한국지반신소재학회논문집 제18권 4호 2019년 12월 pp. 97 ~ 106
J. Korean Geosynthetics Society Vol.18 No.4 December 2019 pp. 97 ~ 106
DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2019.18.4.097
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

정상류 조건에서 경사식호안 해상폐기물매립장의 차수에 대한 침투이류 분산해석

Seepage-Advection-Dispersion Numerical Analysis of Barrier System of Offshore Rubble Mound Revetment Landfill Under Steady Flow

황웅기[1], 김향은[2], 김태형[3]*
Woong-Ki Hwang[1], Hyang-Eun Kim[2], Tae-Hyung Kim[3]*

[1]*Nonmember, Manager, Geo R&D Co., Ltd., 60 Centum jungang-ro, Haeundae-gu, Busan 48059, Republic of Korea*
[2]*Nonmember, Director, Geo R&D Co., Ltd., 60 Centum jungang-ro, Haeundae-gu, Busan 48059, Republic of Korea*
[3]*Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejoung-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea*

ABSTRACT

This study was conducted to propose a reasonable requirement regulation of barrier system of rubble mound revetment offshore landfill for preventing contaminant leakage. The barrier is composed with bottom layer and side barrier. The bottom layer was assumed as impermeable clay layer and side barrier was composed with HDPE sheet (primary element) and mid-protection layer (supplementary element). Seepage-advection-dispersion numerical analysis has been conducted using SEEP/W and CTRAN/W programs under steady flow. As the results, the minimum required barrier regulations for hydraulic conductivity and thickness of the bottom layer were suggested. For side barrier, the extended length of HDPE sheet and the hydraulic conductivity of mid-protection layer were also suggested.

요 지

본 연구는 오염원 유출을 방지하기 위한 경사식호안 해상폐기물매립장 차수시스템에 요구되는 적절한 기준을 제안하기 위하여 해석을 수행하였다. 차수시스템은 바닥과 측면으로 구성하였다. 바닥차수시스템은 불투수 점토층이 측면차수시스템은 HDPE 차수시트가 주 역할을 하고 부수적으로 중간보호층이 차수를 담당한다. SEEP/W와 CTRAN/W 프로그램을 이용하여 침투·이류 분산 해석을 실시하였다. 해석결과, 바닥차수시스템인 점토층에 대하여 요구되는 투수계수와 두께가 제안되었다. 측면차수시스템인 HDPE 차수시트에 대해서는 설치길이와 중간보호층에 대해서는 요구되는 투수계수가 제안되었다.

Keywords **:** Offshore landfill, Barrier system, Bottom layer, HDPE sheet, Steady flow

1. 서 론

해상폐기물매립장은 일반적으로 항만 지역에 건립하는 대규모 폐기물매립장을 말하며, 국내에서는 광양항과 진해에 해상폐기물매립장 건설 사례가 있고, 국외의 경우 싱가포르, 특히 일본에서 건설사례가 많다. 광양항의 경우와 외국의 해상폐기물매립장과 비교하면 자연적인 바닥시스템이 아니라 인위적시스템을 적용하였다는 것이 가장 다른 차이점이다. 해상 폐기물매립장은 연안에 건설되기 때문에 기존의 폐기물매립장인 육상 폐기물매립장과는 다른 특징을 가진다. 우선, 육상 폐기물매립장에 비해 매립장의 면적이 매우 크기 때문에 대량의 폐기물을 수용할 수 있을 뿐만 아니라 지하수와 같은 수원을 오염시킬 위험이 낮다 (Ministry of Environment of Korea, 2016).

폐기물매립장은 폐기물의 보관·처리, 주위 환경 보전, 토지의 지역 환원 등의 역할 기능이 있다. 해상폐기물매립

Received *28 Aug. 2019,* ***Revised*** *21 Nov. 2019,* ***Accepted*** *25 Nov. 2019*
****Corresponding author***
Tel: +82-51-410-4465; Fax: +82-51-410-4460
E-mail address: kth67399@kmou.ac.kr (T. H Kim)

장의 원활한 역할을 위해서는 매립 호안, 차수공, 보유수 등 관리 설비, 모니터링 설비, 기타 관련 설비가 필요하다. 그리고 해상 폐기물매립장은 바다 특유의 외적 조건이 복잡하고 다양하기 때문에 관리형 폐기물매립장이 일반적으로 이용되고 있다(Kwon et al., 2012; Oh et al., 2012). 관리형 폐기물매립장에서는 환경을 오염시킬 가능성이 있는 폐기물을 매립하기 때문에 차수성의 신뢰성 확보는 가장 중요한 검토 항목이다(Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center, 2018; Hwang et al., 2018). 육상 폐기물매립장에서는 차수공에 누수 검지 시스템을 부가함으로써 신뢰성 향상을 도모하고 있는 반면 해상 폐기물매립장에서는 보유수의 수위 관리에 의해서 폐기물매립장 내외의 수위차를 조절함으로써 신뢰성 향상을 도모하고 있다(Fig. 1).

폐기물매립장 내의 보유수는 폐기물 내의 물뿐만 아니라, 매립 이전부터 매립장에 잔류하고 있는 해수와 우수 그리고 월파된 해수 등으로 구성된다. 좀 더 구체적으로 Fig. 1을 보면, 해상폐기물매립장의 폐기물층이 보유수 등수위면 이하의 보유수 등으로 채워진 체수영역과 보유수 등수위면 이상의 비체수영역으로 나눠진다. 이런 해상패기물매립장의 특징을 고려하면 차수성능의 확보가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 4개 형태의 호안 즉, 경사식호안, 중력식 케이슨 호안, 강관시트파일, 셀식 등이 해상폐기물매립장으로 건설되고 있는데 적용되는 차수방법은 서로 다르다(Park et al., 2016). 경사식호안의 경우 사석을 사용하여 비교적 경제적으로 시공이 가능하지만, 사석 마운드의 투수성을 확보하기 위하여 2중 차수시트(HDPE sheet)를 측면차수에 적용하는 것이 필수적이다. Oh et al.(2016)는 차수관련 경사식호안 해상폐기물매립장의 차수시트 설치 길이에 따른 침투거동을 정상류 조건에서 분석하였다. 연구결과 차수시트를 호안 사면끝단으로부터 점토층 상부면으로 1m 이상 연장하여 설치하여야 침투방지에 효과가 있다고 제시하였다. 하지만 경사식호안 형태의 해상폐기물매립장의 침투뿐만 아니라 이류 분산을 고려한 오염물질 이동특성에 대해서는 아직까지 구체적인 연구가 수행된 바가 없다(Oh et al., 2016).

