

## 방조제 이질층의 투수성이 제체 침투에 미치는 영향에 대한 모의 분석

### Simulation of Effects of Permeability on Seepage between Two Heterogeneous Layers of Sea-dike

이 행 우\* · 장 병 옥\*\*† · 손 영 환\*\*\* · 김 성 필\*\*\*\*

Lee, Haeng Woo · Chang, Pyoung Wuck · Son, Young Hwan · Kim, Seong Pil

#### Abstract

A simulation was done to analyze the seepage problems due to seawater intrusion through the embedded rock layers on heterogeneous layers of sea-dike. Numerical analysis with SAMTLE(developed by author) was done by taking various relative permeability ratio( $k_r/k_d$ ).

These results showed, when the sea-dike is newly designed, operated, and maintained considering the safety of sea-dike in seepage problems, these embankment materials are prudently chosen. The permeability of the soil materials, within the range of salinity management in freshwater, is comparatively high, however, the permeability of rock materials for bottom rock layer is low. Therefore, when the relative permeability ratio( $k_r/k_d$ ) is below 10 it is safety in seepage problems of sea-dike.

*Keywords : Sea-dike, Relative permeability ratio( $k_r/k_d$ ), SAMTLE, Seepage problems*

#### I. 서 론

방조제는 수자원을 확보하고 농업용수 및 산업용수를 공급하는 이수시설인 동시에 태풍에 의한 해

일 등을 막아주고 홍수를 예방하는 치수시설이다.<sup>8)</sup> 그러나 방조제는 바닷물을 그대로 둔 채 연약지반 상에서 축조되는 태생적인 약점으로 침투안정(Seepage Stability) 등에 대해 많은 불확실성이 내재하고 있어 부분 결괴나 전면붕괴의 위험도 상존하고 있다. 특히, 최근의 방조제는 심해에서 채절되기 때문에 채절 시 개방구간에서 조류속에 의한 바닥세굴 문제가 심각해<sup>10),11)</sup> 바닥보호사석을 넓게 포설하고 그 위를 흙으로 성토하여 방조제를 완공한다. 이와 같이 바다 밑 원지반위에 포설된 바닥사석층의 투수성은 시간경과와 함께 사석간극을 흙

\* 농림부 농촌정책국

\*\* 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부

\*\*\* 서울대학교 농업생명과학연구원

† Corresponding author. Tel.: +81-2-880-4585  
Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: pwchang@snu.c.kr

및 모래 등이 채워 그 채움 정도에 따라 투수성이 차이가 크다. 방조제가 완공된 이후에도 투수성이 큰 바닥사석층내로 해수가 유통되어 상부 제체에 여러 가지 침투문제를 야기한 사례도 종종 보고된 바 있다.<sup>10),11)</sup>

일반적으로 사석층 내의 침투는 Non-Darcy 흐름<sup>1),2),9)</sup>으로 알려져 있지만 방조제 바닥사석층과 같이 원지반이나 흙 성토층에 매설되어<sup>10),11)</sup> 있는 사석층은 상하류의 흐름이 자유로운 일반 사석층 내의 흐름과는 다른 Darcy 흐름이라고 연구 발표된 바 있다.<sup>3),4),6)</sup> 이(Lee)와 장(Chang)은 실내 실험 및 수치해석을 통하여 성토층 하부의 사석층내의 침투특성이 Darcy의 층류 흐름임을 보였으며,<sup>6)</sup> 또한 투수성이 완전히 다른 2층 성토 구조물의 침투특성을 분석하기 위한 정상류 상태(steady state)의 Darcian 침투모델 SAMTLE을 개발하고 적용성을 입증하여<sup>4)</sup> 성토층 하부 매설된 사석층 내의 침투는 Darcy 흐름임을 보였다.<sup>3),4),6)</sup> 아울러, 방조제에 있어서 바닥사석층의 규모 및 바닥 사석층 내의 통수가 성토 제체 침투안정에 심각한 영향을 미치는 것으로 연구 보고된 바도 있다.<sup>5),7),8)</sup>

본 연구에서 2층 성토구조물의 침투해석 모형(SAMTLE)을 이용하여 방조제 이질층간의 상대적인 투수성이 제체 침투문제에 미치는 영향을 모의 분석하고자 한다.

