

정상류하 침투 · 이류 분산 해석을 이용한 폐기물 해상최종처리장 차수시스템의 최적 성능 평가

Evaluation of Optimal Performance of Hydraulic Barriers in Offshore Landfill using Seepage-Advection-Dispersion Analysis under Steady State Flow

황웅기* · 오명학** · 김태형* · 김향은***

Woong-Ki Hwang*, Myoung-Hak Oh**, Tae-Hyung Kim* and Hyang Eun Kim***

요 지 : 본 연구는 정상류 조건에서 폐기물 해상최종처리장에서의 오염원의 누출 방지에 필요한 최적의 최소기준을 제안하기 위하여 각각 바닥 및 연직 차수시스템의 기본적인 차수공에 대하여 침투 · 이류 분산해석을 수행하였다. 연구 결과 바닥 차수시스템의 최소기준으로 투수계수 1×10^{-6} cm/s 이하인 불투수성 지층이 두께 500 cm 이상이거나 이와 동등한 차수효과를 가진 차수시스템이어야 한다. 연직 차수시스템의 최소기준으로 투수계수 1×10^{-6} cm/s 이하인 두께 50 cm 이상이거나 이와 동등한 차수효과를 가진 차수시스템을 설치하여야 한다. 또한, 연직 차수시스템은 바닥 차수시스템과 일체가 되어 차수기능을 발휘하도록 충분한 근입깊이가 필요하다.

핵심용어 : 해상최종처리장, 연직차수시스템, 바닥차수시스템, 침투, 이류, 분산

Abstract : This study was conducted to propose the optimum minimum requirement of cutoff system composed of the impermeable soil layer and vertical barrier in offshore landfill for prevention pollution leakage by seepage, advection, and dispersion numerical analyses under steady state. According to the study results, the minimum requirement of impermeable soil layer is below 1×10^{-6} cm/s of hydraulic conductivity with more than 500 cm thickness or a system with equivalent cutoff effect. The minimum requirement of vertical barrier is below 1×10^{-6} cm/s of hydraulic conductivity with more than 50 cm thickness or a system with equivalent cutoff effect. In addition, the vertical barrier should be embedded enough to seal securely with the impermeable soil layer for working cutoff effect.

Keywords : offshore landfill, vertical barrier, impermeable soil layer, seepage, advection, dispersion

1. 서 론

사회 발전과 간헐적으로 발생하는 재난 재해의 증가로 인해 연간 폐기물 발생량은 아직도 증가하는 추세를 보이고 있다. 우리나라의 경우 2015년 기준 404,812톤 폐기물이 발생되었으며 이중 35,133톤이 매립되었으며 661톤이 해역으로 배출되었다(Korea Environment Corporation, 2016). 폐기물 육상최종매립처리장의 수용 용량은 가까운 장래에 한계에 도달할 것으로 예상되지만, 신규 폐기물 최종처리장의 부지 확보가 주민들의 민원 및 주변의 환경문제에 대한 우려로 어려운 상황에 놓여있다. 이러한 환경에서 신규 폐기물 최종처리장을 해상에 조성하는 것이 대안으로 고려되고 있다. 일본은 이미 1960년대 후반부터 해상에 폐기물 최종처리장을 조성하여 현재 약 40개소의 폐기물 해상최종처리장을 운영하고 있

다. 특히 동경만, 오사카, 요코하마 등 대도시 인근에는 모두 폐기물 해상최종처리장이 조성되어 있으며, 폐기물 매립처리에 있어서 폐기물 해상최종처리장에 대한 의존도가 매우 높다. 또한, 싱가포르에서도 세마카우 매립지를 조성하여 소각재 등을 매립 처리하고 있다(Kwon et al., 2012).

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 1.0 m 이상 투수계수가 1×10^{-7} cm/s 이하이거나, 점성토 투수계수가 1×10^{-7} cm/s이고 두께는 50 cm 이상인 지반에 차수시트 1겹 이상, 2.0 mm 이상의 두께로 포설하도록 되어있다(Ministry of

*한국해양대학교 건설공학과(Corresponding author: Tae-Hyung Kim, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr)

**한국해양과학기술원 연안방재연구센터(Coastal Disaster Prevention Research Center, Korea Institution of Ocean Science & Technology)

*** (주)지오알앤디(Geo R&D Co. Ltd.)

Environment, 2016).

해상 폐기물매립지에서는 해상으로 침출수가 유출되는 것을 방지하기 위하여 육상 폐기물매립지와 달리 호안 및 연직 차수벽체 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 5 m 이상, 투수계수 $k = 1 \times 10^{-5}$ cm/s 이하’로 규정하고 있다. 또한, 연직차수공에 대해서는 불투수성 지층에 대한 근입깊이가 하부지반의 차수성능을 만족시킬 수 있도록 흐름 경로가 하부지반 두께 기준에 부합되도록 2.5 m 이상의 근입깊이(연직차수벽체를 우회하는 최단 흐름 경로는 5 m 이상)를 확보하도록 규정되어 있다(Kwon et al., 2012). 그러나 국내에는 해상 폐기물매립지 사례가 없으므로 연직차수벽체 등 차수공 설치기준이 별도로 마련되어 있지 않은 실정이다.

