

점토지반에 이중벽체가 적용된 해상폐기물매립장의 적정 차수 기준

Proper Regulation of the Cutoff System in Offshore Landfill Built on Clay Ground with Double Walls

황 옹 기 ¹	Hwang, Woong-Ki	김 향 은 ²	Kim, Hyang-Eun
최 호 성 ³	Choi, Hoseong	김 태 형 ⁴	Kim, Tae-Hyung

Abstract

This study was conducted to propose a reasonable requirement regulation of cutoff barriers composed of bottom layer and vertical barrier of offshore landfill for the prevention of contaminant leakage. The bottom layer was composed of impermeable clay layer; vertical walls were composed of double walls; outer wall was composed of steel sheet pile which resisted against outer force; cutoff vertical barrier took the role of inner wall. Seepage-advection-dispersion numerical analysis was conducted using SEEP/W and CTRAN/W programs under steady and unsteady flows. The results showed that the values calculated under steady flow showed higher migration of pollutant than those of unsteady flow. The values calculated under steady flow are more valid from a design point of view. Under steady flow and the bottom clay layer and when the vertical barrier are homogeneous and completely well installed, respectively, the minimum required cutoff regulations for hydraulic conductivity, thickness, and embedded depth of the bottom clay layer and vertical barrier were suggested.

요 지

이 연구는 오염원 유출을 방지하기 위한 해상폐기물매립장 차수시스템에 요구되는 적절한 기준을 제안하기 위해 수행되었다. 차수시스템은 바닥층과 연직벽으로 구성된다. 바닥층은 불투수 점토층으로 연직벽은 이중벽체로 외곽벽체는 강관쉬트파일로 외력에 대한 저항을 담당하고 연직내부벽체가 차수를 담당하는 것으로 가정하였다. SEEP/W와 CTRAN/W 프로그램을 이용하여 침투-이류-분산 해석을 정상류 및 비정상류 조건에서 실시하였다. 해석결과, 정상류 조건에서 비정상류 조건 보다 오염원 이동이 크게 나타나 설계관점에서 차수기준은 정상류조건에서 산정된 값을 적용하는 것이 타당한 것으로 나타났다. 바닥층의 점토지반이 균질하고 연직차수시스템의 시공에 문제가 없다는 전제 하에 정상류조건에서 오염원 이동의 차수에 요구되는 점토층 및 연직차수벽의 투수계수, 두께, 근입깊이 등이 제안되었다.

Keywords : Offshore landfill, Cutoff system, Bottom layer, Vertical Barrier, Steady and unsteady flows

1 정희원, (주)지오알앤디 부장 (Member, Director, Geo R&D Co., Ltd.)

2 정희원, (주)지오알앤디 이사 (Member, Director, Geo R&D Co., Ltd.)

3 비회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 석사졸업 (Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ.)

4 정희원, 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

육상폐기물매립장의 수용 용량의 한계와 불법폐기물 매립의 처리를 위하여 폐기물매립장의 신설이 필요하지만 해당 지역 주민 및 환경단체의 민원 그리고 주변의 환경문제에 대한 우려로 육상에서 매립장 신설이 어려운 상황이다. 또한 간헐적으로 발생하는 지진 또는 태풍으로 인한 재난 재해의 증가로 폐기물 발생량은 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 이러한 환경에서 신규 폐기물매립장을 바다에 건설하는 것이 고려되고 있다.

일본의 경우 1960년대 후반부터 바다에 폐기물매립장을 조성하여 현재 약 75개소의 폐기물매립장을 운영하고 있다. 요코하마, 동경만, 오사카 등 주요 대도시 부근에는 모두 해상 폐기물매립장이 건설되어 있어, 폐기물의 해상매립에 대한 의존도가 매우 높다(Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center, 2018). 싱가포르의 경우 세마카우 매립지를 건설하여 폐기물 소각재를 매립하고 있다(Kwon et al., 2012; Environmental Protection Agency of Singapore, 2016)

폐기물매립장에서는 오염물질의 외부유출을 차단하는 것이 가장 중요하다. 육상매립장에서는 점토차수층과 HDPE 차수시트를 바닥과 사면부에 설치하여 오염물질의 외부유출을 차단하고 있다. 우리나라의 경우 육상 폐기물매립지에서의 차수시설 기준은 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하 하부 점토지반이 두께 1.0m 이상 이거나, 점성토 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이고 두께는 50cm 이상인 지반에 차수시트 1겹 이상, 2.0mm 이상의 두께로 포설하도록 폐기물관리법 시행규칙에 명시되어있다(Ministry of Environment of Korea, 2016). 미국 및 유럽에서도 우리나라의 경우와 유사한 기준을 적용하고 있다. 하지만 일본의 경우 좀 더 완화된 투수계수가 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 이하를 적용한다(Park et al., 2016).

해상폐기물매립장에서는 침출수가 해상으로 유출되는 것을 차단하기 위하여 바닥 및 연직차수벽체 등의 차수공이 필요하다. 일본의 경우 해저 점토지반을 바닥차수층으로 이용하고 연직차수벽체를 시공하여 침출수 및 오염물질의 유출을 차단하고 있다(Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center, 2018). 일본에서는 해상폐기물매립장에서 ‘투수계수 $k=1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이하, 두께 5m 이상’으로 하부지반의 차수성능을 규정하고 있다. 또한, 연직차수벽체의 경우 근입깊이가 차수성능을 만족시킬 수 있도록 흐름 경로가 불투수 하부지

반 두께 기준에 부합되도록 2.5m 이상(연직차수벽체를 우회하는 최단 흐름 경로는 5m 이상)을 확보하도록 규정하고 있다(Kwon et al., 2012). 그러나 우리나라의 경우 바닥 및 연직차수벽체 등 해상 폐기물매립지 차수공 설치기준이 별도로 마련되어 있지 않다.

Mitchell and Rumer(1997)는 바닥 및 연직 차수시스템으로 침출수 유출을 완전히 방지하는 것은 비경제적임을 지적하였다. 즉, 경제적이며 오염물질의 유출방지 기능을 충분히 발휘할 수 있는 기준 산정이 필요하다. 기준 산정을 위하여 먼저 차수시스템별 여러 경우에 대하여 오염물질의 이동특성 파악과 유출방지 효과에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 해상폐기물 매립장의 특성을 반영하여 조석에 의한 해역의 수위 변동을 고려한 비정상류 해석을 실시하였다. 또한 해석 대상을 점토지반에 이중벽체가 적용된 해상폐기물매립장을 선정하였다. 이중벽체의 외곽은 강관쉬트파일로 외력에 대한 저항을 담당하고 내부는 차수를 담당하는 벽체로 가정하였다. 이 연구의 목적은 이중벽체 해상폐기물매립장의 바닥 차수시스템과 연직 차수시스템에 대하여 정상류와 비정상류조건에 대해 침투·이류 분산해석을 수행하고 그 결과를 비교하여 요구되는 최소기준(투수계수, 두께, 근입깊이 등)을 제시하는 것이다. 흐름으로 인한 오염물 농도 분포 및 이동을 수식적으로 예측하는 것은 어려워 Foose (2010)가 제안한 수치해석적 방법을 이용하였다. 본 연구의 범위에서 지진, 해일 또는 파랑에 의한 해상폐기물매립장의 안정성과 파랑에 의한 오염원 이동은 제외되었다.

