

해상 폐기물매립지 연직차수벽체 근입심도에 따른 오염물질 이동특성 분석

Analysis on Contaminant Transport according to the Embedded Depth of Vertical Barrier of Offshore Landfill

박 해 용¹⁾ · 오 명 학[†] · 권 오 순¹⁾

Haeyong Park · Myounghak Oh · Osoon Kwon

Received: April 28th, 2016; Revised: May 16th, 2016; Accepted: July 4th, 2016

ABSTRACT : In order to prevent leakage of contaminants in offshore landfill, vertical barrier should be installed. Vertical barrier should be installed at designed depth of seabed to prevent the horizontal transport of contaminant in the subsurface. In this study, the seepage and contaminant transport in the subsurface according to embedded depth of vertical barrier were analyzed by using 2-D finite element analysis program SEEP/W and 3-D finite difference analysis program Visual Modflow. Numerical modelling results show that seepage flux and contaminant transport in seabed was greatly reduced when vertical barrier was installed at certain depth of low permeable layer. Therefore, the determination of minimum embedded depth for preventing contaminant leakage is helpful to design the economical vertical barrier.

Keywords : Offshore landfill, Vertical barrier, Leachate, Seepage behavior, Contaminant transport

요 지 : 해상처분장에서 내부 오염물질의 외부 유출을 방지하기 위하여 연직차수벽체가 설치된다. 연직차수벽체가 오염물질의 이동을 효과적으로 차단하기 위해서는 연직차수벽체가 해저지반의 적정 근입깊이까지 설치되어야 한다. 본 연구에서는 연직차수벽체 근입심도에 따른 해저지반을 통한 침투 및 오염물질 이동특성을 분석하기 위하여 2차원 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W를 이용한 침투해석과 3차원 유한차분해석 프로그램인 Visual Modflow를 이용한 오염물질 이동해석을 수행하였다. 수치해석결과, 연직차수벽체는 저투수성 지반으로 일정 깊이 이상 근입되면 오염물질 유출방지 효과를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 경제적인 연직차수벽체 설계를 위해서는 오염물질 이동을 차단할 수 있는 효과적인 최소 근입심도를 산정하여 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

주요어 : 해상처분장, 연직차수벽, 침출수, 침투거동, 오염물 이동

1. 서 론

인구증가 및 산업화로 인하여 폐기물의 발생량은 해마다 크게 늘어나고 있다. 최근 재활용이 증가되는 추세에 있지만 매년 1,300만 톤 정도가 폐기물매립지에 매립 처리되고 있다. 현재 육상 폐기물매립지의 수용용량은 머지않아 한계에 도달할 것으로 예상되지만, 신규 매립장 부지를 확보하는 것은 주민들의 민원과 매립지 주변의 환경문제에 대한 우려로 인하여 쉬운 일이 아니다. 이런 시점에서 신규 매립지 조성을 위한 방안으로 해상에 매립지를 조성하는 것이 대안으로 고려되고 있다. 일본에서는 이미 1960년대 후반부터 해상에 폐기물매립지를 조성하여 현재 약 40개소의 해상 폐기물매립지를 운영 중에 있다. 특히 동경만, 오사카, 요코하마 등 대도시 인근에는 모두 해상 폐기물매립지가 조

성되어 있으며, 폐기물 매립처리에 있어서 해상 폐기물매립지에 대한 의존도가 매우 높다. 또한, 싱가포르에서도 세막 카우 매립지를 조성하여 소각재 등을 매립 처리하고 있다.

폐기물매립지에서는 내부에서 발생하는 침출수와 오염물질이 외부로 유출되지 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 육상 매립지에서는 바닥과 사면부에 점토차수층과 HDPE 차수시트를 설치하여 침출수의 외부유출을 방지하고 있다. 우리나라 폐기물 관리법 시행규칙에 따르면 육상 폐기물매립지에서의 차수시설 기준은 하부 점토지반이 두께 1.0m 이상 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하이거나, 점성토 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이고 두께는 50cm 이상인 지반에 차수시트 1 겹 이상, 2.0mm 이상의 두께로 포설하도록 되어있다.

해상 폐기물매립지에서는 해상으로 침출수가 유출되는 것을 방지하기 위하여 육상 폐기물매립지와 달리 호안 및

1) Coastal Disaster Prevention Research Center, KIOST

† Coastal Disaster Prevention Research Center, KIOST (Corresponding Author : omyhak@kiost.ac.kr)

연직차수벽체 등의 차수공 설치가 추가적으로 필요하다. 일본의 사례를 보면 해저 점토지반을 지반차수층으로 하고 연직차수벽체를 설치하여 침출수 및 오염물질의 유출을 차단하고 있다. 일본에서는 해상 폐기물매립지에서 하부지반의 차수성능은 ‘두께 5m 이상, 투수계수 $k=1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이하’로 규정하고 있다. 또한, 연직차수공에 대해서는 불투수성 지층에 대한 근입깊이가 하부지반의 차수성능을 만족시킬 수 있도록 흐름 경로가 하부지반 두께 기준에 부합되도록 2.5m 이상의 근입깊이(연직차수벽체를 우회하는 최단 흐름 경로는 5m 이상)를 확보하도록 규정되어 있다. 그러나 국내에는 해상 폐기물매립지 사례가 없으므로 연직차수벽체 등 차수공 설치기준이 별도로 마련되어 있지 않은 실정이다.

