (2) 뒤채움 두 가지 단계를 거친다. 첫 단계에서, 트렌치는 비교적 깊은 깊이로 굴착되고, 트렌치의 안정성을 확보를 위하여 벤토나이트와 물을 혼합한 슬러리가 채워진다. 연직차수벽 축조의 첫 단계가 진행되는 동안 트렌치 안의 높은 수압 때문에, 슬러리는 트렌치의 벽을 침투하는 경향이 있다. 결과적으로, 필터케이크는 굴착면에 형성되고 두 번째 단계가 완료된 후에도 제거되지 않고 벽체 표면에 존재한다.

Filz et al.(1997)은 D_{15} 의 크기가 0.4mm보다 작은 지반에 굴착 후 채워진 슬러리에 의해 굴착면에 벤토나이트 필터케이크가 형성된다고 보고하였다. 이때 사용된 슬러리는 순수한 6%의 벤토나이트와 물의 혼합체였다. 또한 부유물 상태의 흙 입자를 포함하는 슬러리의 경우

에 대해, Henry et al.(1998)은 슬러리에 소량의 실트나 미세 모래입자가 포함된 경우에 슬러리의 단위중량이 증가되고 필터케이크를 생성시키는 지반의 한계 D_{15} 를 증가시킨다고 보고하였다. 이때 증가된 한계 D_{15} 는 앞에서 언급한 순수한 6%의 벤토나이트 슬러리의 경우 0.4mm에서 슬러리 입자의 d_{85} 의 9배까지 증가함을 보였다. 이러한 결과는 Sherard et al.(1984)의 결과와도 일치한다. 벤토나이트를 물과 혼합한 슬러리에 대한 필터링 기준을 확립하기 위해 Filz et al.(1997)과 Henry et al.(1998)의 연구결과를 토대로 슬러리가 소량의 실트나 미세모래와 같은 흙 입자를 포함한다면, 필터케이크의 생성 유무를 결정하기 위하여 지반의 D_{15} 와 슬러리입자의 d_{85} 가 반드시 고려되어야 한다고 제안하였다.

필터케이크가 존재하는 경우, 이는 연직차수벽의 투수계수 산정에 중요한 영향을 미친다. 필터케이크의 일반적인 투수계수는 3×10^{-11} m/s에서 2×10^{-10} m/s까지의 낮은 범위로(Henry et al. 1998), 필터케이크는 차수벽의 경계조건을 바꾸어 상대적으로 불투수성인 막이라고 가정된다. D'Appolonia(1980)와 Britton(2001)은 실제로 측정된 필터케이크 두께와 Nash(1974)의 공식을 사용해 계산된 필터케이크의 두께를 비교하였고, 일반적으로 설계에 적용할 수 있는 필터케이크 두께의 대표값으로 0.5cm로 제시하고 현장 투수계수 시험 결과의 해석에 적용하였다.

2.2 순간변위시험에서 필터케이크의 영향

앞에서 언급했듯이, 필터케이크는 연직차수벽의 경계조건 특성을 바꾸면서 상대적으로 불투수성인 막이라고 가정된다. 따라서, 완성된 연직차수벽의 투수계수는 필터케이크와 뒤채움재의 복합적인 영향을 받는다. 연직차수벽의 설치 목적의 관점에서, 필터케이크는 연직차수벽의 차수 역할 향상에 도움을 준다. 그러나 지반과 뒤채움재 사이의 경계조건 변화로 인해 순간변위시험에서 연직차수벽의 실제 투수계수를 구하는데 어려움을 야기한다(Choi and Daniel 2006b).

필터케이크가 상대적으로 불투수성이고 차수벽과 토양층 사이의 경계면에 위치하기 때문에, 필터케이크를 고려한 해석 결과와 여러 경계조건을 가진 모형을 비교하는 것이 필요하다. 이를 위해 기존에 개발한 Slug_3D 프로그램(Choi 2007)을 수정하여 적용하였다. 비교 해석시, 연직차수벽의 투수계수는 $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s로 가정하고,

차수벽과 필터케이크의 비저류계수는 $S_s = 4 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ 로 가정하였다. 수치해석에서 사용된 필터케이크의 두께는 0.6cm로 일반적으로 제안되는 두께 0.3cm(D'Appolonia 1980) 또는 0.5cm(Britton 2001)보다 약간 큰 값이다. 이는 0.6cm보다 더 얇은 필터케이크는 Slug_3D 모델에서 수치해석 시, 격자 형성을 어렵게 하기 때문이다. 그림 2는 필터케이크가 존재하는 연직차수벽에서 순간변위 시험의 개략도를 보여준다. 연직차수벽의 폭과 깊이는 각각 W 와 L 로 표시되며, L_t 는 지표면(지하수면)에서 우물 유입부까지의 거리를 의미하며, L_w 는 필터팩(filter pack)의 높이를 나타낸다. 필터팩의 외경과 우물 케이싱의 내경은 각각 r_w 와 r_c 로 나타낸다. 차수벽의 중앙에서 우물의 중앙까지 우물의 수평방향 편차는 D_v 로 나타내고, Slug_3D 프로그램에서는 우물의 편차를 무차원 값인 $2D_v/(W-2r_w)$ 로 표현한다(Choi 2007). s 는 연직 차수벽에서 우물 유입부의 연직방향의 상대적인 위치를 의미하고 그 범위는 0부터 무한대까지이다. 만약 s 가 1이면, 우물 유입부는 차수벽의 중간 깊이에 존재한다. 본 연구에서는 일반적인 연직차수벽의 기하학 조건