2. 분산 개념

해상폐기물매립장에는 침출수가 매립지 바깥 해역으로 누출될 위험을 가지고 있고 침출수는 폐기물로부터 발생된 오염물을 포함하고 있다. 그래서 침출수가 해역으로 누출되지 않도록 해상폐기물매립장에는 차수공이 설치되어야 하며, 차수공은 주변 환경의 보호에 매우 중요한 역할을 담당한다(Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center, 2008; Hwang et al., 2018). 해상폐기물매립장의 침출수 누출 및 오염물의 거동은 침투뿐만 아니라 이류 및 분산 현상을 동반한다. 따라서 해상폐기물매립장의 차수공을 대상으로 한 수치해석은 침투와 이류 및 분산 현상을 고려해야 하고

이를 평가한 적절한 차수기준 제안이 필요하다(Hwang et al., 2018).

침투는 동수구배에 의해 물이 지반 내 간극을 통해 이동하는 현상으로 전수두가 높은 곳에서 낮은 곳으로 발생하는 물의 이동이다. 물에 녹은 오염물이 물과 함께 이동하는 현상은 이류이다. 즉 이류는 침투와 함께 발생된다. 분산에 의한 오염물 이동은 유속의 불균질성에 의하여 오염물이 퍼져 나가는 현상이다. 침투와 이류 및 분산은 복합적으로 발생하는 현상으로 Fig. 1은 지하수의 흐름과 시간에 따른 침투 이류 분산을 같이 나타낸 것으로 시간의 경과에 따라 오염의 이동과 분산을 보여준다. 차수 부분의 투수성이 낮아 침투유속이 느린 경우 분산의 영향이 상대적으로 크고 반면 투수성이 높은 경우에는 이류의 영향이 상대적으로 큰 영향을 미친다(Devlin and Parker, 1996; Neville and Andrews, 2006).

3. 침투·이류 분산 해석에 의한 차수시스템의 차수성능 평가

3.1 해석프로그램

본 해석에서는 캐나다 Geo-Slope사에서 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W 및 CTRAN/W를 사용하였다. SEEP/W 및 CTRAN/W는 범용 지반 유한요소 해석모듈이다. SEEP/W는 흙과 같은 다공질 지반 내의 지하수 침투흐름과 과잉간극수압의 소산문제를 해석하기 위한 프로그램으로 정상상태해석(steady-state analysis) 및 비정상상태해석(unsteady-state analysis)을 수행할 수 있다. 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/W

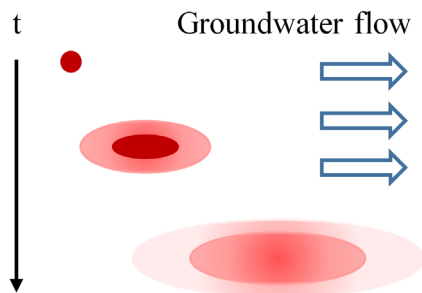


Fig. 1. Conceptual diagram of pollutant dispersion (Hwang et al., 2018)

는 간극수 내에 녹아있는 오염물의 이동을 계산하기 위하여 SEEP/W로부터 계산된 지반내 유속장을 이용한다 (Hwang et al., 2018).

SEEP/W에 이용된 간극수 흐름 및 간극수압 분포에 대한 지배방정식은 식 (1)과 같다(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[LT^{-1}], k_y 는 연직방향 투수계수[LT^{-1}], Q 는 단위체적, 단위시간당 소스항[T^{-1}], θ 는 체적함수비[-], t 는 시간[T]를 나타낸다.

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

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

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

식 (2)의 우변 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. 좌변은 오염물의 농도 변화에 따른 유체 및 흡입자 내에 저장된 오염물의 양을 나타낸다.

3.2 해석 모델

해상폐기물매립장의 바닥 및 연직 차수시스템의 요구 기준을 제시하기 위하여 Fig. 2와 같이 이중벽체(외곽벽체(steel pipe sheet pile, non barrier)는 강관쉬트파일로 외력에 대한 매립장의 안정성을 담당하고 내부벽체(vertical barrier)은 오염원의 차수를 담당하는 차수벽체로 가정)에 대해 2차원 해석을 수행하였다. 해석단면은 일본의 사례를 참조하여 선정하였다(Kwon et al., 2012). 지반조건은 하부지반이 바닥차수성능을 갖는 불투수 점토층(impermeable clay layer)이 존재하는 조건으로 가정하여 침투 및 오염물 이동특성을 검토하였다.