침출수 유출을 방지하기 위하여 연직차수벽체로 완전히 차폐하는 것은 비경제적이므로(Mitchell & Rumer, 1997), 오염물질의 유출방지 기능을 충분히 발휘하면서도 경제적인 연직차수벽체 근입심도를 산정할 필요가 있다. 이를 위해서는 우선적으로 근입심도에 따른 오염물질 이동특성 파악과 오염물질 유출방지 효과에 대한 분석이 필요하다. 국내에서는 육상 폐기물매립지에서의 침출수 유출로 인한 오염물질 이동특성 규명에 대한 연구는 일부 수행된 바 있다. Kwon(2005)은 수치해석을 통해 산업단지 폐기물매립시설에서 연직차수시설의 설치 유무에 따른 오염물 누출범위를 평가한 바 있으며, Lee et al.(2007)은 폐기물매립장에 구조물 설치 시 폐기물 매립층을 굴착하는 데 있어 침출수의 유출방지를 위한 연직차수벽 시공에 따른 침투유량을 산정한 바 있다. 그러나 해상 폐기물매립지는 육상 폐기물매립지와는 입지조건과 수위조건이 상이하므로 해상 폐기물매립지에서의 연직차수벽체 설치 조건을 고려한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 해상 폐기물매립지에서의 지반 침투 및 오염물질 이동특성을 파악하기 위하여 수치해석을 수행하

였다. SEEP/W를 이용한 침투해석과 Visual Modflow를 이용한 지중 내 오염물질 이동해석이 수행되었으며, 이를 통해 연직차수벽체의 지반 내 근입심도에 따른 오염물질 이동특성과 침출수 유출방지 효과를 분석하였다.

2. 해석 방법 및 조건

2.1 해석 단면

본 연구에서의 호안단면(Fig. 1)은 일본의 동경만 해상 폐기물매립지에 적용된 2중 연직벽체 구조를 대상으로 하였다(권오순 등, 2012). 호안 외곽의 연직벽체는 해일, 쓰나미, 조수, 파랑, 해류 등의 외력에 대해 매립지를 보호하기 위한 호안 구조물이며, 내측의 연직벽체는 폐기물매립지의 침출수 및 오염물질이 해양으로 유출되지 않도록 하기 위한 차수벽체이다.

지반조건은 하부지반이 바닥차수층의 차수성능을 만족시키는 점토층이 존재하는 이상적인 단층지반 조건(Fig. 1(a))과 모래, 점토, 풍화토, 풍화암으로 구성된 다층지반 조건(Fig. 1(b))의 두 가지 지반조건을 가정하여 침투 및 오염물질 이동특성을 분석하였다. 호안 구조물 하부에는 구조물 설치를 위해 지반개량이 적용된 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

해석에 적용된 입력변수로 투수계수는 연직차수벽체의 차수성능을 평가한 해석 사례를 참고하여 가정하였으며(권오순 등, 2012), 횡방향과 수직방향의 투수계수비(k_v/k_h)는 0.1로 설정하였다(Table 1).

2.2 침투해석

해상처분장에서 연직차수공의 근입깊이에 따라 침출수 유

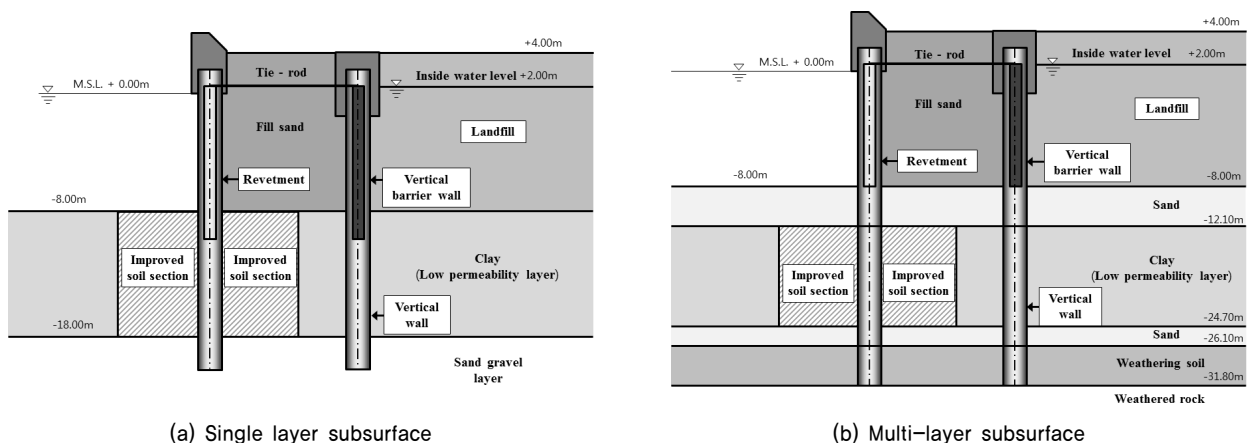


Fig. 1. Vertical barrier revetment section and soil condition

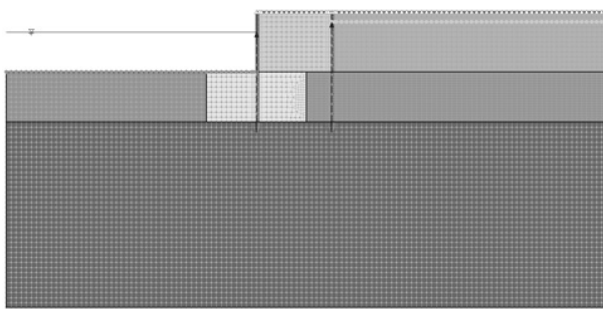
Table 1. Hydraulic conductivity applied to seepage analysis

(a) Single layer subsurface

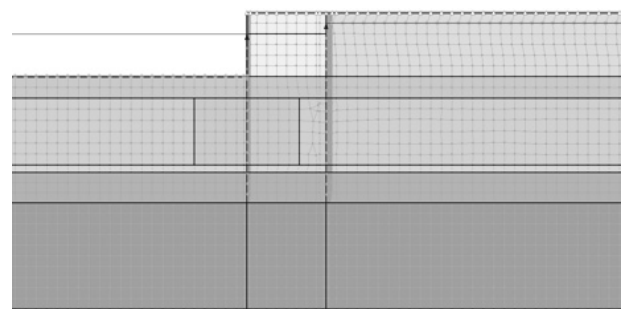
Elements	Horizontal permeability, k_h (cm/s)	Vertical permeability, k_v (cm/s)
Vertical barrier wall	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-8}
Vertical wall	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-8}
Landfill	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
Fill sand	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
Improved soil section	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}
Clay	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}
Sand gravel layer	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-2}