폐기물 해상최종처리장의 차수는 크게 바닥 차수 및 연직 차수로 구분할 수 있으며, 바닥 및 연직 차폐시설에는 다양한 구조 형식이 존재한다. 침출수 유출을 방지하기 위하여 바닥 및 연직 차수시스템으로 완전히 차폐하는 것은 비경제적이므로 (Mitchell and Rumer, 1997), 오염물질의 유출방지 기능을 충분히 발휘하면서도 경제적인 최적의 기준을 산정할 필요가 있다. 이를 위해서는 우선적으로 각 차수시스템별 다양한 조건 하에서의 오염물 이동특성 파악과 오염물질 유출방지 효과에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 가장 기본적인 차수시스템으로 사용되는 불투수성 점성토지반 바닥 차수시스템과 지중연속벽의 연직 차수시스템에 대하여 다양한 조건하에서 침투·이류 분산해석을 수행하는 것을 연구의 범위로 설정하였다.

폐기물 해상최종처리장은 그 입지적 특성상 조석의 영향을 받으므로 최종처리장 주변 지층내의 지하수 흐름은 비정상류 흐름을 나타내고, 그에 따라 오염물 농도가 시간에 따라 변화할 수 있다. 그러므로 해상최종처리장의 경우 육상최종처리장과 달리 폐기물내 오염물의 이동을 분석할 때 조수간만의 영향을 반영할 필요가 있다. 하지만 이러한 비정상류 흐름에서의 오염물 이동 및 농도 분포를 수식적으로 예측하는 것은 어렵다(Foose, 2010). 따라서 이러한 경우 수치해석적인 방법이 이용되는데 해석에 상당한 계산 성능과 계산 비용이 요구되므로 정상상태 하에서의 오염물 이동 및 농도 분포를 예측하는 것이 일반적이다. 그리고 정상류 상태를 가정하여 차폐시스템의 차수성능을 평가하는 것이 보다 보수적인 설계를 위하여 바람직한 측면도 있다(Rubin and Rabideau, 2000; Foose, 2010). 따라서 본 연구에서는 정상류 하에서의 폐기물 해상최종처리장의 차수시스템의 차수성능을 평가하였다.

2. 확산 및 분산 개념

폐기물 해상최종처리장에는 매립된 폐기물에서 발생한 침출수가 매립지 바깥 해역으로 누출될 위험이 존재한다. 이러

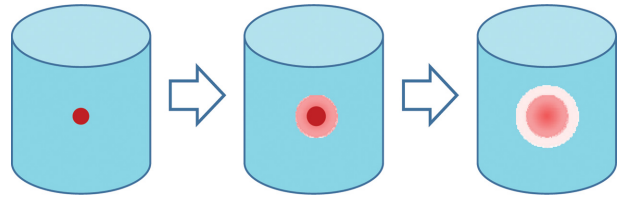


Fig. 1. Conceptual diagram of pollutant diffusion.

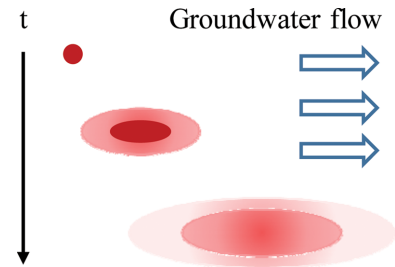


Fig. 2. Conceptual diagram of pollutant dispersion.

한 침출수에는 폐기물로부터의 오염물을 포함하고 있을 가능성이 크다. 따라서 이러한 침출수가 해역으로 누출되지 않도록 폐기물 해상최종처리장에는 차수공이 설치되어 있으며, 차수공은 주변 환경의 보호에 중요한 역할을 하고 있다.

침출수에 의한 오염물의 이동은 주로 이류와 확산 및 분산에 의해 발생한다. 폐기물 해상최종처리장에서 무기계의 오염물을 포함하는 침출수도 누출 및 오염물의 거동은 침투뿐만 아니라 이류 및 분산 현상을 동반할 것이다. 따라서 폐기물 해상최종처리장의 차수공을 대상으로 한 수치해석을 수행하기 위해서는 침투와 이류 및 분산 현상을 정확하게 재현할 필요가 있다.

이류에 의한 오염물 이동은 물에 녹은 오염물이 물과 함께 이동하는 현상이다. 확산에 의한 오염물 이동은 오염물의 농도구배에 의한 브라운 운동에 의해 오염물 농도가 균일화 되려고 퍼져가는 현상(Fig. 1)이다. 분산에 의한 오염물 이동은 유속의 불균질성에 의해 오염물이 퍼져 나가는 현상(Fig. 2)이다. 지반내 오염물 이동은 주변 환경과 지반 및 차수공의 특성에 따라 이류, 분산, 확산에 의한 오염물 이동을 적절히 반영하여야 한다. 특히 차수 부분의 투수성이 높은 경우에는 이류의 영향이 상대적으로 크고, 투수성이 낮아 침투유속이 느린 경우 확산과 분산의 영향을 상대적으로 큰 영향을 미친다(Devlin and Parker, 1996; Neville and Andrews, 2006).

따라서 폐기물 해상최종처리장에서의 유해물질을 포함하는 침출수의 누출에 대해 이류뿐만 아니라 확산 및 분산을 고려하여 평가하고 적절한 차수공 기준의 제안이 필요하다.