본 연구는 Oh et al.(2016)연구의 연장으로 침투뿐만 아니라 이류 분산을 고려한 해석을 정상류 조건에서 수행하였다. 또한 차수시트의 설치길이 외 바닥차수시스템인 점토층에 요구되는 투수계수와 두께, 그리고 차수시트의 손상을 고려한 부수적인 측면차수스템인 중간보호층에 요구되는 투수계수에 대하여 검토하였다. 흐름으로 인한 오염물 이동 및 농도 분포를 수식적으로 예측하는 것은 어려워(Foose, 2010) 수치해석적인 방법을 이용하였다. 본 연구의 범위에서 지진, 해일 또는 파랑에 의한 해상폐기물매립장의 안정성과 조위 및 파랑에 의한 오염원 이동은 제외하였다. 또한 본 연구처럼 정상류 조건에서 차수성능 평가가 조위차를 고려한 비정상류 조건에서의 차수성능 평가보가 보수적일 것으로 판단되어 우선적으로 연구를 수행하였다.

2. 침투·이류 분산 개념

침투는 동수구배에 의해 물이 지반 내 간극을 통해 이동하는 현상으로 전수두가 높은 곳에서 낮은 곳으로 발생하는 물의 이동이다. 이류란 물에 녹은 오염물이 물과 함께 이동하는 현상이다. 즉 이류는 침투와 함께 발생된다. 분산에 의한 오염물 이동은 유속의 불균질성에 의하여 오염물이 퍼져 나가는 현상이다. 침투와 이류 및 분산은 복합적으로 발생되는 현상으로 Fig. 2은 지하수의 흐름과 시간에 따른 침투 이류 분산을 같이 나타낸 것으로 시간의 경과에 따라 오염의 이동과 분산을 보여준다. 차수 부분의 투수성이 높은 경우에는 이류의 영향이 상대적으로 크고, 투수성이 낮아 침투유속이 느린 경우 분산의 영향이 상대

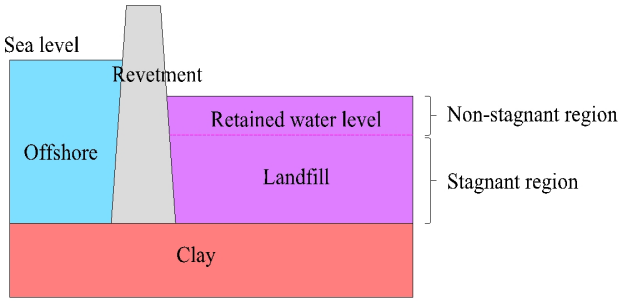


Fig. 1. Structural features of offshore waste landfill and retained water level

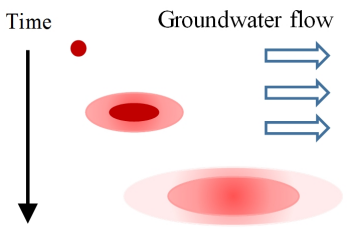


Fig. 2. Conceptual diagram of pollutant seepage, advection, and dispersion (Hwang et al., 2018)

적으로 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Devlin and Parker, 1996; Neville and Andrews, 2006).

3. 침투·이류 분산 해석에 의한 차수시스템의 차수 성능 평가

3.1 해석프로그램

본 해석에서는 캐나다 Geo-Slope사에서 개발한 범용유한요소해석 프로그램인 SEEP/W 및 CTRAN/W를 사용하였다. SEEP/W는 포화·불포화 상태의 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.

SEEP/W에 이용된 2차원 연속체로 가정한 포화·불포화 지반에서의 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, H는 전수두[L], k_x는 수평방향 투수계수[LT-1], k_y는 연직방향 투수계수[LT-1], Q는 단위체적, 단위시간당 소스항[T-1], θ는 체적함수비[-], t는 시간[T]을 각각 나타낸다.

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 이용하였다(Hwang et al., 2018). CTRAN/W에 이용된 지반내 오염물 이동에 대한 지배방정식은 식 (2)와 같다(GEO-SLOPE, 2012b).

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

여기서, θ는 체적함수비[-], C는 오염물의 농도[ML-3], ρ_d는 흙의 건조단위밀도[ML-3], S는 흡착비[-], t는 시간[T], D는 분자확산계수[L2T-1], U는 Darcy의 유속[LT-1], λ는 방사능 물질의 붕괴계수[T-1]를 각각 나타낸다.

식 (2)의 좌변은 오염물의 농도 변화에 따른 유체 및 흙입자 내에 저장된 오염물의 양을 나타낸다. 우변의 첫 번째 항은 분산에 의한 오염물 이동을, 두 번째 항은 이류에 의한 오염물 이동을, 세 번째 항과 네 번째 항은 각각 유체 및 흙입자 내에서 붕괴된 오염물의 질량손실을 각각 나타낸다.