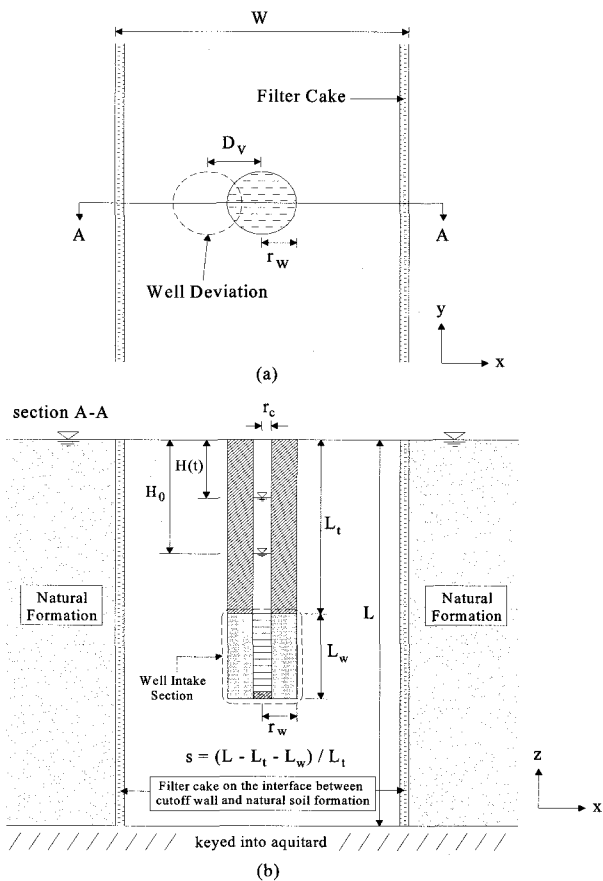


그림 2. 연직차수벽에서 순간변위시험 모식도

($r_w = 0.1\text{m}$, $r_c = 0.02\text{m}$, $W = 0.8\text{m}$, $L_w = 1.0\text{m}$, $L = 11.0\text{m}$, $s = 1$, $D_v = 0$, $W/r_w = 8$)에 대해 무차원 압축계수 $\alpha_p (= S_s L_w r_w^2 / r_c^2) = 0.001$ 인 경우 각 주어진 조건을 해석하여 그림 3에 비교하였다. 투수계수비는 연직 차수벽의 투수계수(k_{wall})와 필터케이크의 투수계수(k_{cake})의 비로 정의되며, 해석결과는 투수계수비(k_{wall}/k_{cake})가 증가할수록 측면 경계를 불투수 경계조건으로 고려한 해석 결과에 가까워지는 경향을 보여주며, 특히 $k_{wall}/k_{cake} = 1000$ 의 경우, 해석결과가 불투수 경계조건에 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서, 만약 상대적으로 불투수성인 필터케이크가 경계면을 형성하면, 흐름이 없는 경계 조건(no-flux boundary)은 순간변위시험 해석에서 연직 차수벽 경계 조건을 표현하는 더 좋은 대안이 될 수 있음을 보여준다. 이를 적용하기 위하여, 연직차수벽과 토양층 사이의 경계면에 대한 불투수 경계조건을 적용하도록 Slug_3D 프로그램을 수정하였다.

3. 필터케이크를 고려한 순간변위시험 해석방법

3.1 타입커브법(Type curve method)

필터케이크의 영향을 고려하기 위해 Slug_3D의 경계조건을 수정하여 연직차수벽에 대한 타입커브를 통해 정규화된 수두의 회복과 무차원 시간변수인 $\beta_p (= k L_w t / r_c^2)$ 의 관계로 나타내는 방법이 제안되었다. 무차원 변수 α_p

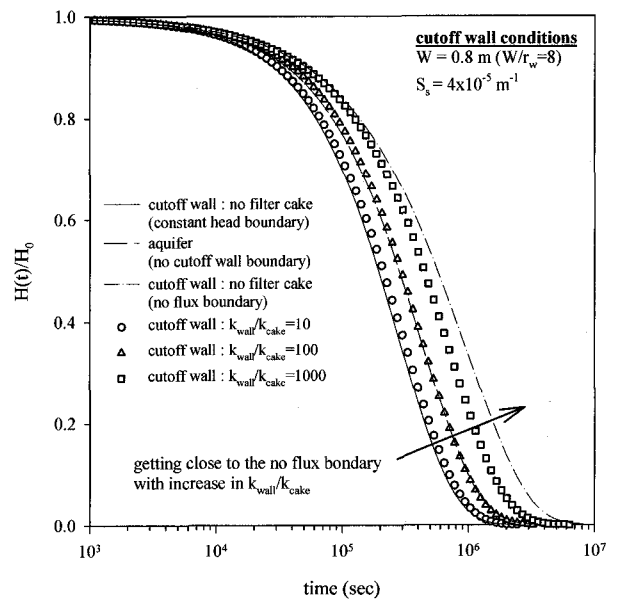


그림 3. 필터케이크 영향을 고려한 경계조건 변화에 따른 Slug_3D 해석결과

와 β_p 의 적용은 대수층을 부분적으로 관통하는 우물에 대해 수학적으로 타당성이 입증되었다(Hyder 1994, Hyder et al., 1994). 현장 순간변위시험 결과를 타입커브에 일치하도록 함으로서 차수벽의 뒤채움재에 대한 투수계수(k)와 비저류계수(S_s)를 구할 수 있다. Nguyen(2007)은 현장조건에 따른 다양한 W/r_w 값과 우물의 편심(eccentricity)을 고려하여 총 120 가지 타입커브를 제시하였다. 그림 4는 Nguyen(2007)이 제시한 타입커브 일부로 α_p 의 범위가 1.0×10^{-3} 에서 1.0이며, 우물의 형상비 $L_w/r_w = 10$ 와 $L/L_w = 11$, $s = 1$ 에 대한 타입커브이다.