3. 침투·이류 분산 해석에 의한 차수성능 평가

3.1 해석프로그램

본 연구의 해석에서는 포화·불포화 상태의 침투 및 이류

분산에 따른 지하수 흐름과 용질의 이동을 분석할 수 있는 유한요소해석 프로그램 SEEP/W 및 CTRAN/W를 사용하였다. SEEP/W 및 CTRAN/W는 캐나다 Geo-Slope사에서 개발한 범용 지반 유한요소해석 프로그램 패키지인 GeoStudio의 지하수 흐름 및 오염물 이동을 분석하기 위한 각각 하나의 해석모듈이다. SEEP/W는 포화·불포화 상태의 흙 및 암반과 같은 다공질 지반 내의 지하수 침투흐름과 과잉간극수압의 소산문제를 해석하기 위한 프로그램으로 정상상태해석(steady-state analysis) 및 비정상상태해석(transient analysis)을 수행할 수 있다. 또한, CTRAN/W는 다공질 지반을 통한 오염물의 이동을 모사하기 위한 프로그램으로 침투에 의한 이류, 오염물 농도차 및 지반의 역학적 특성에 따른 분산, 흙의 흡착, 방사성 물질의 붕괴를 고려할 수 있다. CTRAN/W는 간극수 내에 녹아있는 오염물의 이동을 계산하기 위하여 SEEP/W로부터 계산된 지반내 유속장을 이용한다.

SEEP/W에 이용된 2차원 연속체로 가정한 포화·불포화 지반에서의 간극수 흐름 및 간극수압 분포에 대한 지배방정식은 식 (1)과 같다. SEEP/W는 이러한 지배방정식에 대하여 Galerkin의 가중잔여법(weighted residual method)을 이용하여 유한요소 정식화하였다(GEO-SLOPE, 2012a).

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

여기서, H 는 전수두[L], k_x 는 수평방향 투수계수[MT^{-1}], k_y 는 연직방향 투수계수[MT^{-1}], Q 는 경계에서의 침투 유속[MT^{-1}], θ 는 체적함수비[-], t 는 시간[T]을 각각 나타낸다.

또한, CTRAN/W에 이용된 지반내 오염물 이동에 대한 지배방정식은 식 (2)와 같다(GEO-SLOPE, 2012b).

$$\left(\theta + \rho_d \frac{\partial S}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \theta C - \lambda S \rho_d \quad (2)$$

여기서, C 는 오염물의 농도[ML^{-3}], ρ_d 는 흙의 건조단위밀도[ML^{-3}], S 는 흡착비[-], D 는 수리분산계수[L^2T^{-1}], U 는 Darcy의 유속[MT^{-1}], λ 는 방사능 물질의 붕괴계수[T^{-1}]를 각각 나타낸다.

좌변은 오염물의 농도 변화에 따른 유체 및 흡입자 내에 저장된 오염물의 양을 나타내고, 우변의 첫 번째 항은 분산에 의한 오염물 이동을, 두 번째 항은 이류에 의한 오염물 이동을, 세 번째 항과 네 번째 항은 각각 유체 및 흡입자 내에서 붕괴된 오염물의 질량손실을 각각 나타낸다.

3.2 해석 모델

본 연구는 폐기물 해상최종처리장의 바닥 및 연직 차수시스템의 최소기준을 검토하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 기본적인 연직차수시스템 2차원 단면 해석 모델을 이용하여 침출물 누출에 대한 평가를 수행한다. 연직차수시스템은 지중연속벽으로 가정하고 폐기물 층과 해역의 경계에 위치하는 것

으로 하여 폐기물 층으로부터 해역으로의 침출수의 누출을 평가할 수 있도록 하였다. 연직차수시스템의 두께, 투수계수, 경계에서의 누출을 방지하기 위해 바닥 차수시스템으로 근입시킨 차수처리 깊이에 대한 최소기준을 제시하기 위하여 차수공의 두께, 투수계수, 차수처리 깊이는 조건에 따라 변화하는 것으로 하였다. 또한 바닥차수시스템으로 해상최종처리장의 특성을 고려한 기본적인 불투수성 해저 점성토 지반을 고려하고, 이에 대한 투수계수 및 지층 두께에 대한 최소기준을 제시하기 위하여 각각의 조건을 변화시켜 해석을 수행하였다.

3.3 해석 조건

가정한 해석 모델의 지반 및 구조물(Fig. 3)에 대해 침투·이류 분산 해석에 이용된 각 재료 물성치는 Table 1과 같다. 이러한 재료 물성치는 폐기물 해상최종처리장의 침투·이류 분산 해석에 대한 연구문헌에 제시된 값을 반영하였다(Kwon et al., 2012). 분자 확산계수는 카울린 점토를 이용한 추정 간극비의 차이에 따라 $6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 를 나타내며, 지반내 무기화합물질의 확산계수에 대해 $8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s} \sim 6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 정도의 값이 타당한 것으로 보인다. 또한 침투·이류 분산 해석을 이용한 폐기물 해상최종처리장의 유해물질 누출 평가에 관한 연구에서는 각 지층의 분자 확산계수는 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 가 이용되고 있다. 그 외 해석에 필요한 기타 가정 조건은 다음과 같다.

(1) 단위 계산간격은 0.1년, 분석기간은 50년으로 하고 데이터는 1년마다 저장한다.