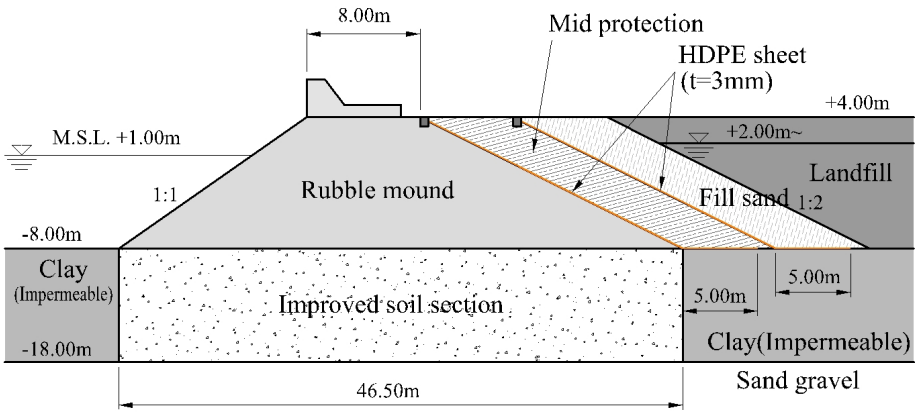
3.2 해석 모델

해석단면 Fig. 3(b)는 일본 다치바나만 해상폐기물매립장에 적용된 경사식호안 단면인 Fig. 3(a)를 참고하였다(Chae et al., 2011; Kwon et al., 2012; Oh et al., 2016). 검토단면으로 참고한 다치바나만 해상매립장은 경사식호안의 법면에 2중의 차수시트를 설치하고 각 시트 사이에 중간 보호층(Mid-protection layer)을 두어 차수시트의 손상을 최소화 시킨 사례이다.

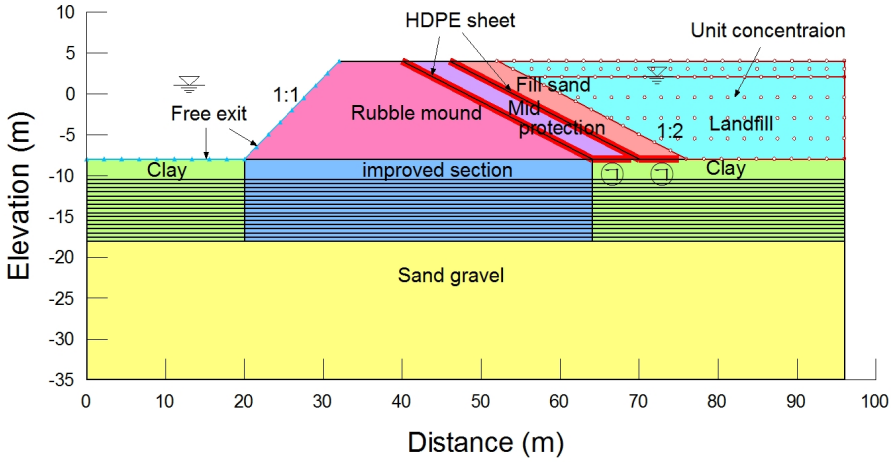
3.3 물성치 및 해석 조건

경사식호안 폐기물매립장 해석 모델의 침투·이류 분산 해석에 이용된 각 재료 물성치는 Table 1과 같다. 재료 물성치는 해상 폐기물매립장의 침투·이류 분산 해석에 대한 연구문헌에 제시된 값을 반영하였다(Kwon et al., 2012). 분자확산계수는 1.0×10^{-5}cm^2/s를 적용하였다. 유해물질의 상대농도는 폐기물층은 C = 1.0, 해역은 C = 0으로 자유유출경계로 한다. 건전한 차수시트의 투수계수는 1.6×10^{-11} cm/s로 하였다(Kwon et al., 2012). 중간보호층(Mid-protection)은 Back fill 영역으로 서로 다른 세 가지 투수계수를 적용하여 해석을 실시하였다. 단위 계산간격은 0.1년, 분석기간은 50년으로 하고 데이터는 1년마다 저장하였다. 그리고 해석은 정상류조건 하에서 수행하였고, 매립장의 보유수위가 해수면 보다 100cm 높게 하였다.

측면 차수시스템과 동일하게 바닥 차수시스템으로 해상 폐기물매립장의 특성을 고려한 기본적인 불투수성 해저 점성토 지반을 고려하고, 이에 대한 투수계수 및 지층두께에 대한 최소기준을 제시하기 위하여 각각의 조건을 변화시켜 해석을 수행하였다. 차수시트가 설치된 해상 폐기물매립장 호안에서 해저지반을 통한 침투 및 오염물질 이동특성에 대해 침출수 유출방지 기능을 충분히 발휘하면서도 경제적인 차수시트 설치범위를 도출하기 위하여 차수시트의 불투수성 지층과의 설치범위(㉠, Fig. 3(b) 참



(a) Cross section at Tachabana Bay Offshore waste landfill



(b) Numerical model

Fig. 3. (a) Cross section at Tachabana Bay Offshore waste landfill and (b) Numerical model of contaminant transport analysis in rubble mound revetment waste landfill

Table 1. Material properties of each soil and structure element (Kwon et al., 2012)

Item	Mid protection	Fill sand	Landfill	Clay	Improved soil section (SCP)	Rubble mound	Sand gravel
Horizontal hydraulic conductivity k_h (cm/s)	parameter	1×10^{-4}	1×10^{-3}	parameter	5×10^{-4}	1×10^{-0}	1×10^{-1}
Vertical hydraulic conductivity k_v (cm/s)	parameter	1×10^{-4}	1×10^{-3}	parameter	5×10^{-4}	1×10^{-0}	1×10^{-1}
Porosity n (–)	0.4	0.2	0.7	0.2	0.3	0.4	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 conductivity and thickness of impermeable soil layer for rubble mound revetment waste landfill

Extended length of HDPE sheet on the ground (cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k (cm/s)			Thickness of impermeable soil layer (cm)
500	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 conductivity of vertical barrier wall and extended length of HDPE sheet for rubble mound revetment waste landfill

Embedded depth of vertical barrier wall in impermeable soil layer for preventing leakage (cm)	Hydraulic conductivity of impermeable soil layer, k (cm/s)			Extended length of HDPE sheet on the ground (cm)
500	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	50
				100
				150
				200
				250
				300
				350
				400
				450
				500
				550
				600

조)를 변화시켜 해석을 수행하였다.