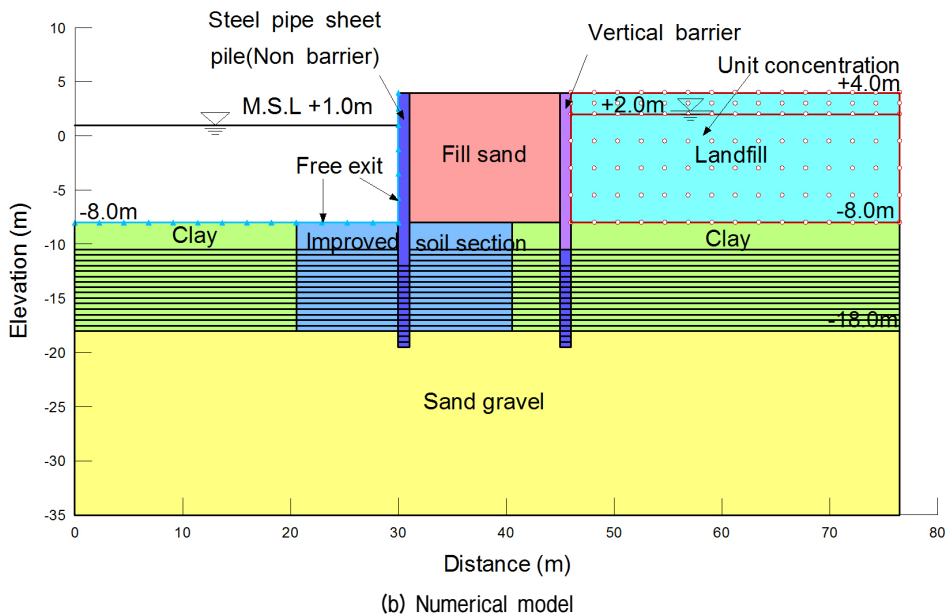
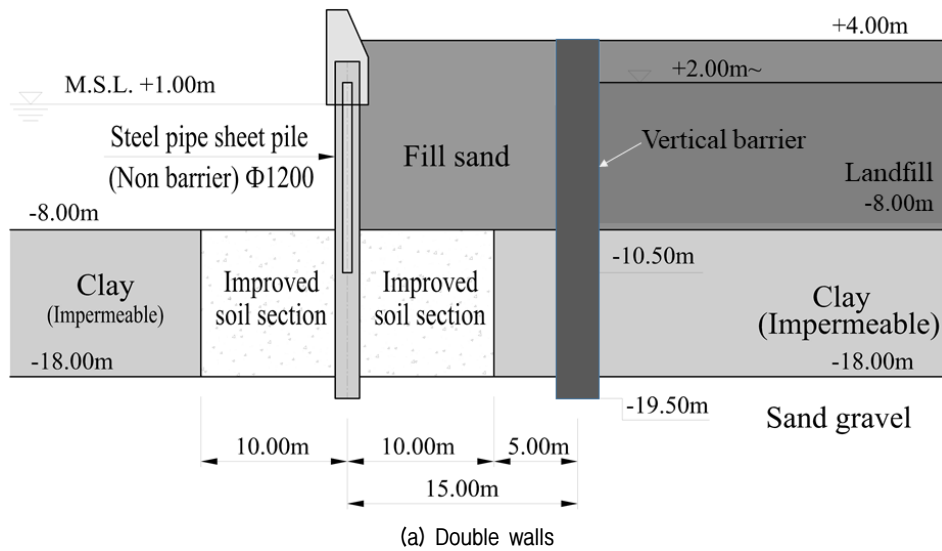


Fig. 2. Cross section and soil condition of double walls system with clay (impermeable) layer

3.3 해석 조건 및 물성치

1) 정상류

이중벽체식 매립장의 침투·이류 분산 해석에 이용된 각 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 이러한 재료 물성치는 해상폐기물매립장에 대하여 Kwon et al.(2012)이 제시한 값을 반영하였다. 분자 확산계수는 점토의 경우 $6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, 지반내 무기화합물질은 $8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s} \sim 6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 정도의 값이 타당하다. 침투·이류 분산 해석을 이용한 해상 폐기물처리장의 유해물질 누출 평가에 관한 Kwon et al.(2012)의 연구에서는 각 지층의 분자 확산계수는 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 를 이용하였다. 그 외 해

석에서는 단위 계산간격은 0.1년, 분석기간은 50년으로 하고 데이터는 1년마다 저장하였다. 일반적으로 해상폐기물매립장에서는 내부수위를 해역 수위보다 낮게 관리하도록 하는데 본 해석에서는 폐기물장과 해역의 수 두 차이(100cm)를 두어 불리한 경우로 가정하였다. 유해물질 상대농도는 폐기물층의 경우 $C = 1.0$, 해역은 $C = 0$ 으로 자유 유출경계로 하였다.

이중벽체식 매립장에서의 바닥 차수시스템과 연직 차수시스템의 차수성능 평가를 위한 매개변수 해석을 위하여 이용된 해석 조건은 Tables 2~4와 같다. Table 2는 바닥 차수시스템의 두께 및 투수계수에 대한 최적의 기준을 도출하기 위한 해석조건이다. Table 3은 연직 차

Table 1. Material properties used in seepage-advection-dispersion analysis

Item	Double walls		Fill sand	Landfill	Clay (Impermeable)	Improved soil section	Sand gravel
	Vertical barrier	Steel pipe sheet pile (Non barrier)					
Horizontal hydraulic conductivity k_h (cm/s)	Value	1×10^{-1}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	Value	5×10^{-4}	1×10^{-1}
Vertical hydraulic conductivity k_v (cm/s)	Value	1×10^{-8}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	Value	5×10^{-4}	1×10^{-1}
Porosity n (-)	0.2	0.2	0.3	0.7	0.2	0.3	0.4
Longitudinal dispersivity α_L (cm)	100	100	100	100	100	100	100
Transverse dispersivity α_T (cm)	10	10	10	10	10	10	10
Coefficient of molecular diffusion D^* (m ² /sec)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	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}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

※ Value is parameter (see details Tables 2 ~ 4)

Table 2. Parametric analysis cases with different hydraulic conductivities and thicknesses of clay (impermeable) layer

Embedded depth of vertical barrier in clay (impermeable) layer for preventing leakage (cm)	Hydraulic conductivity of clay (impermeable) layer, k (cm/s)			Thickness of clay (impermeable) layer (cm)
250	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	250
				300
				350
				400
				450
				500
				550
				600
				650
				700
				750
				800
900				
1000				

Table 3. Parametric analysis cases with different hydraulic conductivities and thicknesses of vertical barrier

Embedded depth of vertical barrier in clay(impermeable) layer for preventing leakage (cm)	Hydraulic conductivity of vertical barrier, 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 with different hydraulic conductivities of clay (impermeable) layer and embedded depth of vertical barrier

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

수시스템 두께와 투수계수 및 근입깊이에 대한 최적의 기준을 도출하기 위한 해석이다. Table 4는 연직 차수시스템 근입깊이에 대한 최적의 기준을 도출하기 위한 해석이다. 이를 위하여 바닥 차수시스템의 투수계수를 1×10^{-6} cm/s, 두께를 500cm로 연직 차수시스템의 두께를 100cm로 고정하였다. 이와 같이 설정한 이유는 연직 차수시스템으로는 오염원 누출의 없다는 가정 하에 오직 연직 차수시스템의 근입깊이에 대하여 요구되는 차수성능을 알아보기 위해서이다.

2) 비정상류

바다와 접한 한국의 경우 조위차는 서해 9.0m내외, 남해 2.6m내외, 동해 0.4m내외로 지역별로 편차가 매우 크게 나타난다(Oh et al., 2012). 본 연구에서는 남해를 대상으로 조석에 의한 해역의 조위 변동이 2.0m인 경우에 대해 해석하였다(Fig. 3). 최종처리장 내부는 관리 수위로 평균수위와 동일한 것으로 가정한다. 해석 시간의 어려움으로 단위 계산간격은 초기 5일은 1시간 간격으로 하고, 이후에는 3시간 간격으로 총 360일(1년) 동안 해석만을 수행한다. 해석 결과는 동일기간의 정상류 해석 결과와 비교 분석되어 차수기준 선정에 이용한다. 이외 해석 모델 및 나머지 해석 조건은 앞의 정상류 해석 조건과 동일하다.