(2) 폐기물층과 해역의 수두 차이는 100 cm로 한다.

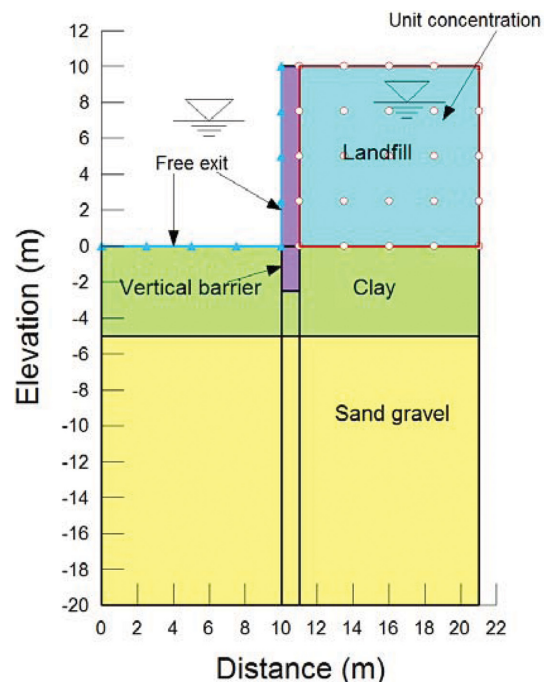


Fig. 3. Numerical analysis model used in the leakage performance simulation of barrier system.

Table 1. Material properties used in the numerical analysis

Parameter	Vertical barrier	Waste material	Clay	Gravelly sand
Horizontal hydraulic conductivity k_h (cm/s)	Variable	1×10^{-3}	Variable	1×10^{-1}
Vertical hydraulic conductivity k_v (cm/s)	Variable	1×10^{-3}	Variable	1×10^{-1}
Porosity ratio n (-)	0.1	0.7	0.2	0.4
Longitudinal dispersion coefficient α_L (cm)	100	100	100	100
Transverse dispersion coefficient α_T (cm)	10	10	10	10
Molecular diffusion coefficient D^* (m^2/sec)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
Specific storage M_v (1/kPa)	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

Table 2. Parametric analysis cases of the impermeable soil layer to hydraulic conductivity and thickness

Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage (cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k (cm/s)	Thickness of impermeable soil layer (cm)
250	1×10^{-5} 1×10^{-6} 1×10^{-7}	250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700

Table 3. Parametric analysis cases of the vertical barrier to hydraulic conductivity and thickness

Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage (cm)	Hydraulic conductivity of vertical barrier wall, k (cm/s)	Thickness of vertical barrier wall (cm)
250	1×10^{-5} 1×10^{-6} 1×10^{-7}	10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200

Table 4. Parametric analysis cases of the vertical barrier to embedded depth in impermeable soil layer

Thickness of impermeable soil layer (cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k (cm/s)	Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage (cm)
500	1×10^{-5} 1×10^{-6} 1×10^{-7}	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 50, 80, 100, 150, 200, 250, 300 25, 50, 100, 150, 200, 250

(3) 유해물질의 상대농도는 폐기물층은 $C = 1.0$, 해역은 $C = 0$ 으로 자유 유출경계로 한다.

또한, 바닥 차수시스템으로 이용된 불투성 지층과 연직 차수시스템으로 이용된 지중연속벽의 각 기준항목에 대한 차수 성능 평가를 위한 매개변수 해석을 위하여 이용된 해석 조건을 Table 2~4에 나타내었다.

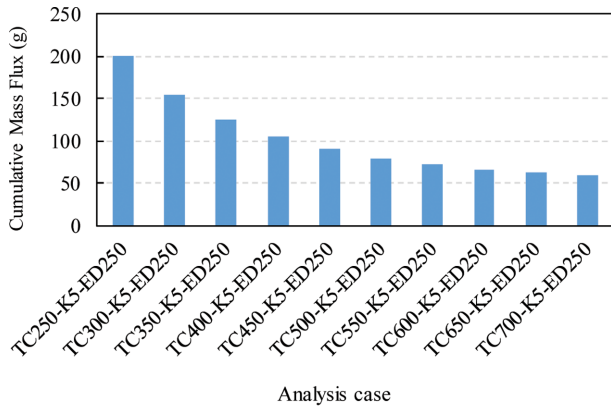
3.4 해석 결과

3.4.1 바닥 차수시스템(불투수성 점성토지반)의 최적의 투수계수

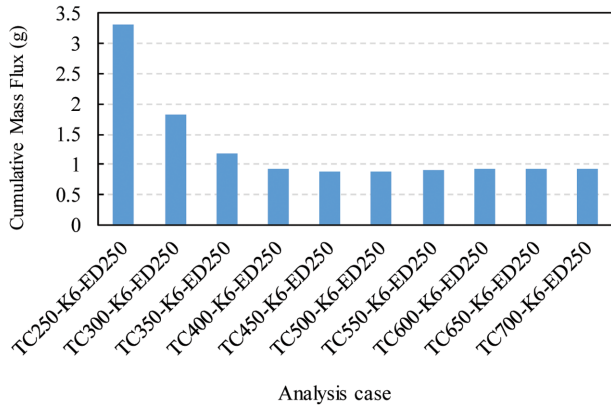
폐기물 해상최종처리장의 바닥 차수를 위한 바닥 차수시스템의 두께 및 투수계수에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 연직 차수시스템에 대해 차수 처리한 근입깊이와 투수계수를 각각 250 cm 및 1×10^{-11} cm/s로 고정하고 바닥 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 두께를 250 cm에서 700 cm까지 50 cm 간격으로 총 10가지 경우(250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650,

700)에 대하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다. Fig. 4는 각각 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 바닥 차수시스템의 두께 변화에 따른 50년 경과 후 누적누출량의 막대그래프를 나타낸다. 그림에서 TC는 바닥 차수시스템의 두께를 K는 투수계수를 ED는 연직 차수시스템의 차수처리 근입깊이를 각각 나타낸다.