## II. 침투문제에 대한 모의 분석

### 1. 입력자료

본 연구에서는 이질층간 투수성이 다른 방조제의

바닥사석층 내 통수에 따른 제체 침투문제의 영향을 분석하기 위하여 SAMTLE 모형을 사용하였다.

Fig. 1은 분석에 필요한 방조제 이질층간 투수계수( $k_e, k_r$ )와 바닥사석층의 폭의 길이( $L_r$ ) 및 높이( $D_r$ ), 바닥사석층 전면 성토층의 길이( $L_e$ ) 및 높이( $D_e$ )을 도시하였다.

SAMTLE 모형의 필요한 입력자료는 Table 1과 같으며, Table 2와 같이 자료를 입력하였다.

Table 1과 2에서 보는바와 같이 SAMTLE 모형의 입력자료는 방조제 및 바닥사석층의 단면자료, 축제 재료의 투수성, 물리적 특성, 방조제의 내·외측 수위 등이다.<sup>7)</sup> 기본이 되는 입력자료는 ○○방

Table 1 Input data description to SAMTLE<sup>3),4),8)</sup>

Classification	Factor	Description
Soil data	$G_s$	Specific Gravity
	$\gamma_d$	Dry Unity Weight ( $KN/m^3$ )
	$e$	Void ratio
	$k_e$	Permeability (m/s)
Bed rock data	$k_r$	Permeability (m/s)
	$L_r$	Length (m)
	$h_r$	Height of not inclined layer
Water Level	$h_d$	Water level in landside (m)
	$h_s$	Sea water level (m)
Sectional data	$L$	Length of embankment (m)
	$H$	Height of embankment (m)
	$E_b$	Elevation of bottom line
	$\alpha$	Angle of downstream slope
	$\nabla X$	Distance of calculation

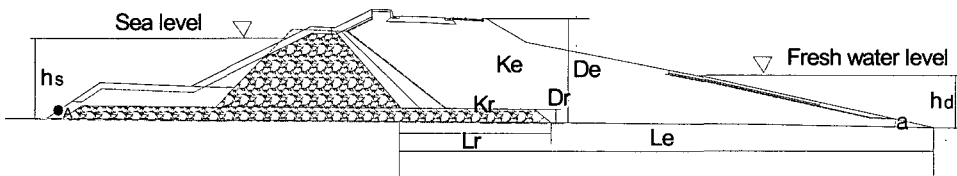


Fig. 1 Typical cross section of sea-dike<sup>3),8)</sup>

조제의 실측자료이다. 방조제 하부 폭은 81 m, 높이는 15 m이며 방조제 바닥사석층의 폭은 27 m, 높이는 2 m이다. 또한 흙 성토층의 평균 투수계수는  $3.80 \times 10^{-6}$  m/s, 간극비는 0.75, 비중은 2.66이다.<sup>10)</sup> 바닥사석층의 평균투수계수는  $1.17 \times 10^{-5}$  m/s이고, 하부 표고는 EL(-)8.42 m이다. 하류면 사면의 경사는  $9.5^\circ$ 이며, 계산간격은 상류로부터 1 m이다. 또한 외측 해수위는 EL(+) 3.001 m이고, 내측 관리수위는 EL(-)1.50 m이다. Table 2는 이질층간 상대적인 투수성이 방조제 침투문제에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이질층의 투수계수를 모사시켰다. 이질층의 투수계수비 ( $k_r/k_e$ )가 1000 이상의 차이는 물리적으로 가능성이 없기 때문에 흙 성토층의 투수계수를  $3.80 \times 10^{-6}$  m/s로 고정하고 바닥사석층의 투수계수를  $1.90 \times 10^{-5}$  ( $k_r/k_e=5$ ),  $3.80 \times 10^{-5}$  ( $k_r/k_e=10$ ),  $1.90 \times 10^{-4}$  ( $k_r/k_e=50$ ),  $3.80 \times 10^{-4}$  m/s ( $k_r/k_e=100$ )로 변화를 주었다. 보통 방조제 바닥사석층은 사석층사이의 충전상태에 따라 투수성이 10~100 범위의 값을 갖는 것으로 나타났다.