(b) Multi-layer subsurface

Elements	Horizontal permeability, k_h (cm/s)	Vertical permeability, k_v (cm/s)
Vertical barrier wall	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-8}
Vertical wall	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-8}
Landfill	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-3}
Fill sand	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-3}
Improved soil section	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}
Clay	2.1×10^{-5}	2.1×10^{-6}
Sand	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-3}
Weathering soil	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-5}
Weathered rock	4.5×10^{-4}	4.5×10^{-5}



(a) Single layer



(b) Multi-layer

Fig. 2. Mesh construction and boundary condition for seepage analysis using SEEP/W

출 방지효과를 확인하기 위하여 2차원 유한요소 해석프로그램인 SEEP/W를 사용하여 침투해석을 실시하였다. SEEP/W는 GEO-STUDIO사가 개발한 지반공학 범용프로그램으로서 평행방정식, 연속방정식 등을 지배방정식으로 선택하여 2차원 연속공간을 Galerkin의 가중잔차법(weighted residual method)의 유한요소망(Finite Element Mesh)으로 분할하고 이를 통한 해석을 수행하여 해를 구하는 프로그램이다. 해석에 적용되는 지배방정식은 Darcy식으로부터 유도되는 Richards식을 이용하여 유한요소법에 의해 근사해를 구하며 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, k_x , k_y 는 x, y 좌표축에 대한 수리전도도(LT⁻¹)이며, h는 수두(L), θ 는 용적당 함수량(M⁻¹L³), t는 시간(T)이고, 정상류 상태에서 침투해석의 경우 수두는 시간의 함수가 아니므로 시간에 따른 전 수두의 변화율은 0이 된다.

해석모형은 Fig. 2와 같이 경계조건과 수위조건을 단순화하여 정상류 상태의 2차원 해석을 실시하였다. 각 요소단

위는 해석 대상 영역의 형태를 고려하여 사각형으로 구성되어 2m×2m 크기로 모델링 하였다. 단층지반(Fig. 2(a))에서의 모델링 범위는 100m(D)×60m(H)이며, 다층지반(Fig. 2(b))은 500m(D)×60m(H)로 설정하였다. 수위조건은 연직차수벽체를 경계로 하여 호안 내수위가 2.0m 높게 적용하였고 연직차수벽체는 유·출입되는 유량을 0m³/sec로 입력하여 침투가 차단되도록 경계조건을 설정하여 해석을 수행하였다.

2.3 오염물 이동해석

오염물질 이동특성은 3차원 유한차분해석 프로그램인 Visual Modflow를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 적용되는 지배방정식은 일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통하여 흐르는 지하수유동이 오염물의 흐름에서 유·출입량이 고정되어 있다면 흐름을 나타내는 단위 체적에 질량보존법칙을 적용하여 Eq. (2)와 같이 편미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x, y, z 좌표축에 대한 투수계수 (LT^{-1})이며, h는 전수두(L), Ss는 비저유율(L^{-1}), t는 시간(T) 이고, 정상류 상태에서는 시간에 따른 전 수두의 변화율은 0이 된다.

이류 및 확산과 흡착 등의 반응을 고려한 오염물질의 거동특성은 프로그램 내 구성패키지인 MT3D 모델을 적용하여 해석하였다. 지하수에 용해된 오염물질이 모델영역으로 유입되거나 유출되지 않고 반감기 등 자연저감능을 고려하지 않는다면 오염물질 이류확산 지배방정식은 Eq. (3)과 같다.

$$R \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) \quad (3)$$

여기서, R : 지연계수(retardation factor), C : 지하수 내에 용해되어 있는 오염물질의 농도(ML^{-3}), t : 경과시간(T), x_i : 해당 좌표의 거리(L), D_{ij} : 수리 분산계수(L^2T^{-1}), v_i : 평균 선형 유속 (LT^{-1})이다.

본 연구에서는 중금속에 대한 오염물질 이동해석을 수행하였기 때문에 중금속의 흡착에 의한 지연계수를 고려하였다. 지연계수는 Eq. (4)와 같이 표현된다.

$$R = 1 + \frac{\gamma_d}{n} \frac{\partial S}{\partial C} \quad (4)$$

여기서, γ_d : 다공질 매체의 건조단위중량(ML^{-3}), n은 간극률, S는 토양입자에 흡착된 오염물질 농도를 나타낸다.

흡착에 의한 화학반응은 지하수 내에 용해되어 있는 오염물질과 다공질매체 표면의 오염물질 사이에 일어난 질량전이반응이다. 일반적으로는 액상과 고상 사이의 농도는 평형상태로 존재하며, 흡착반응은 지하수의 유속보다 빠르게 일어나기 때문에 평형모델을 적용한다. 따라서 용해농도와 흡착농도 사이에는 등온흡착관계가 성립한다. 등온흡착모델은 여러 가지 모델이 적용될 수 있으나, 본 연구에서는 Eq. (5)와 같은 선형흡착모델을 적용하여 해석하였다.

$$S = K_d C \quad (5)$$

Table 2. Properties of soil used for contaminant transport analysis

Parameters	Sand (1)	Clay	Sand (2)	Weathering soil	Weathered rock
Porosity, n	0.35	0.45	0.35	0.35	0.40
Specific yield, S_y	0.26	0.02	0.26	0.26	0.25
Specific storage, S_s (1/m)	9.4×10^{-5}	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.9×10^{-5}
Longitudinal dispersion coefficient, α_L (m)	10				
Distribution coefficient, K_d (cm^3/g)	0.120	0.128	0.120	0.120	0.120
Effective diffusion coefficient, D_o (cm^2/sec)	7.13×10^{-6}				

여기서, K_d 는 분배계수이다.