본 연구에서 제안된 타입커브법은 Freeze와 Cherry

(1979)와 같은 수리지질학 문헌의 기존의 타입커브 해석방법과 같은 방식으로 적용될 수 있다. Choi and Daniel(2006a)에 의해 제안된 타입커브법은 차수벽과 토양층 사이의 경계면에 일정수두 경계조건을 가정해서 얻어졌기 때문에, 새로이 제안된 타입커브에서는 순간변위시험 후반부에서 수두회복의 지체를 발견할 수 있다. 이는 필터케이크가 주변 지반과 연직차수벽 사이에 수리학적 단절을 야기하기 때문이다. 본 연구에서 제안된 새로운 타입커브의 수두회복과 Choi and Daniel(2006a)가 제안한 타입커브의 차이는 Ferris(1959)의 양정 시스템에서 가상우물(image-well) 이론으로 설명할 수 있다. 일

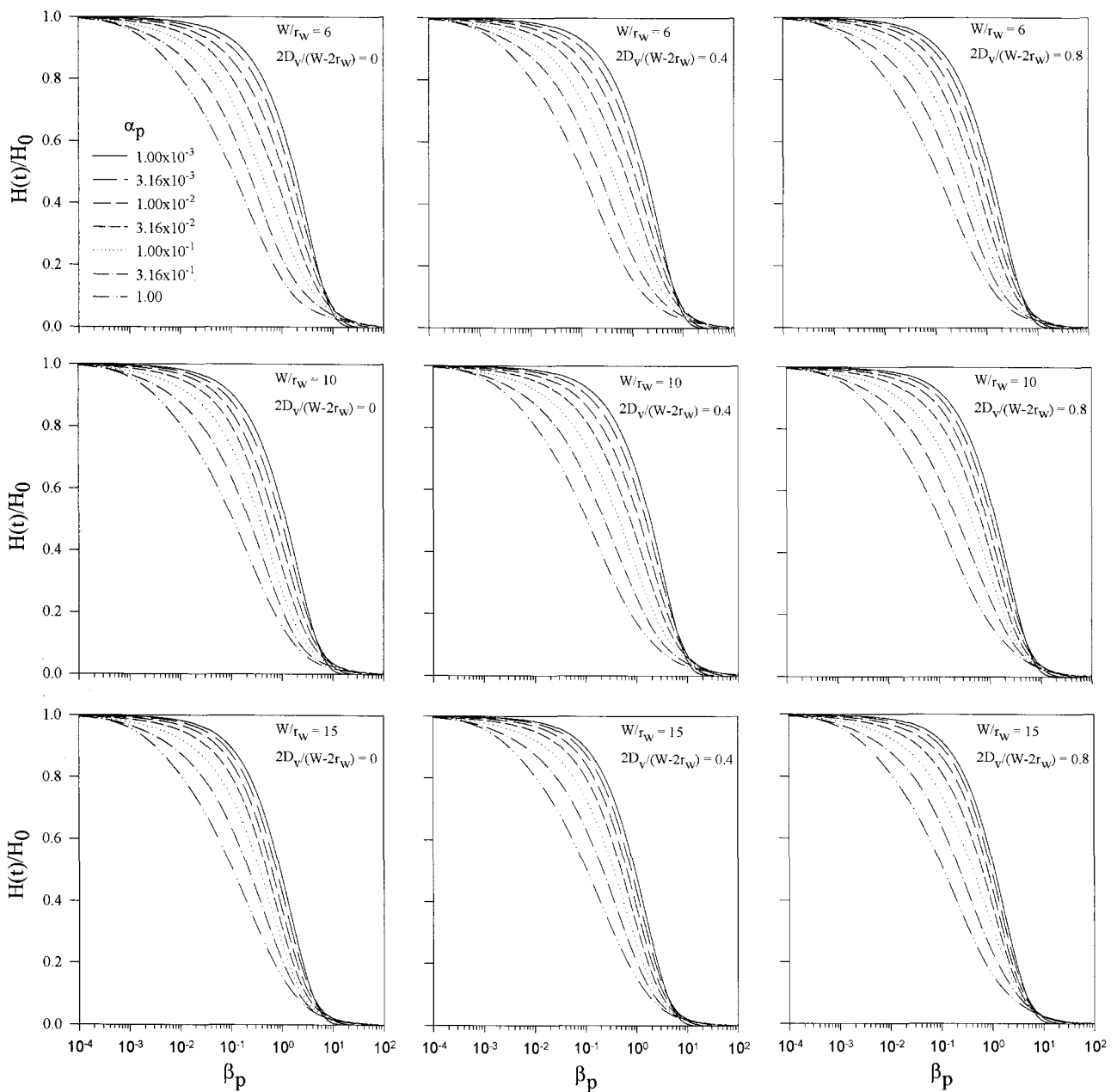


그림 4. 필터케이크를 고려한 연직차수벽에서의 타입커브: $L_w/r_w = 10$ ($L/L_w = 11$ and $s = 1$) 경우

정 수두 경계조건은 해석시 일정한 수위를 유지하는 저수조의 경계조건으로 생각할 수 있으며, 우물에서의 전수두 회복은 저수지로부터 유입되는 흐름에 의해서 빠르게 회복된다. 반대로, 불투수 경계는 흐름을 방해하는 불투수 막과 같은 역할을 함으로 우물내의 수두 회복을 지연시킨다.

3.2 수정 선형 커브피팅법(Modified Line-Fitting Method)

대수층에 대한 일반적인 선형 커브피팅법은 Hvorslev (1951), Bouwer and Rice(1976), Dax(1987) 등의 문헌에 제시되어 있다. 최항석 등(2007)은 기존의 선형 커브피팅법을 대수층의 압축성을 고려하도록 수정하였다. 이 방법에서, 대수층의 투수계수는 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$k = -\frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e'}{r_w}\right)}{2L_w} \cdot \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right) \quad (1)$$

여기서, 투수계수 산정시 우물 시스템의 형상과 순간변위시험의 결과인 $\ln(H(t)/H_0)$ 와 t 의 기울기는 중요한 입력치가 된다. 수정된 유효 반경 R_e' 은 실제 투수계수(k_{real})와 선형 커브피팅법에서 구한 투수계수($k_{best-fitting}$)가 동일할 때 만족하는 값으로 정의되며 대수층의 압축성과 우물 시스템의 형상에 의해 결정된다(최항석 등 2007).