2. 이질층간 상대적인 투수성에 따른 영향

방조제는 바닥사석층과 흙 성토층의 투수성이 차

이가 큰 이질층으로 되어있다. 이 이질층 간의 상대적인 투수성에 따라 성토층내 침투문제에 미치는 영향을 알아보기 위하여 SAMTLE 모형을 이용하여 분석하였다. 방조제의 상·하류의 수두차에 의해 방조제에 작용하는 동수경사( $j$ )는 0.05이다. 도출된 결과를 Fig. 2~4에 나타냈다.

가. 침윤선 변화

Fig. 2에서 보는 바와 같이  $k_r/k_e = 1$ 인 경우, 즉 바닥사석층이 없는 경우 침윤선이 낮게 나타났으며  $k_r/k_e = 50$  까지는 침윤선이 증가하다가 50 이상에서는 침윤선의 증가가 미미한 것으로 나타

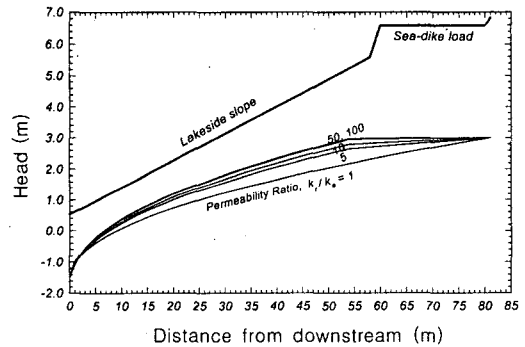


Fig. 2 Changes in water head by varying the relative permeability ( $k_r/k_e$ ) in two-layer embankment ( $j=0.05$ ).

Table 2 Input data of SAMTLE for analyzing seepage problems of sea-dike due to seawater intrusion through the embedded rock layer

Case	Le	Lr	De	Dr	ke	kr	Gs	e	dx	hs	hd	Eb	a
1	81	27	13	2	3.80E-06	3.80E-06	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5
2	81	27	13	2	3.80E-06	1.90E-05	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5
3	81	27	13	2	3.80E-06	3.80E-05	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5
4	81	27	13	2	3.80E-06	1.90E-04	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5
5	81	27	13	2	3.80E-06	3.80E-04	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5
6	81	27	13	2	1.17E-05	1.17E-05	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5
7	81	27	13	2	1.17E-06	1.17E-05	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5
8	81	27	13	2	1.17E-07	1.17E-05	2.66	0.75	-1	3.001	-1.5	-8.42	9.5

났다. 또한 바닥사석층과 흙성토층과 투수계수가 같은 경우(즉 바닥사석층이 없는 경우)에는 침윤선이 포물선을 그리며 감소하지만 바닥사석층이 흙성토층의 5~10배보다 큰 투수성일 경우 바닥사석층 상부의 흙성토층의 침윤선은 바닥사석층의 투수성이 증가 할수록 수평에 가깝게 상승하는 것으로 나타났다. 바닥사석층이 없는 경우에 비해 있는 경우  $k_r/k_e$ 가 5, 10, 50, 100 증가할수록 수두의 증가량은 감소하는 것으로 나타났다.

나. 침투유량 변화

Fig. 3은 이질 성토층간의 상대적인 투수성의 변화에 따른 침투유량의 변화를 도시하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 이질 성토층간의 상대적인 투수계수비가( $k_r/k_e$ )가 증가 할수록 침투유량은 증가하고 있다.