오염물 이동해석은 다층지반(Fig. 1(b))조건으로 수행하였으며 해석모델링은 Fig. 3에 나타내었다. 해석영역의 격자망은 $2m \times 2m$ 로 구성하였고, 모델링 범위는 $500m(x) \times 60m(z) \times 100m(y)$ 로 설정하였다. 모델영역의 좌·우측 경계에서는 수위가 변동되지 않는다고 가정하여 좌측은 해수위, 우측은 해상처분장의 내부수위를 정수위로 설정하였다. 연직벽체는 Visual Modflow의 경계조건 중에서 HFB(Horizontal Flow Barrier) Package를 적용하여 벽체를 설정하였으며 연직벽체 차수영역에서의 투수계수는 $0cm/s$ 로 경계조건을 설정하였다.

오염물질 이동해석을 위한 입력변수는 Table 2와 같다. 입력변수 중에서 간극률, 비산출율(specific yield), 비저유계수(specific storage) 값은 Lerman(1979)에 제시된 토질별 값을 참고하여 가정하였다. 오염물 이동해석에 적용되는 분배계수(K_d)와 유효확산계수(D_o)는 중금속 중 구리(Cu)에 대해 제시된 문헌(Kang, 2012)을 참고하여 값을 적용하였다. 오염물질 초기농도는 해상처분장 내부의 폐기물 매립층 하부 영역에 대해서 1,000ppm의 농도가 지속되는 것으로 적용하였다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 침투해석결과

일반적으로 해상처분장에서는 침출수 유출 방지를 위해 호안 내부수위를 외해의 평균해수면보다 낮게 관리하도록

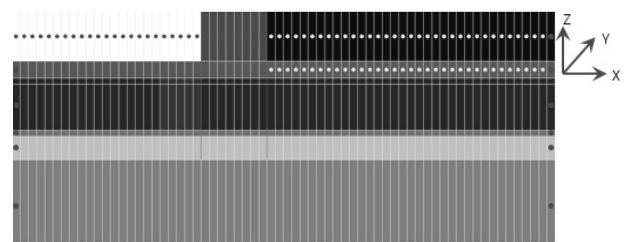


Fig. 3. Grid construction in layered ground for contaminant transport using Visual Modflow

되어 있다. 본 연구에서는 연직차수공의 근입깊이에 따라 해저 지반을 통한 침투저동을 파악하기 위하여 호안의 내부 수위를 외부 해수면보다 2.0m 높게 설정하여 내부에서 외부로 흐름이 형성되는 조건으로 해석을 수행하였다.

Fig. 4와 5는 단층 및 다층지반에서의 침투해석을 통해 구해진 수두분포를 나타낸 것이다. 연직차수벽체 미설치 시 호안 내부의 수두가 외부보다 큰 조건이므로 내부에서 외부로 흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 해저 지반에는 저투수성 지반이 존재하므로 지반을 통한 흐름은 크게 발생하지 않지만, 측면 차수성이 확보되지 못하여 폐기물 매립층의 침출수가 외부로 유출되는 것으로 나타났다. 반면 연직차수

벽체를 저투수성 지반 상부까지만 설치되어 있어도 연직차수벽체의 차단효과와 저투수성 지반에서의 침투유량 저감 효과로 인하여 외부로의 침출수 유출을 방지하는 데 효과가 있는 것으로 나타났다.

호안 벽체를 통한 침투유량을 비교하기 위해 내부 연직차수벽체의 근입심도에 따른 외부 연직벽체 A-A' 및 C-C' 구간의 단위면적당 유량을 산정하였다(Fig. 6). 단층지반에서 연직차수벽체가 없는 경우의 유량은 $1.33\text{m}^3/\text{year}/\text{m}^2$ 였으나, 폐기물 매립층까지만 연직차수벽체를 설치한 경우 $0.34\text{m}^3/\text{year}/\text{m}^2$ 로 약 74%의 감소율을 나타내었다. 다층지반에서는 연직차수벽이 없는 경우 유출유량은 $22.65\text{m}^3/\text{year}/\text{m}^2$ 이며 표토층

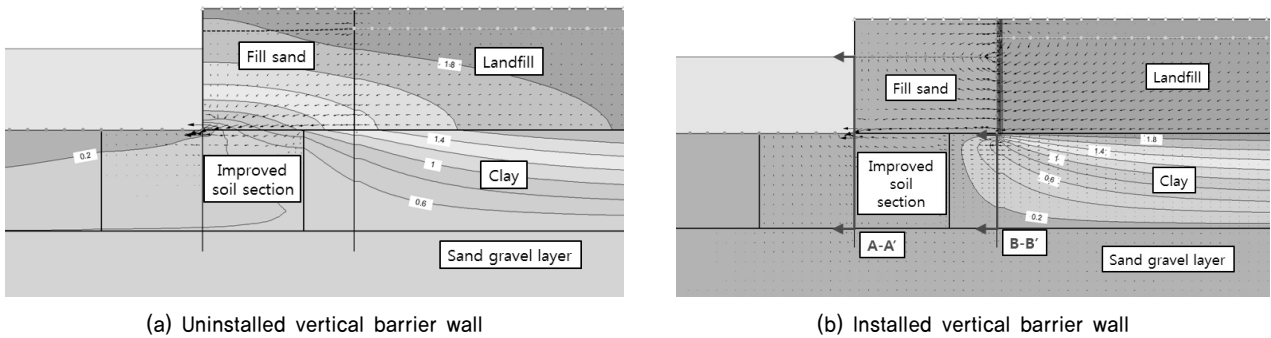


Fig. 4. Total head distribution in single layer soil resulted from seepage analysis