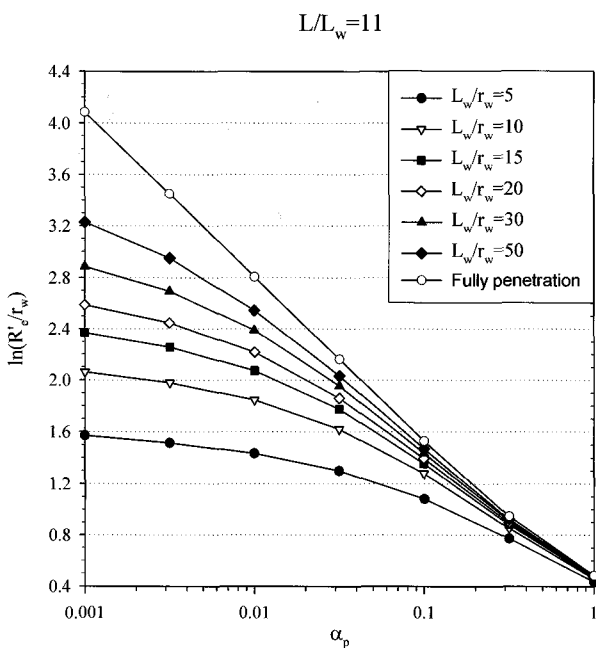


그림 5. 일반 대수층에 대한 $\ln(R_e'/r_w)$: $L/L_w = 11$ and $s = 1$

일반적인 대수층($L/L_w = 11, s = 1$)에 대한 $\ln(R_e'/r_w)$ 값들은 그림 5에 제시되었다.

연직차수벽과 주변지반 사이의 경계면에 필터케이프가 존재하지 않는 경우, Choi and Daniel(2006a, b)은 감소계수(f)를 도입함으로써 대수층에 대한 $\ln(R_e'/r_w)$ 를 수정하여 순간변위시험시 연직차수벽의 투수계수를 결정하는 방법을 제시하였다. 감소계수는 $\ln(R_e'/r_w)_{cutoff\ wall}$ 과 $\ln(R_e'/r_w)_{aquifer}$ 의 비율이고, 선형 커브피팅시 Hvorslev (1951)가 제안한 basic time lag formation(즉, $H(t)/H_0 = 1.0$ 과 0.37 을 잇는 직선)을 적용하면 $\ln(R_e'/r_w)$ 은 $2\beta_{p=0.37}$ 와 같이 간략하게 표현될 수 있다. $\beta_{p=0.37}$ 는 $H(t)/H_0 = 0.37$ 일 때의 무차원 시간변수(β_p)를 의미한다. 필터 케이프를 무시할 경우, 즉 연직차수벽과 주변지반의 경계에 일정 수두 경계조건이 적용된 경우, 전술한 바와 같이 대수층에 비해서 연직 차수벽의 우물내 수위 회복시간이 단축된다. 그러므로 연직차수벽 경우의 $\beta_{p=0.37}$ 값이 대수층 경우보다 작으며, 감소계수는 항상 대수층의 경우와 같거나 작은 값을 갖는다.

본 연구에서는 연직차수벽과 주변지반의 경계면에 흐름이 없는 불투수 경계조건을 적용하기 위하여 제안된 수정 선형 커브피팅법에서는 수정계수(modification factor), f^* , 가 도입되었다.

전술한 바와 같이 연직차수벽과 지반의 경계가 흐름이 없는 불투수 조건은 우물케이싱에서의 수위의 회복속도를 감소시키고, 따라서 무한 경계의 대수층의 경우와 비교할 때, 수위회복 시간이 길어진다. 이러한 결과는 연직 차수벽의 $\beta_{p=0.37}$ 값이 대수층 경우의 $\beta_{p=0.37}$ 값보다 더 큰 값을 갖도록 한다. 각각의 $\beta_{p=0.37}$ 값을 해석에 적용하기 위하여 $\ln(R_e'/r_w)_{aquifer}$ 와 $\ln(R_e'/r_w)_{cutoff\ wall}$ 의 비를 수정계수(f^*)로 정의하고, f^* 는 항상 1이하의 값을 갖게 된다. 연직차수벽에서 흐름이 없는 경계조건의 경우 수두회복이 느리게 일어나기 때문에 연직 차수벽의 투수계수를 구하기 위한 식 (1)은 다음 식 (2)와 같이 f^* 에 의해 수정된다.

$$k = -\frac{r_c^2 \left[\ln\left(\frac{R_e'}{r_w}\right) / f^* \right]}{2L_w} \cdot \frac{1}{t_{0.37}} \quad (2)$$

연직차수벽과 우물의 임의의 기하학적 조건($2D_w/(W-2r_w) = 0, 0.4$ 와 0.8 , $L_w/r_w = 10$ 과 15)에 대한 수정계수는 그림 6에 제시되어 있다. 본 연구에서 개발된 수정 선형 커

브피팅법을 적용하여 연직차수벽의 투수계수를 결정하기 위한 절차는 아래와 같다.

- (1) 우물의 기하학적인 변수를 산정한다 : 필터팩의 길이, L_w ; 우물 스크린의 반경, r_w ; 차수벽의 폭,

W ; 그리고 차수벽의 중심으로부터 우물이 떨어진 거리(eccentricity), D_e .