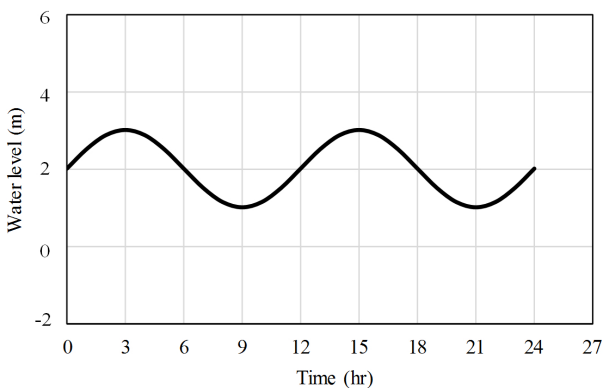


Fig. 3. Hypothetical sinusoidal tide level with tidal range of 2 m

4. 해석 결과 및 분석

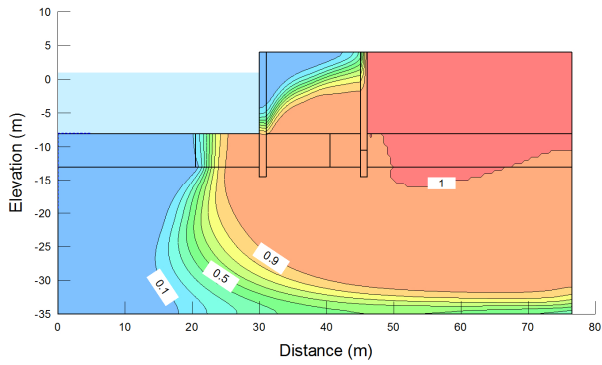
4.1 정상류해석

4.1.1 바닥 차수시스템의 투수계수, 두께 기준

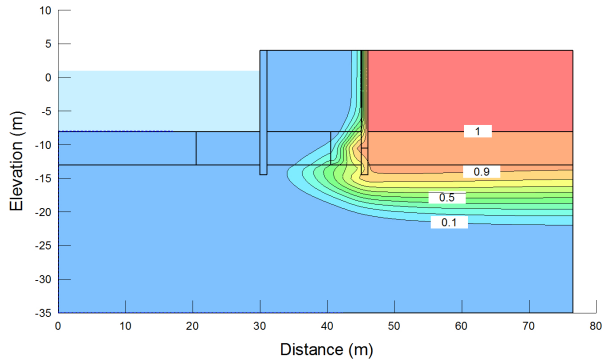
이중벽체식 해상폐기물매립장의 바닥 차수를 위한 바닥 차수시스템(impermeable clay layer)의 두께 및 투수계수에 대한 최적의 기준을 도출하기 위하여 연직 차수시스템(vertical barrier)의 근입깊이와 투수계수를 각각 250cm 및 1×10^{-11} cm/s로 고정하고 세 가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s에 대해 바닥 차수시스템의 두께를 변화시켜 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 세 가지 투수계수에 대한 바닥두께 500cm인 경우에 대하여 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타내었다. 투수계수 1×10^{-6} cm/s의 경우 1×10^{-5} cm/s에 비해 이동범위가 매우 좁아진 것을 알 수 있다. 투수계수 1×10^{-7} cm/s의 경우 이동범위가 매우 작아 오염물 이동 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

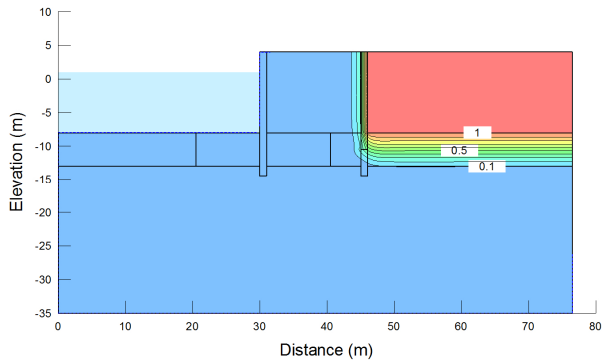
Fig. 5는 각각 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-6} cm/s에 대한 바닥 두께 변화에 따른 50년 경과 후 누적누출량을 막대그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5에서 TC는 바닥 차수시스템의 두께를 k는 투수계수를 ED는 연직 차수시스템의 근입깊이를 각각 나타낸다. 투수계수 1×10^{-6} cm/s인 경우 두께 변화에 따른 누적누출량은 0.0002g ~ 6.7g 이다. 참고로 투수계수 1×10^{-5} cm/s인 경우는 134g ~ 1237g이고 투수계수 1×10^{-7} cm/s인 경우는 1.1E-13g ~ 3.4E-11g으로 계산되었다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 각각 약 98.8% 및 99.9% 감소하였다. 투수계수가 1×10^{-6} cm/s에서 1×10^{-7} cm/s로 작아진 경우 약 1%의 누출량만 추가적으로 감소하여 상대적으로 효과가 작게 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 4의 결과로부터도 예측 가능한 결과이다. 이상의 해석 결과로부터 바닥 차수시스템으로 점토지반의 투수계수 요구기준은 1×10^{-6} cm/s가 가장 합리적일 것으로 보인다.



(a) Hydraulic conductivity : 1×10^{-5} cm/s



(b) Hydraulic conductivity : 1×10^{-6} cm/s



(c) Hydraulic conductivity : 1×10^{-7} cm/s

Fig. 4. Predicted concentration contours after 50 years with three hydraulic conductivities on the clay (impermeable) layer with thicknesses of 500 cm

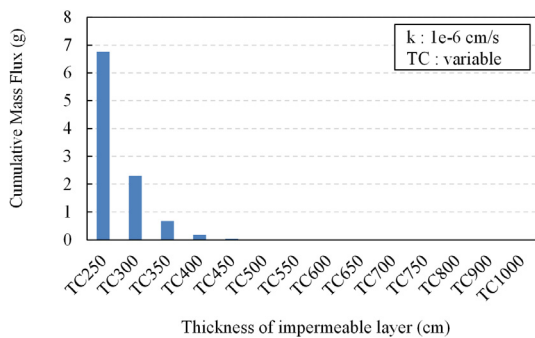


Fig. 5. Required hydraulic conductivity of bottom layer based on cumulative mass flux during 50 years with different clay (impermeable) layer thicknesses and hydraulic conductivity 1×10^{-6} cm/s