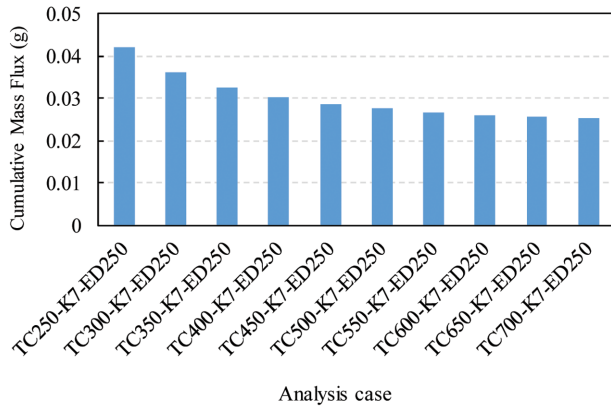
Fig. 4(a), (b), and (c)에 나타난 것처럼 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 누적누출량의 범위는 각각 대략 60~200 g, 0.9~3.3 g, 0.025~0.042 g의 분포를 나타낸 것이다. 세 가지 투수계수에 대한 50년 경과 후 누적누출량의 막대그래프를 비교해보면 1×10^{-5} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 각각 약 98.8% 및 99.9% 감소하였으며, 투수계수가 1×10^{-6} cm/s에서 1×10^{-7} cm/s으로 감소한 경우 추가적으로 약 1%의 누출량이 감소하여 그 효과가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 불투수성 해저점토지반의 최적의 투수계수에 대한 최소기준은 1×10^{-6} cm/s가 합리적일 것으로 판단된다.



(a) $k=1 \times 10^{-5}$ cm/s



(b) $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s

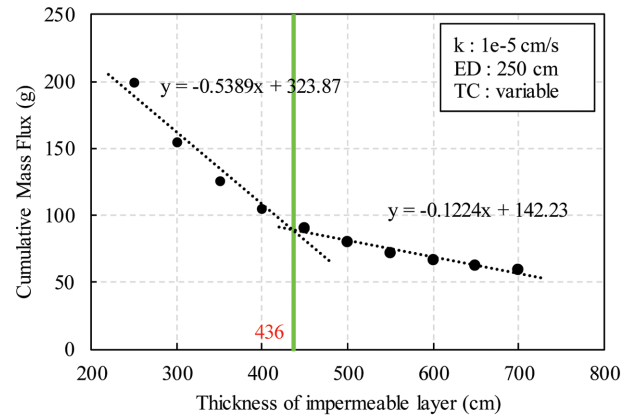


(c) $k=1 \times 10^{-7}$ cm/s

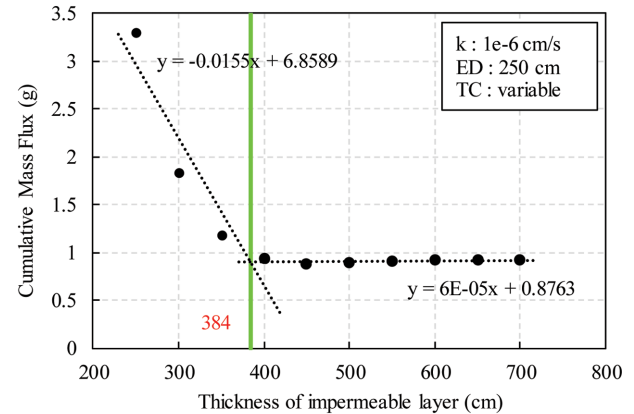
Fig. 4. Cumulative mass flux during 50 years to thickness and hydraulic conductivity of the impermeable soil layer. Fixed with $k = 1 \times 10^{-11}$ cm/s and 250 cm embedment depth of the vertical barrier.

3.4.2 바닥 차수시스템(불투수성 점성토지반)의 최적의 두께

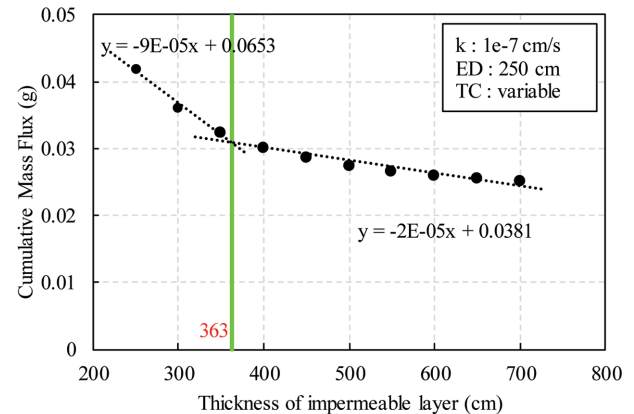
Fig. 5(a), (b), and (c)는 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 바닥 차수시스템의 두께에 따른 50년 동안 누적누출량을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 바닥 차수시스템의 최적의 두께는 각각 436, 384, 363 cm로 나타났다. 앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 두께는 384 cm로 지반의 불균질성을 고려하여 30%의 여유를 두



(a) $k=1 \times 10^{-5}$ cm/s



(b) $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s



(c) $k=1 \times 10^{-7}$ cm/s

Fig. 5. Cumulative mass flux during 50 years to thickness of the impermeable soil layer. Fixed with $k = 1 \times 10^{-11}$ cm/s and 250 cm embedment depth of the vertical barrier.