해석조건을 좀 더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 먼저 경사식호안에서의 바닥 차수를 위한 바닥 차수시스템(점토층)의 두께 및 투수계수에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 점성토 지반 상부에 연장설치 되는 차수시트의 설치범위와 투수계수를 각각 500cm 및 1×10^{-11}cm/s로 고정하고 점토층의 투수계수와 두께를 변화시켜 해석을 실시하였다(Table 2).

Table 3은 측면차수시스템(마운드 하부 점토층) 500cm인 조건에서 매립지 하부 점토층의 투수계수와 차수시트의 연장길이에 따른 차수성능 평가를 위한 매개변수 해석조건이다. 2중 차수시트이므로 동일하게 시트길이를 증가시켰다(Fig. 3(b)의 ㉠부분 참조).

폐기물 매립 호안의 차수성능이 중요하므로 차수성능 및 차수시트의 시공 중에 주의를 해야 한다. 경사식호안의 차수시트는 물보다 밀도가 높은 재질로 중첩하여 설치한다. 일본의 경우 중첩은 폭 100mm에 대하여 접합 폭 25mm 이상을 권장하고 있다. 하지만 경사식호안의 차수시트는 시트이음부의 시공 불량, 주변 구조물과의 경계 접합불량, 사석에 의한 손상, 반복하중 및 지속적인 하중 작용으로

Table 4. Equivalent hydraulic conductivity with different backfill materials of damaged HDPE sheet (Kamon et al., 2002)

Back layer of HDPE / Equivalent hydraulic conductivity	Rubble Mound (1×10^{0} cm/s)	Mid protection			Clay (1×10^{-6} cm/s)
		Case 1 (1×10^{-2} cm/s)	Case 2 (1×10^{-4} cm/s)	Case 3 (1×10^{-5} cm/s)	
Damage frequency (high) (200hole/ha)	1.57×10^{-6} cm/s	1.57×10^{-8} cm/s	1.73×10^{-10} cm/s	3.17×10^{-11} cm/s	3.17×10^{-11} cm/s

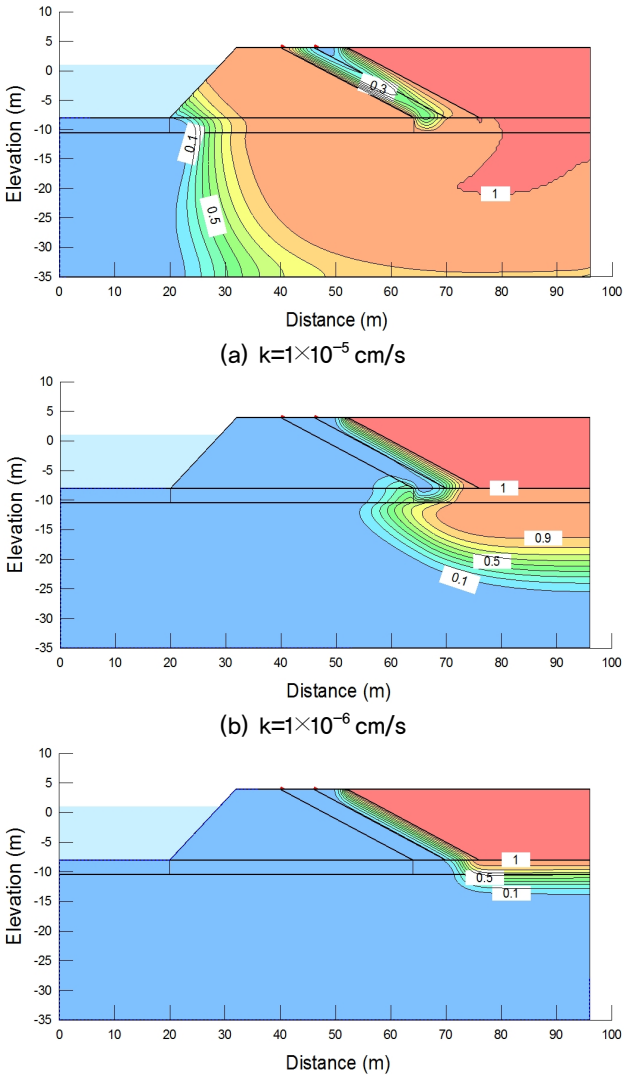
인한 피로파괴 등의 손상이 발생 할 수 있다(Kamon et al., 2002). Table 4에서 손상빈도(Damage frequency)의 단위는 hole/ha 인데 이것은 1ha 당 HDPE 손상이 200hole 일 때 값으로 차수시트와 접하는 각 재료에 대하여 손상빈도를 적용한 투수계수 값을 적용하였다. 손상된 차수시트을 고려한 중간보호층의 분산 효과를 검증하기 위하여 3개의 투수계수를 적용하여 해석을 실시하였다.

4. 해석 결과 및 분석

4.1 투수계수의 영향

경사식호안에서의 바닥 차수를 위한 바닥 차수시스템의 두께 및 투수계수에 대한 최적의 최소기준을 도출하기 위하여 점성토 지반 상부에 연장설치되는 차수시트의 설치범위와 투수계수를 각각 500cm 및 1×10^{-11}cm/s로 고정하고 바닥 차수시스템의 3가지 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s에 대해 두께를 250cm에서 1000cm까지 50cm 간격으로 총 14가지 경우(250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 900, 1000)에 대하여 침투·이류 분산해석을 수행하였다(Table 2).