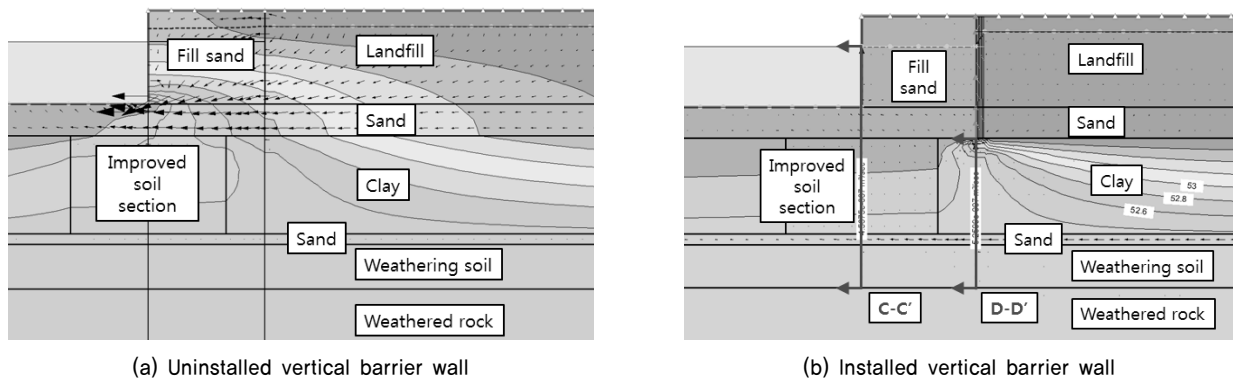


Fig. 5. Total head distribution in multi-layer soil resulted from seepage analysis

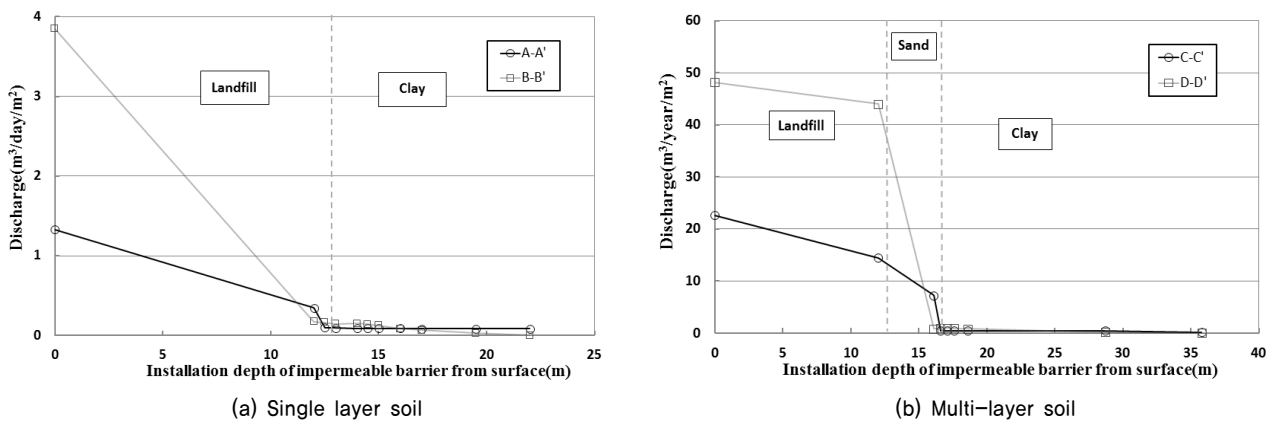


Fig. 6. Relationship of discharge and depth of impermeable barrier from surface

까지 연직차수벽체를 설치한 경우에는 $7.24\text{m}^3/\text{year}/\text{m}^2$ 로 감소율이 약 68%로 나타났다. 연직차수벽체가 저투수성 지반으로 0.5m 침도까지 설치된 경우의 유량은 A-A' 구간에서 $0.10\text{m}^3/\text{year}/\text{m}^2$, C-C' 구간에서 $\text{m}^3/\text{year}/\text{m}^2$ 로 연직차수벽체가 저투수성 지반 상부 표면까지 설치된 경우와 비교하여 침투유량은 A-A' 구간에서 약 72%, C-C' 구간에서는 약 50%가 추가적으로 감소되는 것으로 나타났다. 연직차수벽체가 없는 경우와 저투수성 지반으로 0.5m 침도까지 차수벽체를 설치한 경우와 비교하면 감소율이 A-A' 구간에서 약 93%, C-C' 구간에서 약 98%로 큰 감소효과를 보이는 것으로 나타났다. 연직차수벽체가 점토층으로 0.5m보다 더 깊게 근입한 경우(1m, 1.5m, 2.5m)라 하더라도 저투수성 지반에 0.5m 근입된 경우와 비교하여 침투유량은 약 1%의 감소율을 보여 추가적인 감소효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 연직차수벽체의 근입심도는 저투수성 지반으로 0.5m 이상 근입하여 설치되면 침투유량을 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났으므로 연직차수벽체는 저투수성 지반으로 최소 0.5m 근입시키는 것이 침투유량의 저감 측면에서는 충분할 것으로 판단된다.