어 바닥 차수시스템의 최적의 두께에 대한 최소기준을 500 cm로 산정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한, 이 경우 투수계수 1×10^{-5} cm/s에 대한 두께 436 cm를 만족하므로 지반의 불균질성을 충분히 고려 가능할 것으로 판단된다.

3.4.3 연직 차수시스템의 최적의 투수계수

폐기물 해상최종처리장의 연직 차수시스템의 두께와 투수계수 및 차수 처리한 근입깊이에 대한 최적의 최소기준을 도

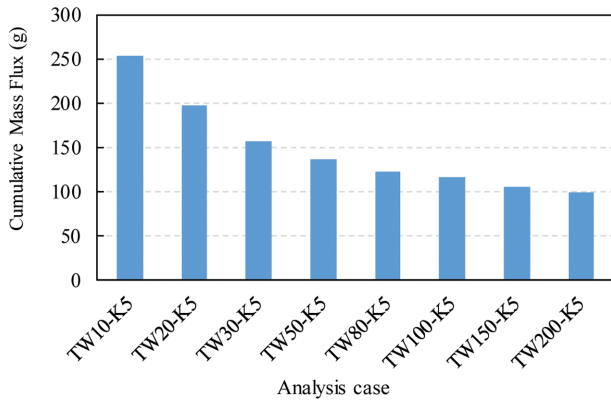
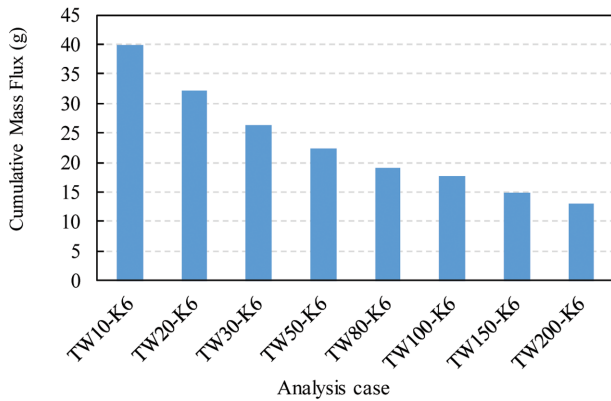
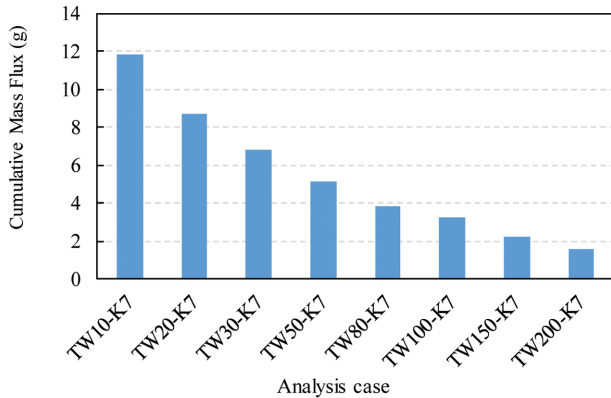
(a) $k=1 \times 10^{-5}$ cm/s(b) $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s(c) $k=1 \times 10^{-7}$ cm/s

Fig. 6. Cumulative mass flux during 50 years to thickness and hydraulic conductivity of the vertical barrier. Fixed with 250 cm embedment depth of the vertical barrier and $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s and 500 cm of the impermeable soil layer.

출하기 위하여 바닥 차수시스템의 두께와 투수계수를 각각 500 cm 및 1×10^{-6} cm/s로 연직 차수시스템의 근입깊이를 각각 250 cm로 고정하고, 연직 차수시스템의 3가지 투수계수를 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 연직 차수시스템의 두께를 총 8 가지 경우(10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200)로 가정하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다(see Table 3).