Figs. 4~6에서는 세 가지 투수계수의 해석에서 대표적으로 250cm, 500cm, 1000cm의 점성토 두께에 대한 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타낸 것이다. 투수계수 1×10^{-5} cm/s의 경우 2중으로 된 차수시트보다는 대부분 바닥 차수시스템을 통과하여 이동되었으며, 두께가 얇을수록 이동범위가 매우 넓어짐을 알 수 있다. 1×10^{-6}cm/s의 경우 1×10^{-5} m/s에 비해 이동범위가 매우 좁아졌으며, 두께 500cm과 1000cm는 차이가 크지 않는 것으로 나타났다. 투수계수 1×10^{-7}cm/s의 경우 점성토 두께에 상관없이 이동범위가 매우 작아 오염물 이동 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 즉 점성토의 투수계수가 1×10^{-5}cm/s에서 1×10^{-6}cm/s로 그리고 1×10^{-7}cm/s로 변화됨에 따라 발생된 오염물 농도 분포를 보면 1×10^{-6}cm/s에서 가장 효과적으로 오염물 농도 분산을 억제할 수 있는 것을 알 수 있다.



(a) k=1×10^{-5} cm/s

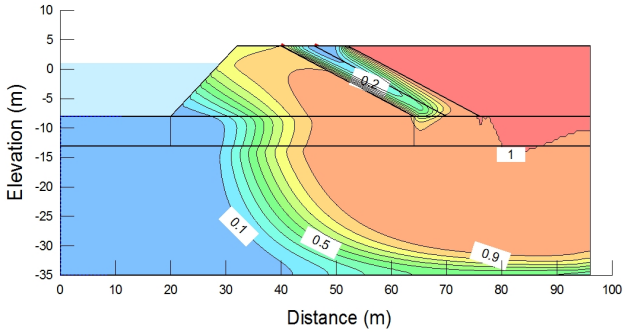
(b) k=1×10^{-6} cm/s

(c) k=1×10^{-7} cm/s

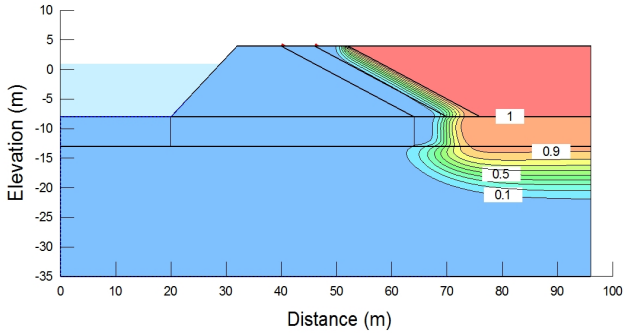
Fig. 4. Predicted concentration contour after 50 yrs. with different hydraulic conductivities in clay thickness of 250 cm

4.2 바닥차수시스템(점성토층) 두께의 영향

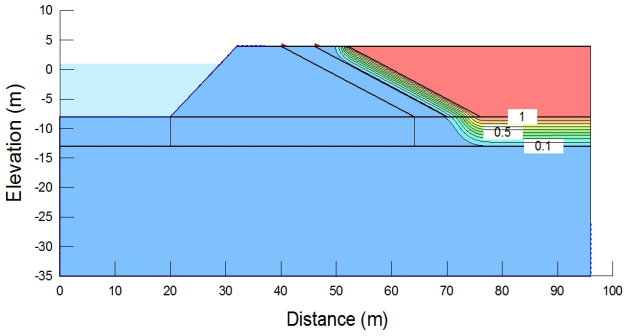
Figs. 7~9은 경사식호안에서의 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s에 대한 바닥차수시스템의 두께 변화에 따른 50년경과 후 누적누출량을 나타낸 것이다. 그림에서 TC는 바닥 차수시스템의 두께를, k는 투수계수를 나타낸다. 그림에 나타난 것처럼 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s



(a) k=1×10^{-5} cm/s

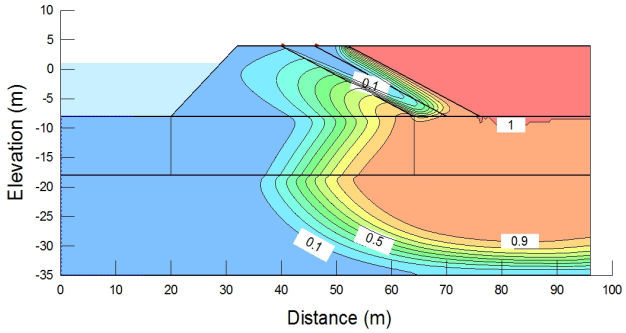


(b) k=1×10^{-6} cm/s

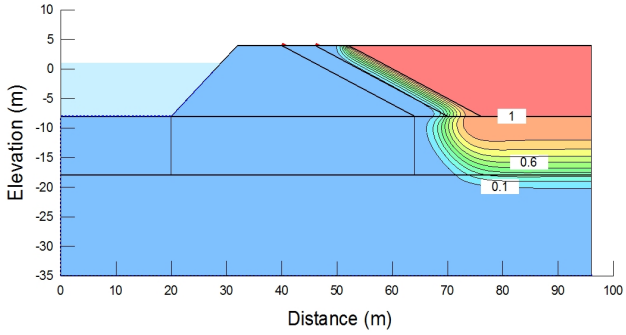


(c) k=1×10^{-7} cm/s

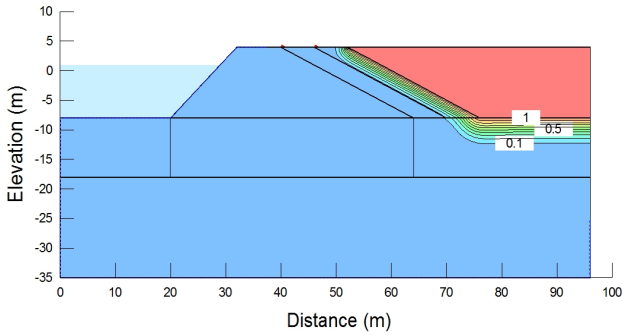
Fig. 5. Predicted concentration contour after 50 yrs. with different hydraulic conductivities in clay thickness of 500 cm