- (2) 경험식이나 실내시험을 통해 비저류계수, S_s 를 결정하여 무차원 압축성 변수, α_p 를 계산한다.

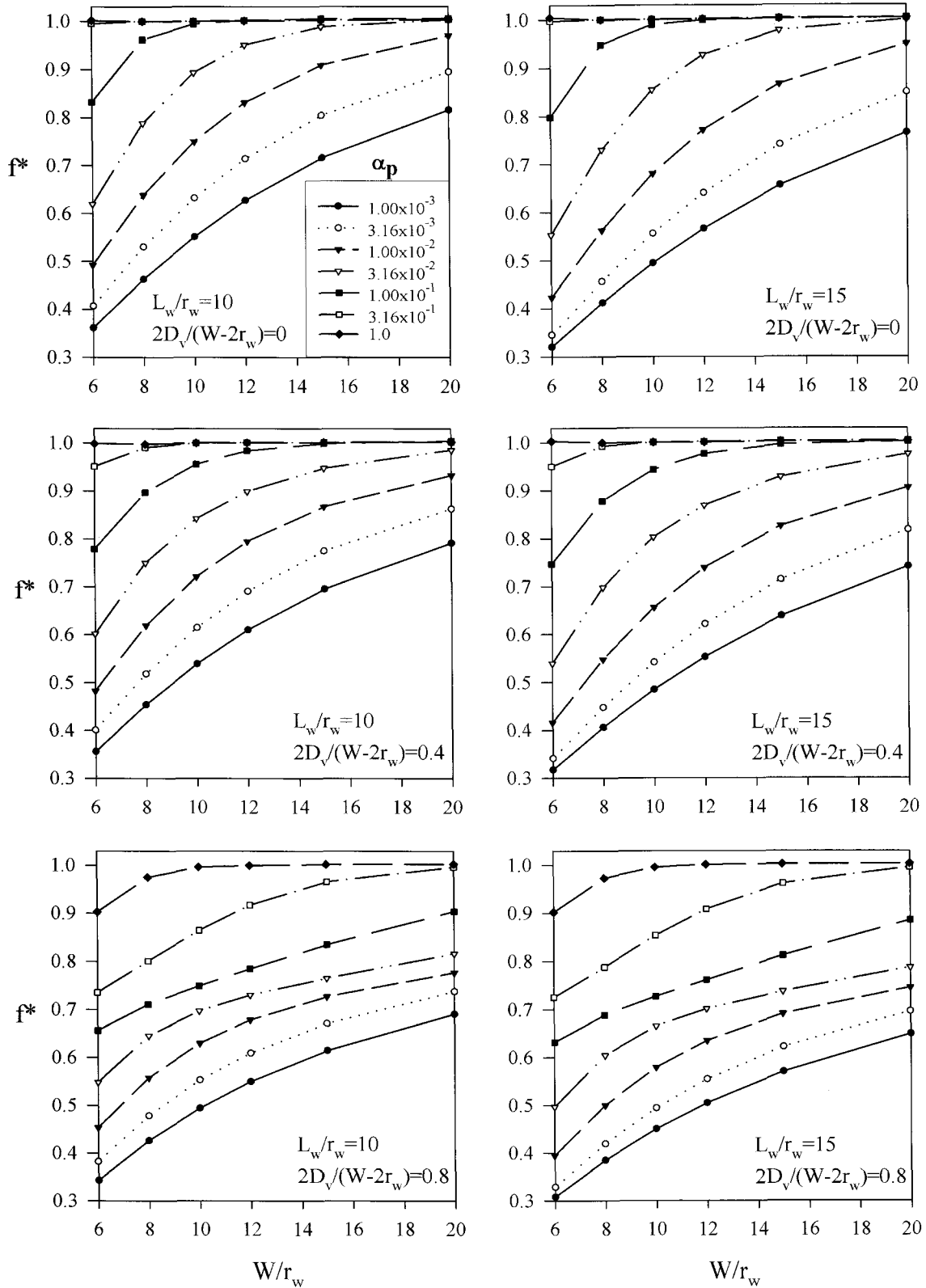


그림 6. 수정계수 f^* ($L/L_w = 11$ and $s = 1$)

- (3) $\ln(H(t)/H_0)$ 와 시간 t 와 같이 순간변위시험 데이터 위에 $H(t)/H_0=1$ 에서 $H(t)/H_0=0.37$ 까지 일직선을 긋는다(fitting).
- (4) (2)단계 α_p 값과 그림 5으로부터 $\ln(R_e'/r_w)$ 의 값을 결정한다.
- (5) 그림 6로부터 수정계수(f^*)를 결정한다.
- (6) 식 (2)로부터 투수계수 k 를 결정한다.

비교적 큰 압축성을 갖는 연직차수벽의 경우(α_p 값이 큰 경우), 수정계수는 차수벽의 경계조건과 우물 위치로부터의 편심의 영향을 적게 받는다. 따라서, 이러한 경우는 Choi and Daniel(2006a)에 의해 제안된 필터케이프가 없는 경우와 유사한 결과를 보인다.

4. 시험 결과 비교 분석

본 연구에서는 기존에 현장시험을 실시한 EMCON (1995) 사례에 대한 재해석을 수행하였다. 이에 대한 사례 연구는 Choi and Daniel(2006a)에 의해 필터케이프를 고려하지 않은 경우에 대해 수행되었다. 본 연구에서는 필터케이프를 존재하는 경우에 기존의 결과와 비교하고 새로운 해석결과를 도출하였다. 연구 대상지역은 1990년 초에 건설된 캘리포니아 리치몬드의 West Contra Costa Sanitary 매립지이다. 우물과 연직차수벽의 해석 조건은 표 1에 제시되었다.