Fig. 6(a), (b), and (c)는 연직 차수시스템에 대한 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 두께에 따른

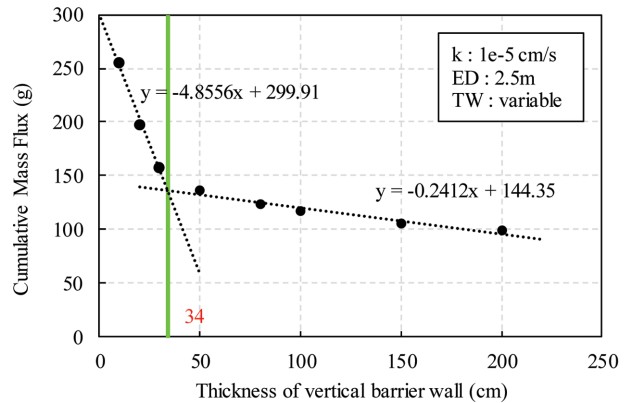
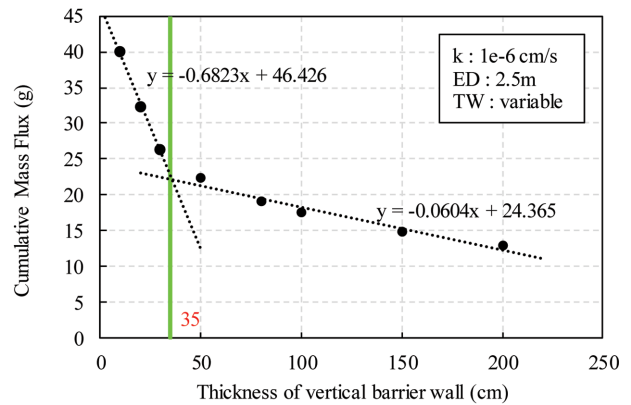
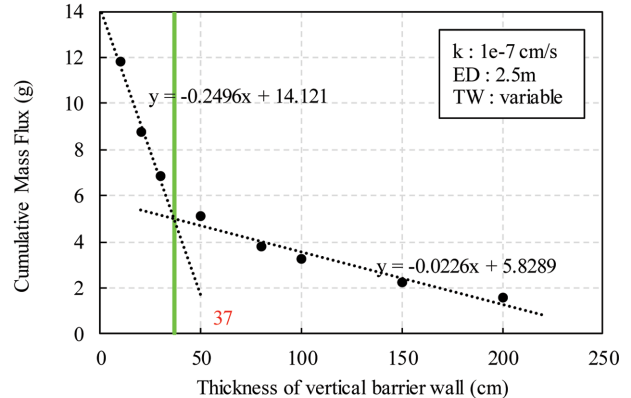
(a) $k=1 \times 10^{-5}$ cm/s(b) $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s(c) $k=1 \times 10^{-7}$ cm/s

Fig. 7. Cumulative mass flux during 50 years to thickness of the vertical barrier. Fixed with 250 cm embedment depth of the vertical barrier and $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s and 500 cm of the impermeable soil layer.

50년 동안 누적누출량의 막대그래프를 나타낸 것이다. 세 가지 투수계수에 대한 50년 경과 누적누출량의 막대그래프를 비교해 보면, 1×10^{-5} cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 누적누출량은 각각 약 85% 및 97% 감소하였고, 투수계수가 1×10^{-6} cm/s에서 1×10^{-7} cm/s으로 감소함에 따라 약 12%의 추가적인 누출량 감소를 보이며, 그 효과가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 연직 차수시스템의 투수계수에 대한 최적의 최소기준은

1×10^{-6} cm/s가 합리적인 것으로 판단된다.

3.4.4 연직 차수시스템의 최적의 두께

Fig. 7(a), (b), and (c)는 연직 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 연직 차수시스템의 두께 변화에 따른 50년 경과 누적누출량을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대한 연직 차수시스템의 최적의 두께는 각각 34~37 cm의 범

위를 나타내고, 앞서 산정한 최적의 투수계수 최소기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 두께는 35 cm로 나타났다. 연직 차수시스템의 차수 처리의 시공 상의 불확실성을 고려하여 약 30%의 여유를 두어 연직 차수시스템의 최적의 두께에 대한 최소기준을 50 cm로 산정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 또한, 이 경우 3가지 투수계수에 대한 두께 범위를 모두 만족하므로 연직 차수시스템의 두께 기준으로 적합할 것으로 판단된다.

3.4.5 연직 차수시스템의 최적의 근입깊이

연직 차수시스템의 최적의 근입깊이에 대한 최소기준을 평가하기 위하여 Table 4에 나타낸 것처럼 바닥 차수시스템의 두께를 500 cm로 그리고 연직 차수시스템의 투수계수와 두께를 각각 1×10^{-11} cm/s와 100 cm로 고정하고, 바닥 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대하여 연직 차수시스템의 근입깊이의 변화에 따라 차수성능을 평가하였다.

Fig. 8(a), (b), and (c)는 바닥 차수시스템의 각 투수계수에 대한 차수 처리 근입깊이에 따른 50년 경과 후의 누적누출량을 각각 나타낸 것이다. 그림에서처럼 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대하여 각각 248, 188, 98 cm의 근입깊이가 최적인 것으로 나타났다. 바닥 차수시스템에 대한 투수계수의 최소기준인 1×10^{-6} cm/s에 대응하여 188 cm가 합리적인 것으로 판단되며, 지반의 불균질성을 고려하여 30%의 여유를 두어 250 cm가 적당할 것으로 판단된다. 특히, 이 경우 바닥 차수시스템의 투수계수가 1×10^{-5} cm/s인 경우도 만족하므로 지반의 불균질성을 고려한 연직 차수시스템의 차수처리 근입깊이로 최적의 최소기준이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐기물 해상최종처리장에서의 오염물의 누출을 방지하는 차폐시스템에 대한 경제적인 최적의 최소기준을 제안하기 위하여 각각 바닥 및 연직 차수시스템의 기본적인 차수공에 대하여 침투·이류 분산해석을 정상류 조건 하에서 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 최적 성능을 나타내는 최소기준을 제안하였다.