(a) k=1×10^{-5} cm/s



(b) k=1×10^{-6} cm/s



(c) k=1×10^{-7} cm/s

Fig. 6. Predicted concentration contour after 50 yrs. with different hydraulic conductivities in clay thickness of 1000 cm

에 대해 누적누출량의 범위는 각각 대략 7g~661g, 4.8E-15g ~ 9.7E-07g, 1.67E-245g~3.37E-20g의 분포를 나타낸다. 세 가지 투수계수에 대한 50년경과 누적누출량을 보면 1×10^{-5}cm/s인 경우를 기준으로 1×10^{-6}cm/s 인 경우 매우 적은 누출이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 1×10^{-7}cm/s의 경우는 누출이 거의 없음을 알 수 있다.

각 투수계수별 최적의 바닥차수시스템의 최적 두께를 결정하기 위하여 추세선(Figs. 6~8)에서 점선으로 표시)을 사용하였다. 그 결과 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s에 대한 바닥 차수시스템의 최적의 두께(그림에서 녹색으로 표시)는 각각 461, 384, 310cm로 나타났다.

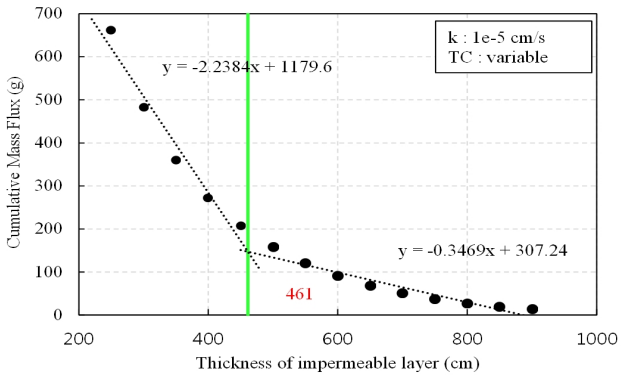


Fig. 7. Cumulative mass flux during 50 years with different thicknesses of clay layer in hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s

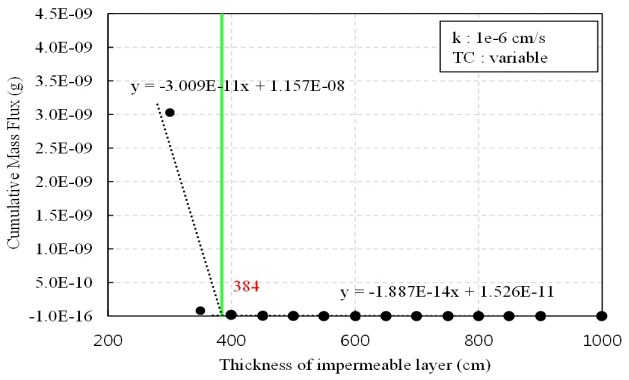


Fig. 8. Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of clay layer in hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s

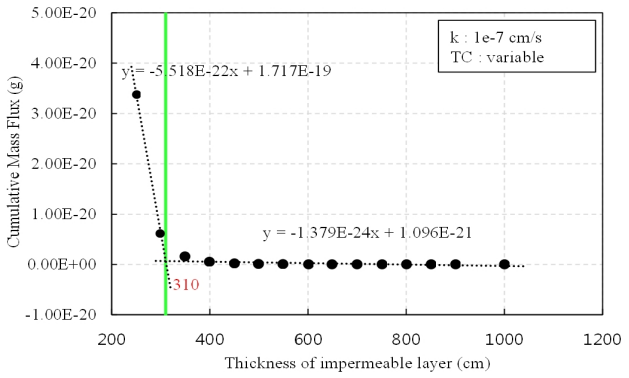
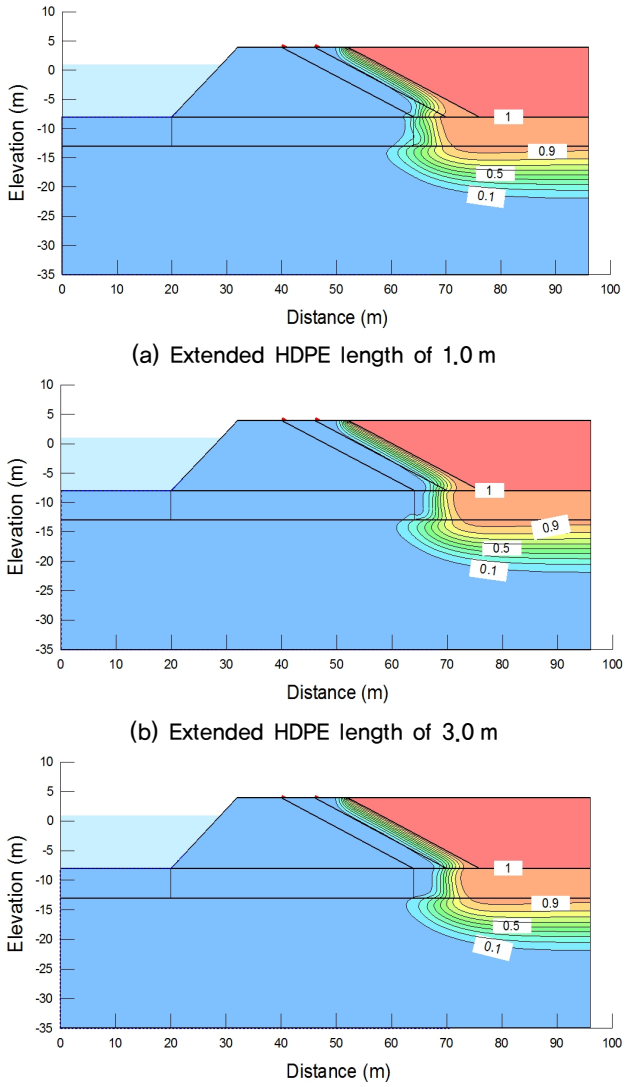


Fig. 9. Cumulative mass flux during 50 years with different thickness of clay layer in hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s

4.3 차수시트 길이의 영향

경사식호안에서 차수시트 설치범위를 도출하기 위하여 바닥 차수시스템(점토층)의 두께를 500cm로 고정하고, 바닥 차수시스템의 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s에 대해 점성토층과 접하는 부분의 차수시트 설치길이 0.5m 간격으로 12가지 경우(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0m)에 대한 50년경과 후 오염물 농도 분포와 누적누출량을 비교하였다.