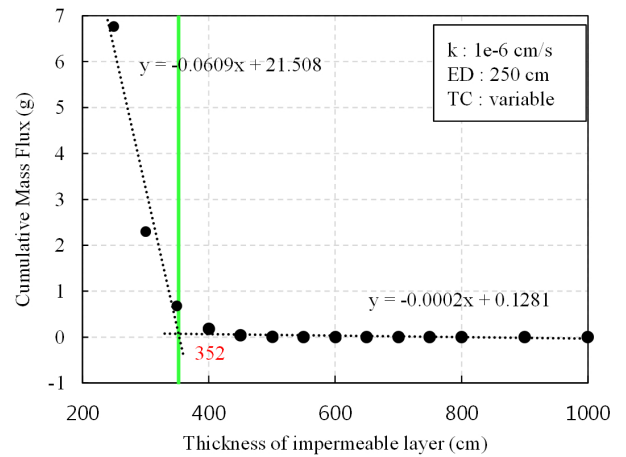


Fig. 6. Required thickness of bottom layer based on cumulative mass flux during 50 years with different clay (impermeable) layer thicknesses and hydraulic conductivity 1×10^{-6} cm/s

Fig. 6은 바닥차수층 투수계수 1×10^{-6} cm/s에 대한 바닥 차수층의 두께에 따른 50년경과 후 누적누출량을 나타낸 것이다. 앞 에서 산정된 최적의 투수계수 최소기준인 1×10^{-6} cm/s를 고려하면 이에 대한 최적의 두께는 352cm 이다. 최적 두께는 누적누출량의 변화율이 급격하게 줄어드는 부분(그림에서 두 직선의 접선 점)을 최적두께로 결정하였다. 다만 이 결과는 해석 조건에서 볼 수 있는 바와 같이 바닥점토지반이 균질하다는 전제 조건에서 산정된 값이므로 실제 적용 시에는 현장 지반조건에 따라 두께를 산정하는 것이 필요하다.

4.1.2 연직 차수시스템의 투수계수, 두께, 근입깊이 기준

이중 강관벽체식 해상폐기물매립장의 측면 차수를 위한 연직 차수시스템(vertical barrier) 두께와 근입깊이에 대한 최적의 기준을 도출하기 위하여 투수계수와 두께를 변화시켜 오염물질 누출량을 검토하였다. 검토를 위한 전체조건으로 앞 절 4.1.1에서 산정한 바닥차수시스템(clay layer)의 두께 500cm, 투수계수 1×10^{-6} cm/s를 적용하였다. 그리고 연직 차수시스템의 세 가지 투수계수 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} cm/s를 적용하고 두께는 총 여덟 가지 경우(10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200cm)에 대하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다(Table 3).

Fig. 7은 연직 차수시스템의 투수계수(1×10^{-6} cm/s)에 대한 두께 변화에 따른 50년 경과 후 누적누출량 결과이다. 그림에서 TW는 연직 차수시스템의 두께, k는 연직 차수시스템의 투수계수를 나타낸다. 투수계수 1×10^{-6} cm/s인 경우 두께 변화에 따른 누적누출량은 35g~1,582g

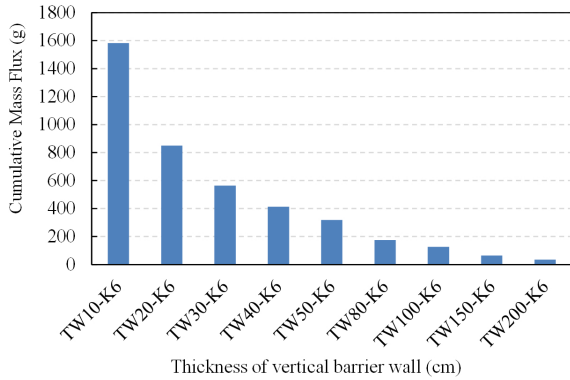


Fig. 7. Required hydraulic conductivity of vertical inner barrier based on cumulative mass flux during 50 years with different vertical barrier thicknesses and hydraulic conductivity 1×10^{-6} cm/s

이다. 참고로 투수계수 1×10^{-5} cm/s인 경우는 840g~5398g 이고 투수계수 1×10^{-7} cm/s인 경우는 0.01g~131g으로 계산되었다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s를 기준으로 1×10^{-6} cm/s 및 1×10^{-7} cm/s일 때 평균적으로 각각 약 87% 및 99%로 감소하였다. 투수계수가 1×10^{-6} cm/s에서 1×10^{-7} cm/s로 작아진 경우 약 12%의 누출량이 추가적으로 감소하여 그 효과가 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 위 결과로부터 연직 차수시스템의 투수계수에 대한 최적의 최소기준은 1×10^{-6} cm/s가 합리적일 것으로 판단된다. 이것은 우연이지만 바닥차수시스템의 투수계수 기준과도 일치하는 값이다.

Fig. 8은 연직 차수시스템의 투수계수 1×10^{-6} 에 대한 연직 차수시스템의 두께 변화에 따른 50년경과 후 누적 누출량을 나타낸다. 앞서 산정된 투수계수 기준 1×10^{-6} cm/s에 대한 최적의 두께는 41cm로 나타났다. 최적 두

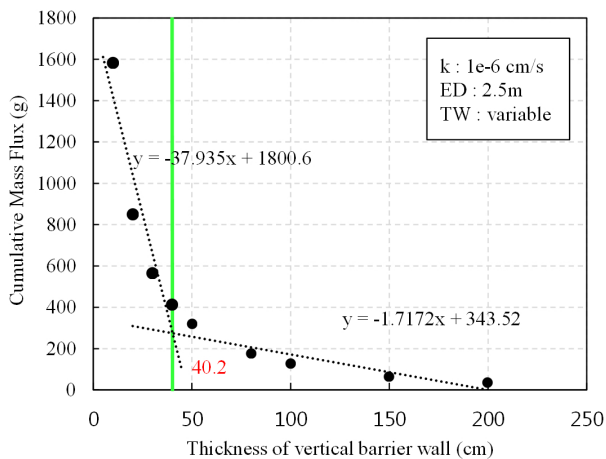


Fig. 8. Required thickness of vertical inner barrier based on cumulative mass flux during 50 years with different vertical barrier thicknesses and hydraulic conductivity 1×10^{-6} cm/s