(1) 바닥 차수시스템의 최소기준으로 투수계수 1×10^{-6} cm/s 이하인 불투수성 지층이 두께 5 m 이상이거나 이와 동등한 차수효과를 가진 차수시스템을 설치하여야 한다.

(2) 연직 차수시스템의 최소기준으로 투수계수 1×10^{-6} cm/s 이하인 두께 50 cm 이상이거나 이와 동등한 차수효과를 가진 차수시스템을 설치하여야 한다. 또한, 연직 차수시스템은 바닥 차수시스템과 일체가 되어 차수기능을 발휘하도록 바닥 차수시스템의 기준에 해당하는 침투시간을 확보할 수 있는 근입깊이가 필요하다.

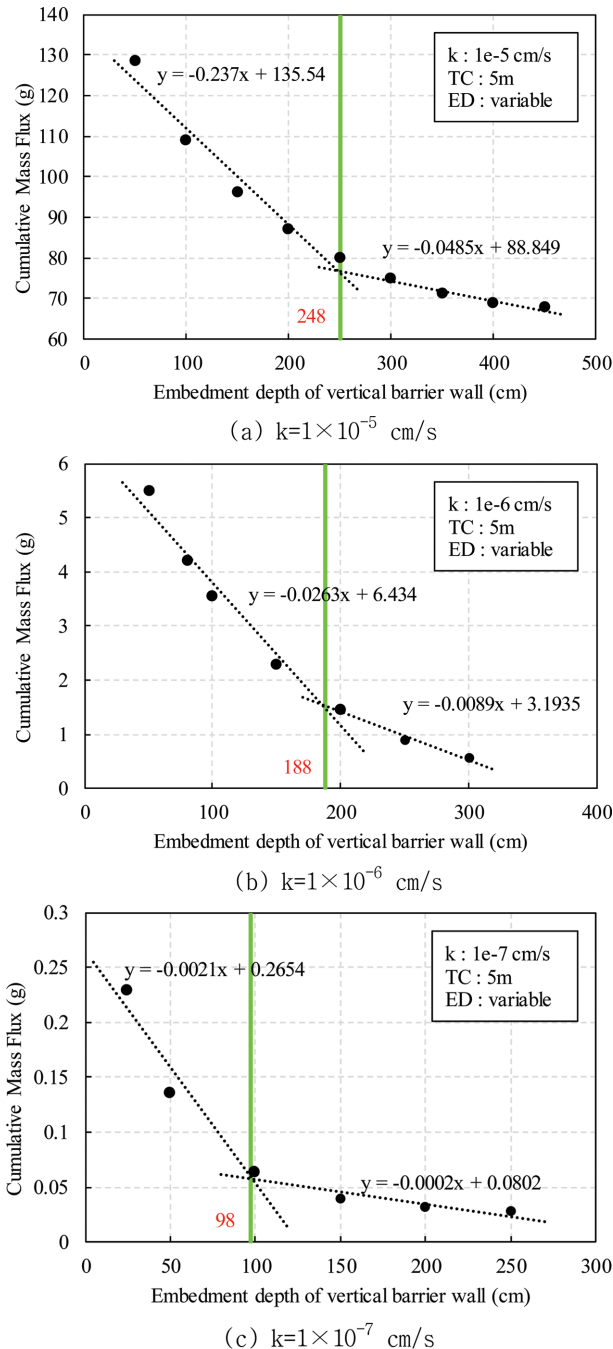


Fig. 8. Cumulative mass flux during 50 years to embedment depth of the vertical barrier. Fixed with 500 cm thickness of the impermeable soil layer and $k = 1 \times 10^{-11}$ cm/s and 100 cm thickness of the vertical barrier.

감사의 글

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(폐기물 해상 최종처리 기술 개발).

References

- Devlin, J.F. and Parker, B.L. (1996). Optimum hydraulic conductivity to limit contaminant flux through cutoff walls. *Groundwater*, 34(4), 719-726.
- Foose, G.J. (2010). A steady-state approach for evaluating the impact of solute transport through composite liners on groundwater quality. *Waste Management*, 30(8-9), 1577-1586.
- GEO-SLOPE (2012a). Seepage modeling with SEEP/W. GEO-SLOPE International Ltd.
- GEO-SLOPE (2012b). Contaminant modeling with CTRAN/W. GEO-SLOPE International Ltd.
- Kwon, O., Oh, M. and Chae, K.S. (2012). Guidelines for the design, construction, and management of managed wastes reclaimed embankment, CIR publishing.
- 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, 1-25.
- Neville, C.J. and Andrews, C.B. (2006). Containment criterion for contaminant isolation by cutoff Walls. *Groundwater*, 44(5), 682-686.
- Rubin, H. and Rabideau, A.J. (2000). Approximate evaluation of contaminant transport through vertical barriers. *Journal of Contaminant Hydrology*, 40(4), 311-333.
- Korea Environment Corporation (2016). Waste materials and disposal in Korea (2015), Keco2016-PE10-24, pp. 1-1257.
- Ministry of Environment (2016). Wastes control act: Enforcement regulations.

Received 9 March, 2018

Revised 7 April, 2018

Accepted 9 April, 2018