Fig. 10는 투수계수 1×10^{-6}cm에 대한 해석결과로 대표적으로 차수시트 설치길이 1.0m, 3.0m, 5.0m에 대한 50년 경과 후 오염물 농도 분포를 나타낸 것이다. 1×10^{-6}cm/s 조건에서 차수시트 길이가 길어질수록 오염물 농도 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 나머지 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-7}cm/s의 경우도 설치길이에 따른 오염물 농도 변화가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 즉 1m 이상 차수시트를 설치하는 경우 그 이상 설치한 경우와 거의 결과가



(a) Extended HDPE length of 1.0 m

(b) Extended HDPE length of 3.0 m

(c) Extended HDPE length of 5.0 m

Fig. 10. Predicted concentration contour after 50 yrs. with different extended lengths of HDPE and hydraulic conductivity of 1×10^{-6} m/s in clay layer

같은 것을 알 수 있다. 이 결과는 침투만을 고려한 Oh et al.(2016)의 연구와도 일치하는 것으로 궁극적으로 오염물 농도 분포를 보면 농도 분산이 자수시트의 길이 보다는 바닥차수시스템이 점성토층의 투수계수에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

앞선 결과로 보면 농도 분포 결과로 차수시트의 최적 길이를 산정하기 힘들다는 것을 알 수 있다. 그래서 차수시트 설치 최적길이를 알아보기 위하여 오염원 누적누출량을 점성토층과 접하는 차수시트 설치 길이에 따라 재 도시하였다(Figs. 11～13). 그림에서 TC는 바닥 차수시스템의 두께를, k는 투수계수를, ED는 측면 차수시트의 설치길이를 각각 나타낸다. 투수계수 1×10^{-5}cm/s에서는 차수

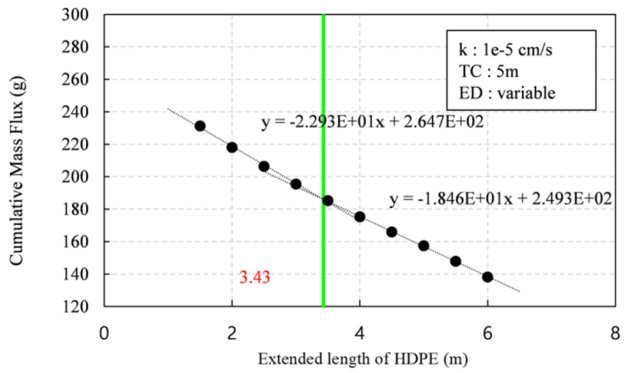


Fig. 11. Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE sheet in clay hydraulic conductivity of 1×10^{-5} cm/s

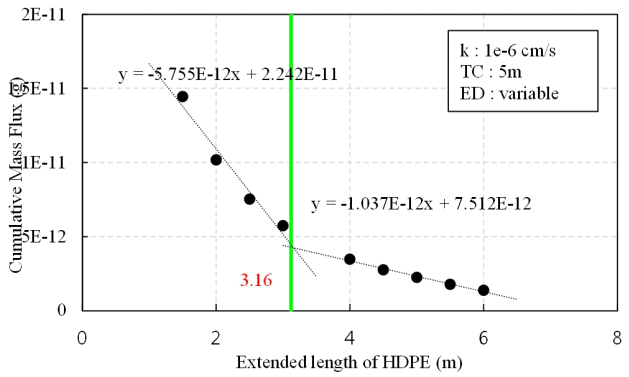


Fig. 12. Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE sheet in clay hydraulic conductivity of 1×10^{-6} cm/s

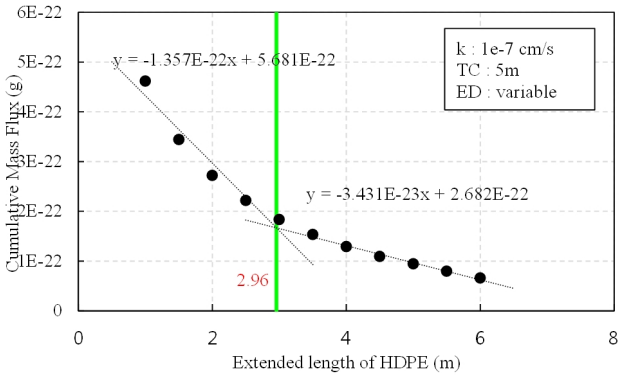


Fig. 13. Cumulative mass flux during 50 years with different extended length of HDPE sheet in clay hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s

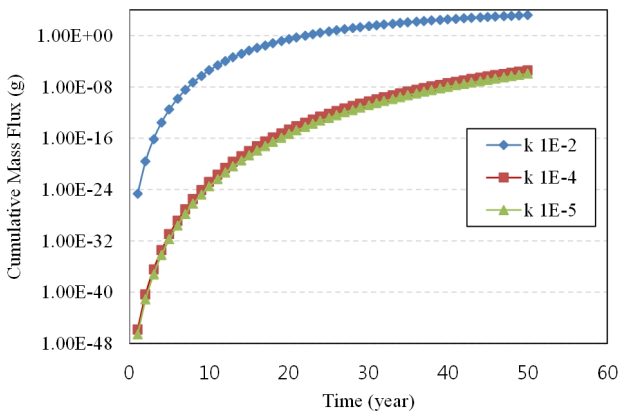


Fig. 14. Time history of cumulative mass flux during 50 years with different equivalent hydraulic conductivity of protection layer in the case of damaged HDPE