재생형된 시료의 투수계수는 1.0×10^{-8} cm/s에서 2.0×10^{-6} cm/s의 넓은 범위로 측정되었고, 교란되지 않은 시료의

투수계수는 M-11/15 경우, 6.0×10^{-7} cm/s에서 4.0×10^{-6} cm/s의 범위와 M-17/21 경우, 8.0×10^{-8} cm/s에서 1.0×10^{-6} cm/s의 범위로 나타났다. 뒤채움재의 비저류계수는 $2.5 \times 10^{-2} m^{-1}$ (EMCON,1995)로 측정되었다. Choi and Daniel (2006a)는 필터케이프를 고려하지 않고 93-1 순간변위시험 결과로부터 연직 차수벽의 투수계수는 타입커브법에 의해 2.5×10^{-8} cm/s로 수정 선형 커브피팅법에 의해 2.6×10^{-8} cm/s로 평가하였다. 94-15 순간변위시험 결과에서는 타입커브법에 의해 3.0×10^{-8} cm/s로 수정 선형 커브피팅법에 의해 3.1×10^{-8} cm/s로 평가하였다. 이 해석결과는 표 2에 제시되어 있다. 본 연구에서는 필터케이프를 고려하여 기존 해석방법(타입커브법, 수정 선형 커브피팅법)들을 검토하였고, 이를 통하여 EMCON(1995) 사례에 대한 재해석을 실시하였다.

현장 순간변위시험 결과에 대한 타입커브법과 수정 선형 커브피팅법의 해석절차는 93-1 순간변위시험에 대해서는 그림 7에, 94-15 순간변위시험의 경우는 그림 8에 나타났다. 타입커브법 적용시, 93-1 순간변위시험의 경우, 측정데이터가 타입커브 $\alpha_p=3.16 \times 10^{-3}$ 와 1.00×10^{-2} 사이에 놓여있고, 이로부터 내삽을 통하여 $\alpha_p=7.94 \times 10^{-3}$ 가 무차원 압축지수로 결정되었다.

각 해석결과는 표 2에 비교되어 있다. 필터케이프를 고려한 투수계수가 필터케이프를 고려하지 않은 Choi and Daniel(2006a)의 해석결과에서 추정된 투수계수보다 모두 크게 결정되었다. 이는 연직차수벽의 순간변위시험을 통한 투수계수 평가에서 필터케이프가 반드시 고려되어야 함을 보여준다. 일반적으로 필터케이프를

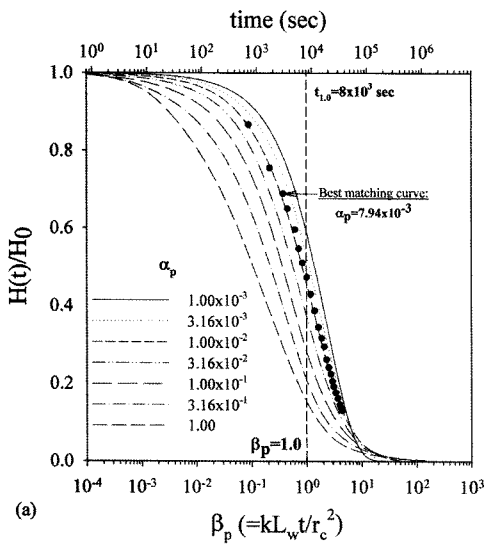
표 1. 우물과 차수벽의 형상조건(EMCON, 1995)

Type	Geometry variables	Values					
		Real value	93-1 (M-11/15 cutoff wall)	Approx	Real value	94-15 (M-17/21 cutoff wall)	Approx
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) ^a	-	0.92	-	-	0.92	-
	D_v (m)	-	0	-	-	0.23	-
Model	L_w/r_w	11.0	-	10.0	15.1	-	15.0
	L/L_w ^b	8.0	-	11.0	16.8	-	11.0
	s^c	0.7	-	1.00	0.97	-	1.0
	W/r_w	8.8	-	8.0	25.4	-	20.0
	$2D_v/(W-2r_w)$	0	-	0	0.54	-	0.60

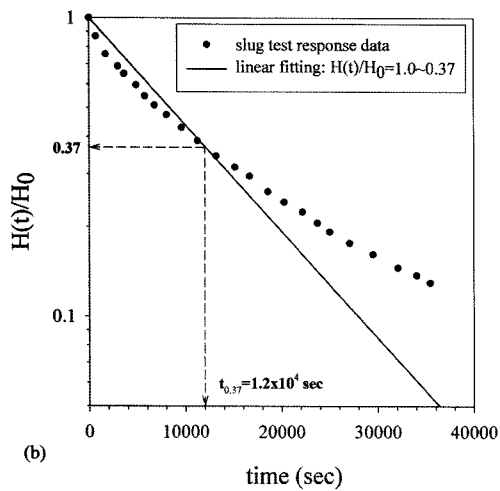
표 2. 연직 차수벽 사례별 해석 결과

Case	제안된 방법		EMCON 1995 해석결과							
	타입커브법		수정 선형 커브피팅법							
필터케이크를 고려한 해석결과(본 연구)										
Case	ρ	$t_{1.0}$ at $\beta_p=1.0$ (s)	S_s^a (m^{-1})	k^b (m/s)	$t_{0.37}$ (s)	\ln (R_e/r_w)	f^*	k^c (m/s)	S_s (lab. test) (m^{-1})	k (Bouwer & Rice method) (m/s)
93-1 (M-11/15)	7.9×10^{-3}	8.0×10^3	3.9×10^{-4}	6.8×10^{-8}	1.2×10^4	1.89	0.63	6.8×10^{-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}	3.0×10^4	2.13	0.82	4.9×10^{-8}	2.5×10^{-2}	4.0×10^{-8}
필터케이크를 고려하지 않은 해석결과(Choi and Daniel 2006)										
Case	ρ	$t_{1.0}$ at $\beta_p=1.0$ (s)	S_s^a (m^{-1})	k^b (m/s)	$t_{0.37}$ (s)	\ln (R_e/r_w)	f	k^d (m/s)	-	-
93-1 (M-11/15)	1.3×10^{-1}	2.2×10^4	6.7×10^{-3}	2.5×10^{-8}	1.2×10^4	1.15	0.98	2.6×10^{-8}	-	-
94-15 (M-17/21)	3.9×10^{-2}	4.0×10^4	3.5×10^{-2}	3.0×10^{-8}	3.0×10^4	1.71	0.92	3.1×10^{-8}	-	-