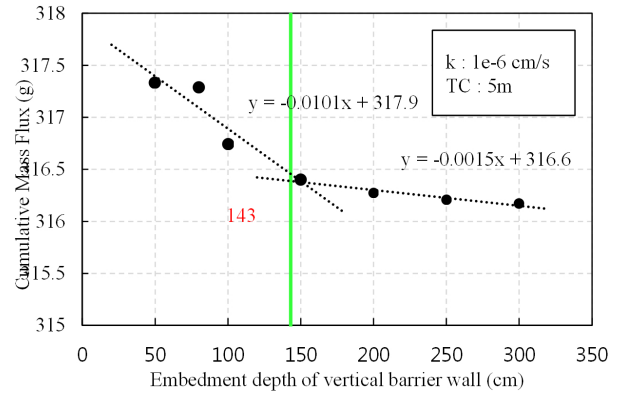


Fig. 9. Required embedded depth of vertical inner barrier based on cumulative mass flux during 50 years with different embedment depth of vertical inner barrier and hydraulic conductivities of bottom layer

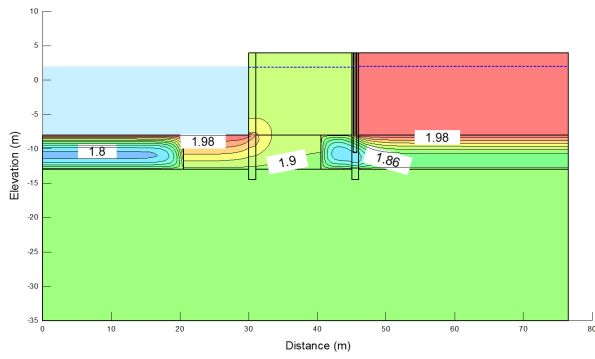
께는 누적누출량의 변화율이 급격하게 줄어드는 부분 (그림에서 두 직선의 접선 점)을 최적두께로 결정하였다. 다만 이 결과는 해석 조건에서 볼 수 있는 바와 같이 지반이 균질하고 연직 차수시스템의 시공에 문제가 없다는 전제 조건에서 산정된 값이므로 실제 적용시에는 현장 지반조건과 연직 차수시스템의 시공정도를 고려하여 두께를 산정하는 것이 필요하다.

Fig. 9는 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-6} cm/s에 대한 근입깊이에 따른 50년 경과 후의 누적누출량을 나타낸다. 그림에서처럼 투수계수의 기준인 1×10^{-6} cm/s에 대응하여 143cm가 합리적 깊이로 판단된다. 다만 이것은 해석 조건에서 볼 수 있는 바와 같이 지반이 균질하고 연직 차수시스템의 시공에 문제가 없다는 전제 조건에서 산정된 값이므로 실제 적용시에는 현장 지반조건과 연직 차수시스템의 시공 정도를 고려하여 근입깊이를 정하는 것이 필요하다.

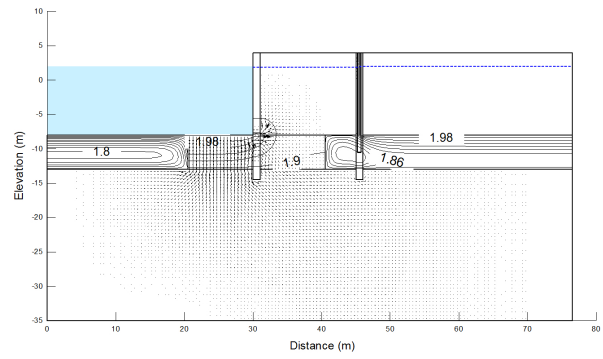
4.2 비정상류 해석

4.2.1 전수두 및 유속벡터

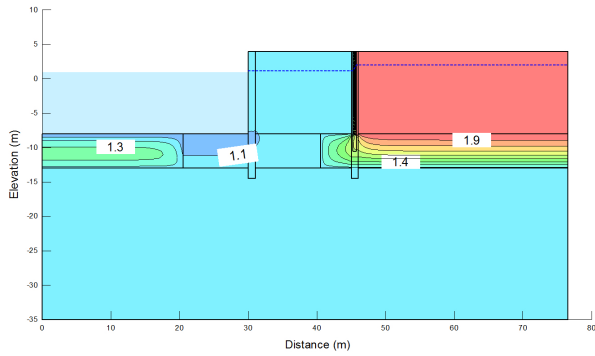
Fig. 10은 조석에 따른 수위변동을 고려한 비정상류 조건 하에서의 전수두 및 간극수의 유속벡터이다. 해역 수위 변동에 따라 지반내 간극수 흐름이 시간에 따라 크기 및 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 해역의 수위와 최종처리장의 관리수위의 차이가 크면 더 큰 전수두 및 간극수의 유속벡터가 발생할 것으로 예상된다. 해역 수위가 처리장 관리수위보다 높은 경우 해역에서 최종처리장 내부로의 간극수 흐름이 발생하는데 이 경우 처리장 내 오염원 유출 문제는 없을 것으로 판단된다.