시트가 길어짐에 따라 그 비율만큼 유출량이 줄어드는 경향을 보이고, 나머지 투수계수에 대해서도 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 바닥차수시스템인 점성토층의 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s에 대한 점성토층과 접하는 부분 차수시트의 최적의 연장길이를 산정하기 위하여 두 개의 접선을 사용하였다. 투수계수에 따라 3.43~2.96m의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 앞서 산정한 최적의 점성토의 투수계수 최소기준 1×10^{-6}cm/s에 대한 최적의 연장길이는 3.16m로 산정되었다. 다만 유출량이 10^{-11}g 이하로 매우 작아 공학적으로 의미가 크지 않아 1m 이상 설치하면 문제가 없을 것으로 판단된다.

4.4 중간보호층 투수계수 변화에 따른 영향

경사식호안은 2중 차수시트 구조를 측면 차수에 적용하고 지반과 일체시킨 것인데, 차수시트에 손상이 생겼을 경우 2중 시트 간의 중간보호층의 효과를 알기 위하여 Table 4에 나타낸 것처럼 바닥 차수시스템의 두께를 500cm, 투수계수를 1×10^{-6}cm/s로 고정하고, 중간보호층의 투수계수는 1×10^{-2}, 1×10^{-4}, 1×10^{-5}cm/s로 가정하여 각각의 경우에 대한 차수시트의 환산투수계수는 '관리형 폐기물 매립호안 설계·시공·관리 매뉴얼(Kamon et al., 2002)을 참고하여 중간보호층의 효과를 평가하였다.

Fig. 14은 중간보호층의 각 투수계수에 따른 50년경과 후의 누적누출량이다. 중간보호층의 투수계수 1×10^{-2}cm/s일 경우에는 누적누출량이 1.53g으로 해석되었으며, 1×10^{-4}, 1×10^{-5}cm/s일 경우를 보면 3.5E-09g~1.1E-09g으로 유출이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 즉 투수계수 1×10^{-4}cm/s를 가진 재료를 중간보호층으로 적용한다면 차수시트 손상시에도 오염원 유출을 충분히 방지할 수 있다는 것을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 경사식호안 해상폐기물매립장에서의 오염물의 누출을 방지하는 차수시스템에 대한 기준을 제안하기 위하여 매립장의 측면 및 바닥차수시스템에 대하여 50년경과에 대한 침투·이류 분산 수치해석을 수행하였다. 해석은 정상류조건 하에서 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 바닥차수시스템인 점토층의 세 가지 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s에 대한 해석결과 1×10^{-6}cm/s가 가장 합리적으로 오염원의 이동을 억제시키는 것으로 나타나 바닥차수시스템은 최소 투수계수 1×10^{-6}cm/s를 만족하는 재료가 요구된다.

(2) 각 투수계수 1×10^{-5}, 1×10^{-6}, 1×10^{-7}cm/s에 대하여 요구되는 바닥차수시스템의 최소 두께는 각각 461, 384, 310cm가 필요한 것으로 산정되었다.

(3) 전반적으로 차수시트 설치 연장길이에 비례하여 오염물의 농도의 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 차수시트의 바닥차수시스템의 두께를 500cm 투수계수를 1×10^{-6}cm/s, 차수시트의 투수계수를 1×10^{-11}cm/s로 고정하고 해석한 결과, 차수시트 연장길이는 3.16m로 산출되었으나 1m 이상에서 변화 차이가 미비하여 공학적으로 1m 이상만 설치되면 차수시트의 역할을 충분한 것으로 판단된다.

(4) 중간보호층 재료의 투수계수가 1×10^{-4}cm/s인 경우 오염원이동이 거의 없는 것으로 나타나 차수시트에 어떤 손상이 생긴 경우라도 중간보호층의 재료에 투수계수가 작은 재료를 이용하면 침투·이류 분산 정도를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

References

1. Chae, K. S., Lee, S. P. and Oh, M. H. (2011), "Design and construction technology of marine waste landfill sites", *Journal of the Korean Civil Engineering and Textile Society*, Vol.10, No.4, pp.16-24.
2. 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.
3. Foose, G. J. (2010), "A steady-state approach for evaluating the impact of solute transport through composite liners on groundwater quality", *Waste Management*, Vol.30, No.8-9, pp.1577-1586.
4. GEO-SLOPE (2012a), *Seepage modeling with SEEP/W*, GEOSLOPE 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. Kamon, M., Inui, T., Edno, K., Ito, K. and Katsumi, T. (2002), *Evaluating the effect of clay layer on the performance of composite liner having geomembrane defects*, Geosynthetics-State of Art, Recent Developments-, Ph.Delmas, J.P. Gourc and H. Girard, eds., Swets&Zeitlinger, Lisse, pp.519-522.
8. Kwon, O. S., Oh, M. H. and Chae, K. S. (2012), *Guidelines for the design, construction, and management of managed wastes reclaimed embankment*, CIR publishing, Seoul, Korea
9. Ministry of Environment of Korea (2016), *Wastes control act: Enforcement regulations*, Ministry of Environment of Korea.
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. Oh, M. H., Park, H. Y., and Kwon, O. S. (2016), "Analysis on Seepage Behavior According to Extended length of HDPE Sheet of Rubble Mound Revetment at Offshore Landfill", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.15, No.3, pp.39-47.
13. Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center (2018), *Osaka Bay Phoenix Project*, Osaka : Osaka Bay Regional Offshore Environmental Improvement Center.
14. 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.