a. $S_s = \frac{\alpha_p}{L_w} \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_w} \right)^2$ b. $k = \frac{1.0\gamma_c^2}{L_w t_{1.0}}$ c. $k = \frac{\gamma_c^2 \left[\ln \left(\frac{R_e}{r_w} \right) / f^* \right]}{2L_w} \cdot \frac{1}{t_{0.37}}$ d. $k = \frac{\gamma_c^2 \left[\ln \left(\frac{R_e}{r_w} \right) \times f \right]}{2L_w} \cdot \frac{1}{t_{0.37}}$

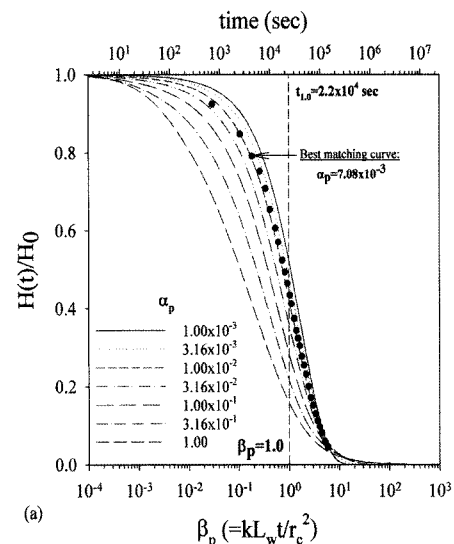


(a)

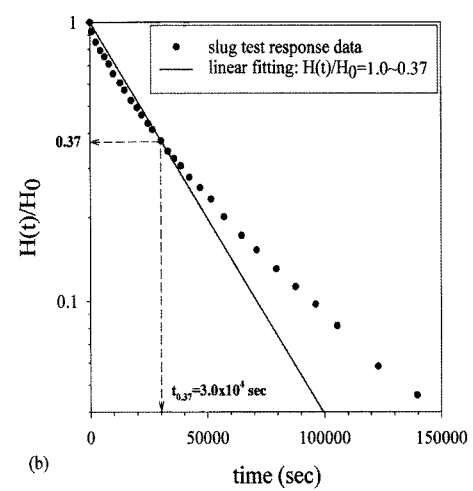


(b)

그림 7. 차수벽 M-11/15 93-1 사례
(a) 타입커브법, (b) 수정 선형 커브피팅법



(a)



(b)

그림 8. 차수벽 M-17/21 94-15 사례
(a) 타입커브법, (b) 수정 선형 커브피팅법

고려하지 않고 순간변위시험을 해석하게 되면 투수계수는 과소평가될 수 있다. 이것은 해석결과가 뒤채움 재료 자체뿐만 아니라 필터케이크의 저투수성이 순간변위시험 결과에 반영되기 때문이다. 본 연구의 결과는 필터케이크의 영향을 고려한 차수벽의 투수계수와 동일한 값을 가지고 벽체에 흙-벤토나이트(soil-bentonite) 뒤채움을 사용한 경우의 투수계수 보다는 작은 값을 가지는 Britton et al.(2004)의 결과와 거의 일치함을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 슬러리월 형태의 연직차수벽의 현장 투수계수를 순간변위시험을 실시하여 평가시, 필터케이크의 존재를 해석에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 수치해석 프로그램 Slug_3D를 이용하여 필터케이크가 연직차수벽과 주변지반 사이에 존재하는 경우를 모사한 해석결과, 투수계수비(k_{wall}/k_{cake})가 증가할수록 측면 경계를 불투수 경계조건으로 고려한 해석 결과에 가까워지는 경향을 보여주며, 특히 $k_{wall}/k_{cake} = 1000$ 의 경우, 해석결과가 불투수 경계조건에 거의 일치함을 보였다. 따라서, 만약 상대적으로 불투수성인 필터케이크가 경계면을 형성하면, 흐름이 없는 경계조건(no-flux boundary)은 순간변위시험 해석에서 연직차수벽 경계 조건을 표현하는 더 좋은 대안이 될 수 있다.
- (2) Slug_3D 해석을 통하여 연직차수벽과 주변지반의 경계조건을 불투수 조건으로 하여 타입커브를 통해 정규화된 수두의 회복과 무차원 시간변수인 $\beta_p (= kL_{wt}/r_c^2)$ 의 관계로 나타내는 필터케이크의 영향을 고려한 타입커브법이 제안되었다. 이전의 연구결과인 Choi and Daniel(2006a)에 의해 제안된 타입커브법은 차수벽과 토양층 사이의 경계면에 일정수두 경계조건을 가정하여 얻어졌기 때문에, 새로이 제안된 타입커브에서는 순간변위시험 후반부에서 수두회복의 지체를 발견할 수 있다. 이는 필터케이크가 주변지반과 연직차수벽 사이에 수리학적 단절을 야기하였기 때문이다.
- (3) 연직차수벽과 주변지반 사이의 필터케이크를 고려하기 위하여 수정계수(modification factor), f^* , 를

도입하고 기존의 선형 커브피팅법을 수정하였다. 연직차수벽과 지반의 경계가 흐름이 없는 불투수 조건은 우물케이싱에서의 수위의 회복 속도를 감소시키고, 연직차수벽의 $\beta_p=0.37$ 값이 대수층 경우의 $\beta_p=0.37$ 값보다 더 큰 값을 갖도록 한다. 또한 수정계수(f^*)는 항상 1보다 작은 값을 갖게 된다. 연직차수벽에서 흐름이 없는 경계조건인 경우 수두회복이 느리게 일어나기 때문에 연직 차수벽의 투수계수를 구하기 위한 식 (2)를 적용해야 한다.