3.2 지중 내 오염물 이동해석

내외부의 수위차에 따른 오염물질의 이동특성 분석을 위하여 연직벽체 내외부 수위차가 없는 경우와 내부 수위가 외부보다 각각 1m, 2m 더 높은 경우에 대해 지반 내 오염물질 이동해석을 수행하였다. 오염물 이동해석을 통해 수위

조건에 따른 30년 후 지반 내 오염물질 농도분포를 Fig. 7에 도시하였다. 외해 수위와 호안 내부수위가 동일하면 지하수 흐름이 발생하지 않으므로 오염물질 이동은 농도차에 의한 확산에 의해서만 발생하게 된다. Fig. 7(b)에서 알 수 있듯이 지하수 흐름이 발생하지 않고 확산에 의해서만 오염물질 이동이 발생하는 경우에는 연직차수벽체가 설치되어 있지 않더라도 오염물질의 외부 유출은 발생하지 않는다. 그러나 내부의 수위가 외부보다 높게 되면 지하수의 흐름이 발생하기 때문에 오염물질이 외부로 유출이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 오염물질의 유출이 발생 가능한 조건에서 연직차수벽체의 근입깊이에 따른 오염물질 이동 차단효과를 명확하게 비교하기 위하여 연직차수벽체 내측 수위를 외부보다 2m 높게 설정하여 30년간 지속되는 조건으로 정상류 상태 조건에서 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 연직차수벽체가 설치되지 않았을 경우 30년까지의 오염물 농도분포를 나타낸 것이다. 초기에는 폐기물 매립층 하부에 투수성이 큰 모래층으로 오염물질이 이동되었으며 측면에서의 차수성이 확보되지 않아 1,000ppm의 오염물질이 해상처분장 호안 외부로 이동되는 것으로 나타났다. 시간이 경과함에 따라 하부 저투수성 지반으로도 오염물질이 유입되는 것으로 나타났으며 30년 경과 시에는 점토층 하부까지 오염물질이 이동되는 것으로 나타나지만, 점토층 하부에서의 오염물질 농도는 높지 않은 것으로 나타났다.

연직차수벽체가 점토층 상부까지만 근입되었을 때의 오염물질 이동해석 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 1년 경과 후

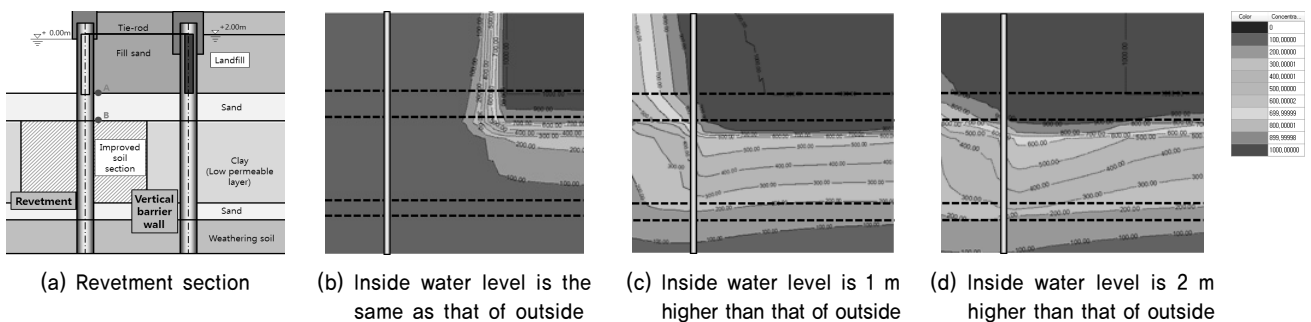


Fig. 7. Concentration distributions with different water level between inside and outside of vertical barrier after 30 years

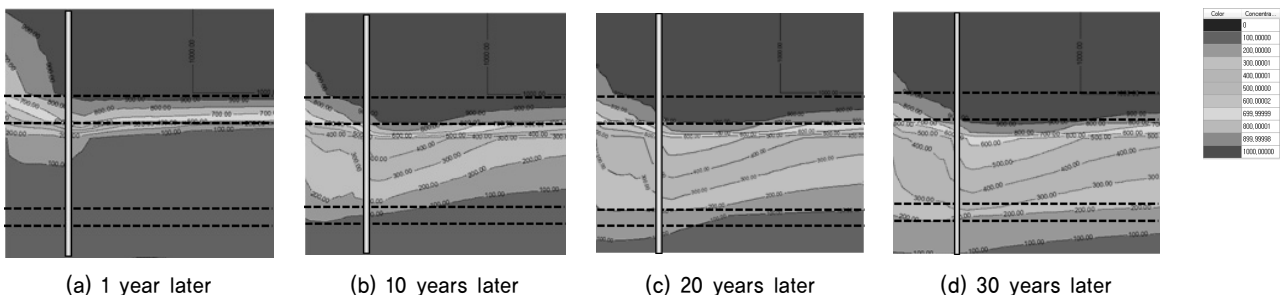


Fig. 8. Concentration distribution with elapsed time without vertical barrier

까지는 측면의 연직차수공으로 인하여 오염물질 차단효과가 있는 것으로 나타났지만, 시간이 경과함에 따라 오염물질은 점토층의 상부영역을 통해 외부로의 유출이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 이 결과는 측면으로의 유출을 방지하기 위해서는 저투수성 점토층으로 연직차수벽체가 근입되어야 한다는 것을 나타낸다.