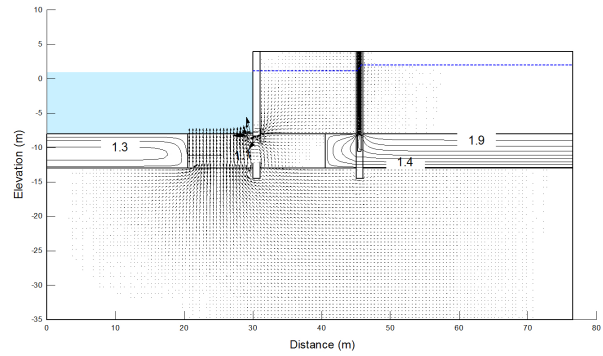
(a) 364days Total head



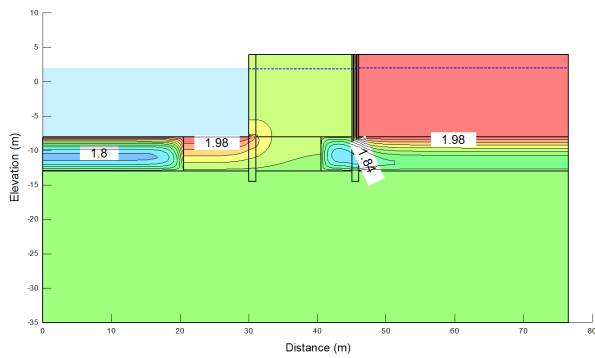
(a) 364days Flow vector



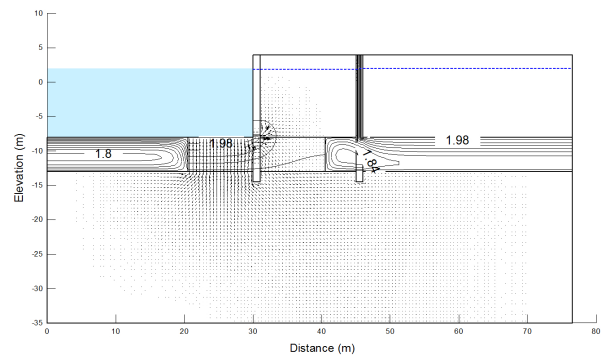
(b) 364.375days Total head



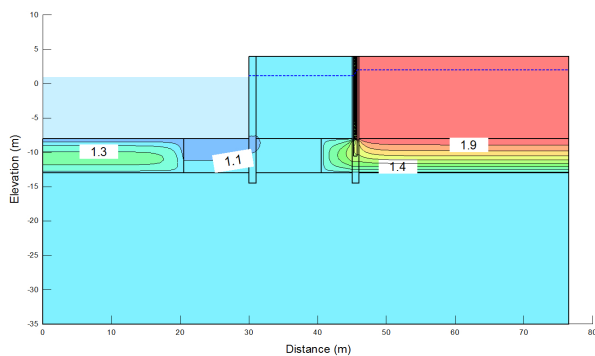
(b) 364.375days Flow vector



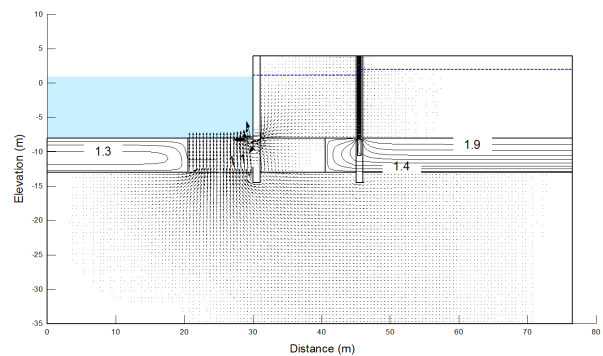
(c) 364.5days Total head



(c) 364.5days Flow vector



(d) 364.875days Total head



(d) 364.875days Flow vector

Fig. 10. Predicted total head and flow velocity vector under unsteady flow in double walls system in case of maximal tidal range of 2 m

4.2.2 오염물 농도 변화

Fig. 11은 연직 내부차수시스템에서 폐기물 지층의 방향으로 약 1m 떨어진 바닥 차수시스템 상부 표면 부근

에서의 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타내기 위한 각 노드의 위치를 나타낸다. 각 노드 A, B, C, D는 상부에서 하부로 순서대로 상부가 A 하부가 D를 나타낸다.

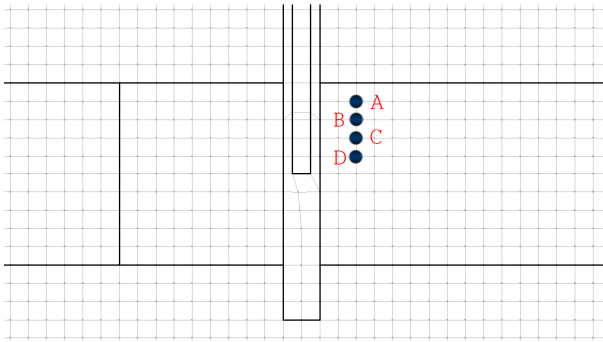
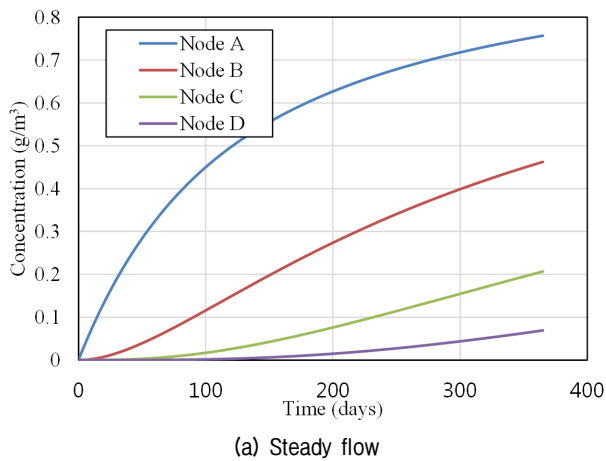
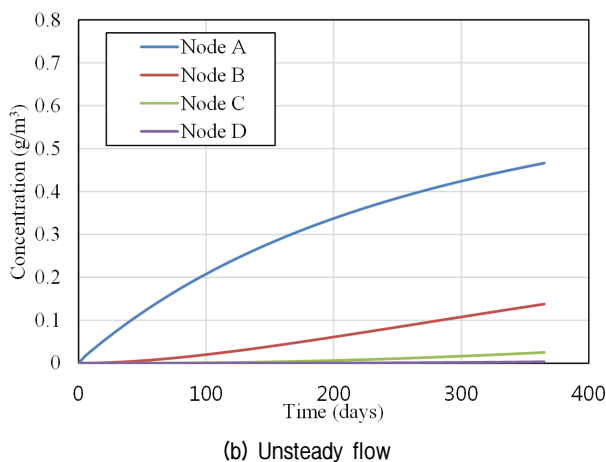


Fig. 11. Four monitoring nodes to present time history graph of contaminant concentration

Fig. 12(b)는 조위차 2m일 경우를 고려한 비정상류 조건 하에서의 각 노드별 시간에 따른 오염물 농도 변화를 나타낸 것이다. 비교를 위해 동일 기간 동안 정상류 조건에서 해석된 결과(Fig. 12(a))도 같이 도시하였다. 해석된 정상류에서처럼 수위 변동을 고려한 비정상류 조건보다 정상류 조건 하에서 오염물의 농도가 증가하



(a) Steady flow



(b) Unsteady flow

Fig. 12. Time history of contaminant concentration at four monitoring nodes under steady and unsteady flows considering maximal tidal range of 2 m

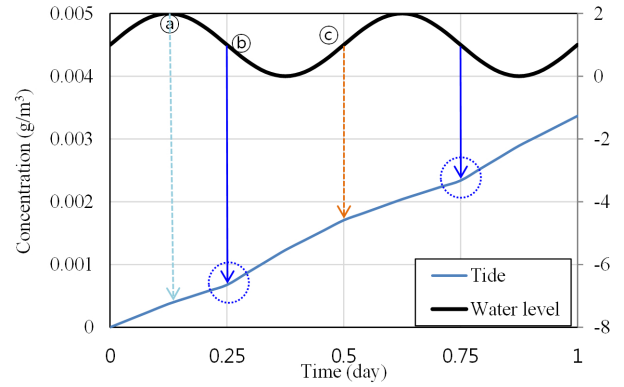
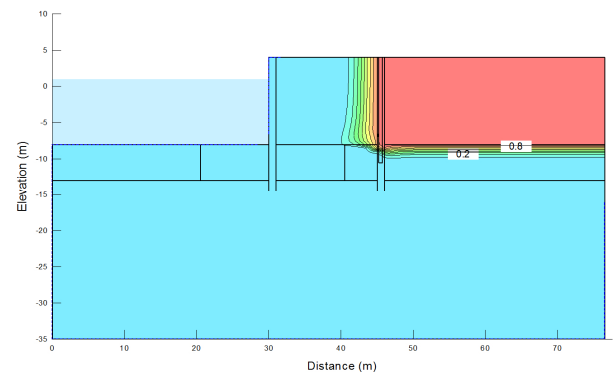