- (4) 기존의 EMCON(1995) 사례에 대한 재해석을 수행한 결과, 필터케이크를 고려한 투수계수가 필터케이크를 고려하지 않은 Choi and Daniel(2006a)의 해석결과에서 추정된 투수계수보다 모두 크게 결정되었다. 필터케이크를 고려하지 않고 순간변위시험을 해석하게 되면 투수계수는 과소평가 될 수 있는데, 이는 해석결과가 뒤채움 재료 자체뿐만 아니라 필터케이크의 저투수성을 순간변위시험 결과에 반영하기 때문이다. 따라서, 사례해석을 통해 연직차수벽의 순간변위시험을 통한 투수계수 평가에서 필터케이크가 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문을 위한 연구는 한국학술진흥재단의 지원을 받은 연구비(신진교수지원연구-기초과학분야-D00477)와 고려대학교에서 지원하는 신인교원정착연구비로 진행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 유동주, 오명화, 김용성, 박준범 (2006), “벤토나이트 슬러리의 전기적 특성에 대한 영향인자 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 제10호, pp.21-32.
2. 이용수, 조진우, 유준, 정하익 (2007), “산업부산물 혼합 연직차수벽체의 현장 적용성 평가”, *한국지반공학회 분학술 발표회*, 고려대학교, pp.862-867.
3. 정하익 (1998), *지반환경공학*, 도서출판 유림.
4. 최항석, 이철호, 웅 테 바오 (2007), “압축성이 큰 지반에서 순간 변위시험 해석을 위한 선형 커브피팅법(Linear Curve Fitting Methods)의 적용”, *한국지반공학회 논문집*, 제23권 11호, pp.1-9.
5. 최항석, Daniel, D.E. (2006), “순간 변위시험(Slug Test)을 이용한 연직차수벽의 투수계수 산정시 수정된 Linear Curve Fitting 방법의 적용”, *한국지반공학회 분학술 발표회*, 한양대학교, pp.338-347.
6. 한국지반공학회 (2004), *지반환경*, 구미서관.
7. 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.*, 12(3), pp.423-428.
8. Britton, J. P. (2001), “Soil-bentonite Cutoff Walls: Hydraulic Conductivity and Contaminant Transport”, Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute & State Univ., Blacksburg, Va.
 9. Britton, J. P., Filz, G. M., and Herring, W. E. (2004), “Measuring the Hydraulic Conductivity of Soil-bentonite Backfill”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(12), pp.1250-1258.
 10. Choi, H. (2002), “Analysis of slug tests to determine hydraulic conductivity of vertical cutoff walls”, Ph.D. thesis, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, Ill.
 11. Choi, H. (2007), “Numerical Model for Analyzing Slug Tests in Vertical Cutoff Walls”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(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.*, 132(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.*, 132(4), pp.439-447.
 14. Daniel, D. E., and Choi, H. (1999), “Hydraulic Conductivity Evaluation of Vertical Barrier Walls”, Geo-engineering for underground facilities, G. Fernandez and R. A. Bauev, eds., ASCE, Reston, Va., pp.140-161.
 15. Dax, A. (1987), “A Note on the Analysis of Slug Tests”, *J. Hydrol.*, 91, pp.153-177.
 16. D’Appolonia, D. J. (1980), “Soil-bentonite Slurry Trench Cutoffs”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 106(4), pp.399-417.
 17. 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.
 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. Filz, G. M., Henry, L. B., Heslin, G. M., and Davidson, R. R. (2001), “Determining Hydraulic Conductivity of Soil-Bentonite Using the API Filter Press”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 24(1), pp.61-71.
 20. Ferris, J. G. (1959), *Groundwater*, John Wiley & Sons, New York.
 21. Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979), *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
 22. 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.
 23. 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.
 24. Hyder, Z. (1994), “Analysis of Slug Tests in Partially Penetrating Wells”, Ph.D. thesis, Univ. of Kansas, Lawrence, US.
 25. Hyder, Z., Butler, J. J., McElwee, C. D., and Liu, W. (1994), “Slug Tests In Partially Penetrating Wells”, *Water Resour. Res.*, 30(11), pp.2945-2957.
 26. Lee, T. and Benson, C. (2000), “Flow Past Bench-Scale Vertical Ground-Water Cutoff Walls”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(8), pp.511-520.
 27. Manassero, M. (1994), “Hydraulic Conductivity Assessment of Slurry Wall Using Piezocone Test”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(10), pp.1725-1745.
 28. Nash, K. L. (1974), “Stability of Trenches Filled with Fluids”, *Journal of the Construction Division* 100(CO4), ASCE, pp.533-542.
 29. Nguyen, T. B. (2007), “Slug Test Analysis in Vertical Cutoff Walls with Consideration of Filter Cake”, Master thesis, Korea University, Seoul, South Korea.
 30. Ryan, C. R. (1987), “Vertical Barriers in Soil for Pollution Containment”, *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, ASCE, pp.182-204.
 31. Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., and Talbot, J. R. (1984), “Filters for Silts and Clays”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 110(6), pp.684-700.
 32. 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.
 33. Xanthakos, P. P. (1994), *Slurry Walls as Structural System*, McGraw-Hill, New York.

(접수일자 2008. 9. 11, 심사완료일 2008. 11. 5)