Fig. 10~12는 연직차수벽체가 점토층에 근입되는 깊이에 따른 오염물질 이동해석 결과를 제시한 것이다. Fig. 10~11

에 의하면 연직차수벽체를 점토층으로 0.5m만 근입하여도 Fig. 9와 비교하여 오염물질의 유출을 방지하는 효과가 큰 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 9에서 나타난 점토층 상부를 통한 오염물질의 횡방향 이동을 방지하기 때문이다. 근입깊이가 0.5m인 경우와 2.5m인 경우, 오염물질의 이동특성은 큰 차이를 나타내지 않았다. 다만 Fig. 9와 10에 의하면 20년 이상의 시간이 경과되면 비록 저농도의 오염물질이지만 점토층을 통해 횡방향으로 이동할 수 있는 가능성이 있음을

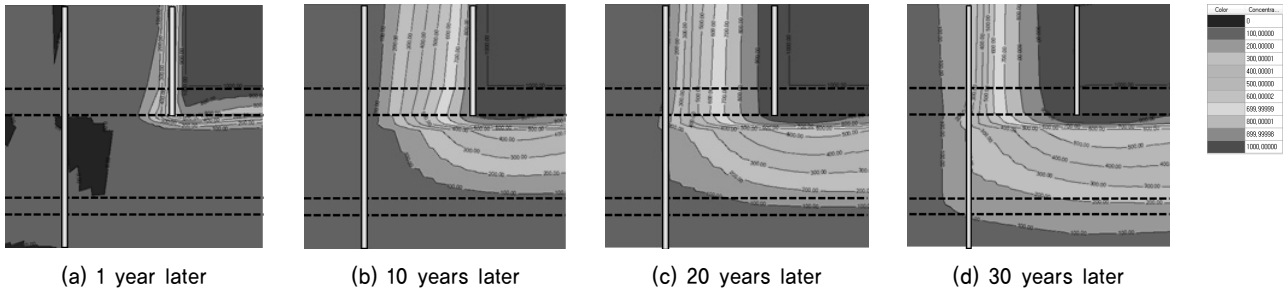


Fig. 9. Concentration distribution with elapsed time with vertical barrier (embedded depth in clay layer = 0 m)

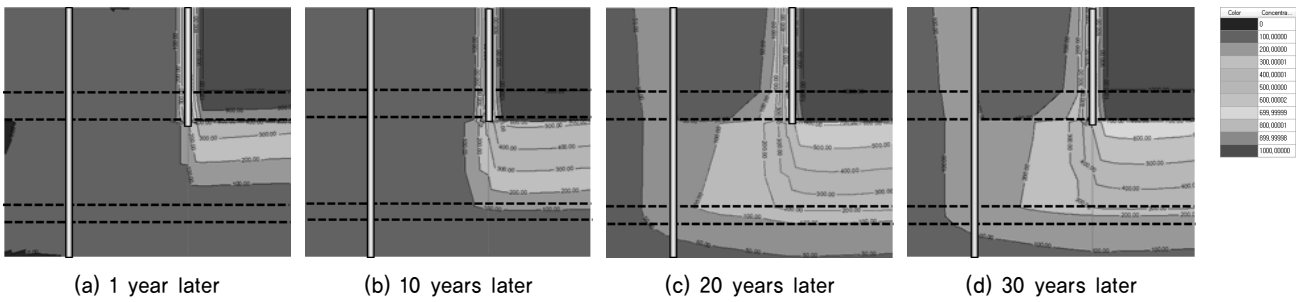


Fig. 10. Concentration distribution with elapsed time with vertical barrier (embedded depth in clay layer = 0.5 m)

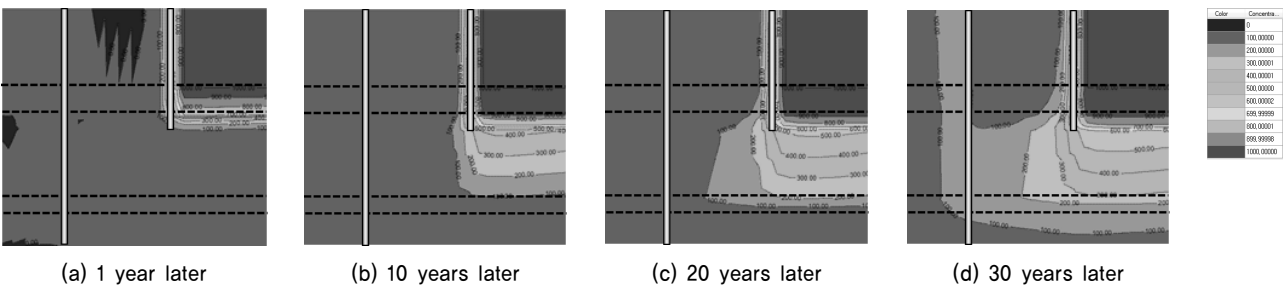


Fig. 11. Concentration distribution with elapsed time with vertical barrier (embedded depth in clay layer = 2.5 m)

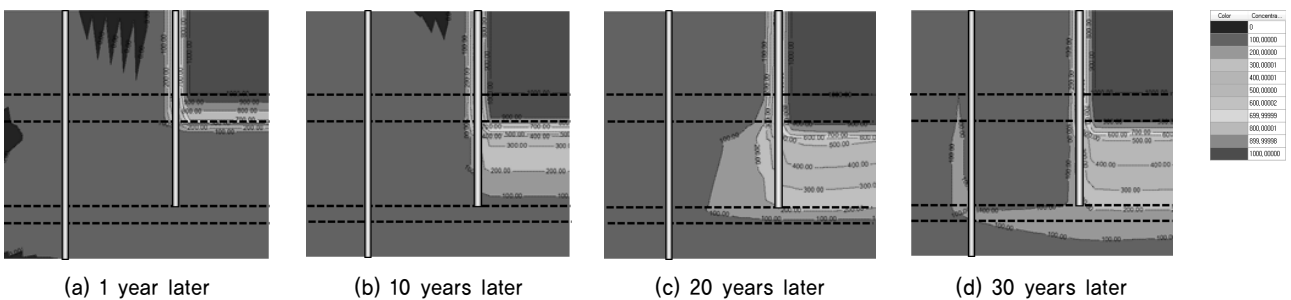


Fig. 12. Concentration distribution with elapsed time with vertical barrier (embedded in bottom of clay layer)

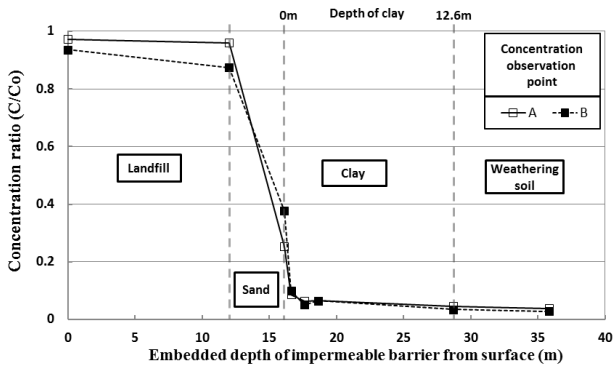


Fig. 13. Concentration at specific points according to embedded depth of vertical barrier

보여준다. Fig. 12와 같이 점토층 하부까지 완전히 근입시킴으로써 점토층을 통한 장기적인 유출을 방지할 수 있을 것이다.