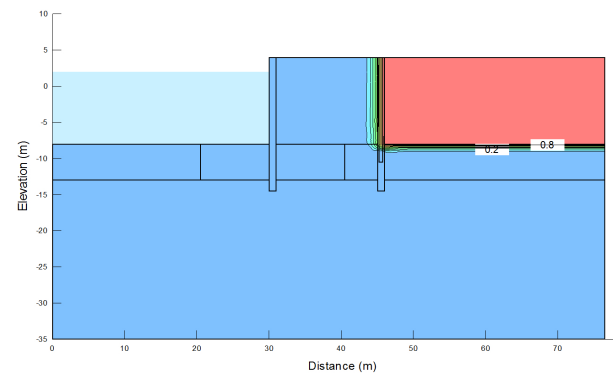
Fig. 13. Comparison of time history of contaminant concentration between steady and transient flow during initial 1 day at Node A in case of tidal range of 2 m

는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 오염물 농도 증가량 변동이 큰 초기 1.0일 기간만 확대하여 정상류 및 비정상류 조건을 비교하였다. ①는 고조위, ②는 고조위에서 저조위로 수위가 내려갈 때, ③의 경우 저조위에서 고조위로 수위가 상승하는 점이다. 정상류 상태에서는 변동없이 동일한 기울기로 증가하나, 비정상류 상태에서는 조수차이에 따라 오염물 농도 분산이 더디게 나타나는 구간이 발생하는데,



(a) Steady flow



(b) Unsteady flow

Fig. 14. Contour plots of contaminant concentration after 1 year in case of tidal range of 2 m

더디게 나타나는 구간은 ㉞점으로 고조위에서 저조위로 수위가 하강할 때이며, 저조위에서 고조위로 수위가 상승할 때(㉟ 상태)는 오염물 농도 분산이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 정상류 상태와 비정상류 상태에서 1년간 오염물 이동을 나타낸 것으로 정상류 상태에 오염물 이동이 많다는 것을 알 수 있다. 이것은 Rubin and Rabideau (2000)과 Foose(2010)의 연구 결과와 일치하는 것으로 일반적으로 정상류상태를 가정한 차수시스템의 성능 평가는 보수적이다. 이것은 예상했던 결과이다. 더욱이 해상최종처리장내의 경우 관리수위를 일반적으로 해역의 평균 수위보다 낮게 유지하는 게 원칙이므로 실제 현장에서의 오염물 이동은 정상류 조건 하에서의 해석된 결과보다 훨씬 작게 발생할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 해상폐기물매립장에서의 오염물의 누출을 방지하는 차수시스템에 대한 기준을 제안하기 위하여 이중벽체식 매립장의 바다 및 연직 차수시스템에 대하여 침투·이류 분산 수치해석을 수행하였다. 해석은 정상류 및 비정상류(조석 2m)조건 하에서 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 기준을 도출하였다.

- (1) 조석에 따른 수위변동을 고려한 비정상류 조건 하에서의 전수두, 간극수의 유속벡터가 시간에 따라 크기 및 방향이 바뀌고 오염원 분산 농도가 변화되는 것을 볼 수 있었다.
- (2) 정상류 조건 하에서 차수시스템의 차수성능을 평가하는 것이 비정상류 조건 보다 오염원 이동이 큰 것으로 나타나 정상류 조건에서 산정된 기준을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
- (3) 정상류 및 바닥 지반이 균질하다는 조건하에, 바닥 차수시스템(점토층)의 차수성능을 확보하기 위하여 최소한 요구되는 투수계수와 두께는 각각 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, 352cm로 산출되었다.
- (4) 바닥차수시스템(점토층)의 두께를 500cm, 투수계수를 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로 하고 연직 차수시스템의 시공에 문제다 없다는 전제하에, 연직 차수시스템의 차수성능을 확보하기 위해 필요한 최소한의 투수계수, 두께, 근입깊이는 각각 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, 41cm, 143cm로 산출되었다.

참고문헌 (References)

1. Devlin, J.F. and Parker, B.L. (1996), Optimum hydraulic conductivity to limit contaminant flux through cutoff walls, *Groundwater*, Vol.34, No.4, pp.719-726.
2. Environmental Protection Agency of Singapore (2016), <http://www.nea.gov.sg/corporate-functions/contact-nea/semakau-landfill>
3. 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.
4. GEO-SLOPE (2012a), Seepage modeling with SEEP/W. GEO-SLOPE International Ltd.
5. GEO-SLOPE (2012b), Contaminant modeling with CTRAN/W. GEO-SLOPE International Ltd.
6. Hwang, W.K., Oh, M.H., Kim, T.H., and Kim, H.E. (2018), Evaluation of optimal performance of hydraulic barriers in offshore landfill using seepage-advection-dispersion analysis under steady state flow, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.30, No.2, pp.61-68.
7. Kwon, O., Oh, M., and Chae, K.S. (2012), Guidelines for the design, construction, and management of managed wastes reclaimed embankment, CIR publishing.
8. Ministry of Environment of Korea (2016), Wastes control act: Enforcement regulations, *Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.30, No.2, pp.61-68.
9. 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.
10. Neville, C.J. and Andrews, C.B. (2006), Containment criterion for contaminant isolation by cutoff Walls, *Groundwater*, Vol.44, No.5, pp.682-686.
11. Oh, M.H., Kwon, O.S., Kim, G.H., and Chae, K.S. (2012), Introduction on offshore waste landfill and potential sites, *Journal of the Korean Civil Engineering Society*, Vol.160, No.11, pp.40-48.
12. Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center (2018), Osaka Bay Phoenix Project, Osaka : Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center.
13. Park, H.Y., Oh, M.H., and Kwon, O.S. (2016), Analysis on contaminant transport according to the embedded depth of vertical barrier of offshore landfill, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.78, No.9, pp.29-37.
14. Rubin, H. and Rabideau, A.J. (2000), Approximate evaluation of contaminant transport through vertical barriers, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.40, No.4, pp.311-333.
15. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Second Edition, John Wiley and Sons, 1967.
16. USACE (2003), *Engineering and Design*, Doc No. EM 1110-2-1902, 2003.

Received : April 26th, 2019

Revised : August 26th, 2019

Accepted : August 26th, 2019