연직벽체 근입깊이에 따른 오염물질 이동특성을 정량적으로 비교하기 위하여 호안단면의 특정 위치(Fig. 7(a))에서의 30년 후 오염물질 농도값을 추출하여 Fig. 13에 도시하였다. 연직차수벽체를 모래층 상부까지만 설치한 경우에는 모래층을 통해 오염물질의 유출이 발생하기 때문에 차수벽체가 없는 경우와 비교하여 농도 감소율이 A 지점에서 약 1%, B 지점에서 약 7%로 오염물질 유출방지 효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 연직차수벽체가 점토층 상부까지만 근입되었을 경우 차수벽체가 설치되지 않은 경우와 비교하여 오염물질 감소율은 A에서 약 74%, B에서 약 60%로 나타났다. 또한, 연직차수벽체가 점토층으로 0.5m까지 근입되면 오염물질 농도가 A 지점에서 약 91%, B 지점에서 약 89%까지 감소된 것으로 나타났다. 연직차수벽체가 저투수성 지반으로의 근입심도가 2.5m인 경우에는 오염물질 농도 감소율은 A 지점에서 약 96%, B 지점에서 약 97%로 나타났다. 점토층 하단까지 연직차수벽체를 설치한 경우에는 2.5m 근입된 경우와 농도 감소율은 거의 동일한 것으로 나타났다.

오염물 이동해석을 통해 연직차수벽체의 근입깊이에 따른 오염물질의 이동특성 해석결과에 의하면 연직차수벽체를 점토층 0.5m 이상 근입시킴으로써 오염물질 유출방지 효과는 큰 것으로 나타났으며, 2.5m 정도만 근입시키더라도 점토층 하단까지 근입시킨 것과 유사한 유출방지 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 해상처분장에서의 연직차수벽체 설계 시 현장의 지반조건과 오염물질의 이동특성을 감안하여 효과적인 연직차수벽체의 근입심도를 산정하는 것이 경제적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해상처분장에서 해저지반을 통한 오염물질 이동특성과 연직차수벽체에 근입심도에 따른 유출방지 효과를 분석하기 위해 단층 및 다층지반 조건에 대하여 SEEP/W를 이용한 침투해석과 Visual Modflow를 이용한 오염물질 이동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 침투해석결과 연직차수벽체가 저투수성 지반으로 0.5m 근입되면 차수벽체가 설치되지 않은 경우와 비교하여 침투유량의 감소율은 단층지반에서 약 93%, 다층지반에서 약 98%로 큰 감소효과를 보이는 것으로 나타났다. 연직차수벽체의 근입깊이를 저투수성 지반으로 0.5m보다 깊게 근입하여도 침투유량의 추가적인 감소효과가 크지 않은 것으로 나타나 연직차수벽체를 저투수성 점토층으로 일정 깊이 이상 근입시키면 침투유량의 저감 효과는 충분히 발휘되는 것으로 판단된다.
- (2) 오염물질 이동해석 결과에 의하면 연직차수벽체가 투수성 지층까지만 설치하면 시간이 경과됨에 따라 저투수성 지반의 상부영역을 통하여 장기적으로 오염물질의 유출이 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 오염물질의 이동을 차단하기 위해서는 연직차수벽체가 저투수성 지반까지 설치될 필요가 있다.
- (3) 연직차수벽체를 저투수성 지반으로 0.5m 이상 근입시킴으로써 오염물질 유출방지 효과를 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 2.5m까지 근입시킨 경우 저투수성 지반 전체에 연직차수벽체를 근입시키는 경우와 오염물질의 유출방지 성능은 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 해상처분장의 연직차수벽체의 경제적인 설계 시 오염물질의 유출을 방지할 수 있는 최소 근입심도를 산정하여 적용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요사업(PE99422)으로 수행되었습니다.

References

1. 권오순, 오명학, 채광석 (2012), 관리형 폐기물 매립호안 설계·

- 시공·관리 매뉴얼, 도서출판 씨아이알, pp. 164~170.
2. Kang, J. K. (2012), Determination of influence factors on advection-diffusion of contaminants contained in construction waste Soil, Doctor's thesis, Incheon National University, pp. 101~104 (in Korean).
 3. Kwon, Y. S. (2005), Study on the prediction of landfill leachate leakage range by visual MODFLOW model a case study of industrial estate landfill of P"city, Master's thesis, University of Seoul, pp. 56~60 (in Korean).
 4. Lee, K. Y., Yoon, S. T., Budiman A. and Saputra R. H. (2007), Principle of leachate percolation and cutoff wall for the excavation of waste piles, Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Annual Conference 2007, pp. 842~845 (in Korean).
 5. Lerman, A. (1979), Geochemical processes – water and sediment environments, Wiley-Intersciences, New York, pp. 481.
 6. Mitchell, J. K. and Rumer, R. R. (1997), Waste containment barriers : Evaluation of the technology, In situ remediation of the geoenvironment, J.C. Evans eds., Geotechnical Special Publication No. 71, ASCE, pp. 1~25.