이를 구체적으로 살펴보면 바닥사석층의 투수성이 흙성토층의 투수성과 비교하여 상대적으로 1~10배, 10~50배, 50~100배 증가할 때 침투유량은 흙성토층과 바닥사석층이 같을 때와 비교하여 각각 1.38, 1.48, 1.49배의 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 3의 각구간의 직선 기울기는 각각 0.015, 0.0025, 0.0005  $m^3/(day \text{ Log}_{10}(m/s))$ 로 바닥사석층의 투수성이 증가할수록 기울기가 감소하는 것으로 보아 침투유량 증분은 감소하는 것으로

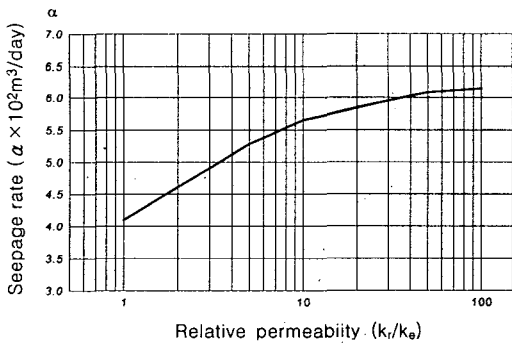


Fig. 3 Changes in seepage rate by varying the relative permeability ( $k_r/k_e$ ) in two-layer embankment ( $i=0.05$ ).

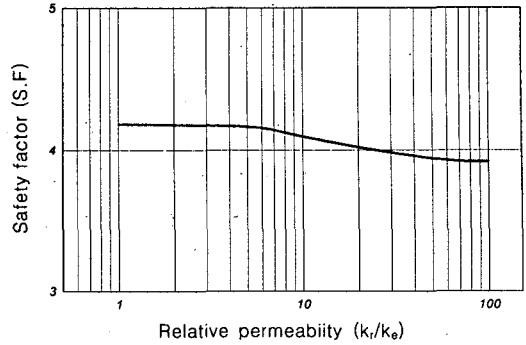


Fig. 4 Changes in safety factor of piping by varying the relative permeability ( $k_r/k_e$ ) in two layer embankment ( $i=0.05$ ).

로 나타났다.

다. 파이핑 안전율 변화

Fig. 4는 이질 성토층 간의 상대적인 투수계수비( $k_r/k_e$ )에 따른 파이핑 안전율의 변화를 나타냈다. 파이핑 안전율 역시 흙성토층의 투수계수는 일정하고 바닥사석층의 투수계수가 증가할 때 파이핑 안전율은 감소하는 것으로 나타났다. 미공병단(USBR)단에서는 해안구조물과 같은 침투에 취약한 구조물은 파이핑 안전율 4.0을 기준으로 한다.<sup>10)</sup> 미공병단의 기준을 고려할 때 두층간의 투수계수비( $k_r/k_e$ ) 10이하에서는 파이핑에 안전하나 20이상에는 불안한 것으로 나타났다. 실제 ○○방조제에서 파이핑 현상이 발생하는 것으로 보아 바닥사석층의 투수계수가 흙성토층의 투수계수에 20배 보다 크을 유추할 수 있다.

이상의 결과로 보아, 해수침투에 안전한 방조제 설계를 위하여 바닥사석층의 투수계수는 흙성토층의 투수계수의 10배 이상을 넘지 않도록 설계하고 시공 관리해야 할 것으로 판단된다.

3. 흙성토층 투수성에 따른 영향

전항에서 흙성토층의 투수계수를 고정하고 바닥사석층의 투수계수를 변경시켜 분석한 결과 이질

성토층간의 상대적인 투수성은 제체의 침투특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

다음은 바닥사석층의 투수계수를 고정시키고 흙 성토층의 투수성에 따라 방조제 침투특성에 미치는 영향을 분석하여 Fig. 5~7에 도시하였다.

가. 침윤선 변화

Fig. 5는 흙 성토층의 투수성의 변화에 따른 제체의 침윤선의 변화이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 흙 성토층의 투수성이 커질수록 침윤선은 낮게 나타났다. 이는 성토층의 투수성이 좋아 배수가 원활하면 성토층에 걸리는 침투압이 감소하여 수두가 낮게 형성된 것으로 판단된다. 또한 바닥사석층과 흙 성토층과 투수계수가 같은 경우(즉 바닥사석층이 없는 경우)에는 침윤선이 포물선을 그리며 감소하지만 흙 성토층의 투수계수가 작아질수록 바닥사석층 상부의 침윤선은 수평에 가까워져 상승하는 것으로 나타났다.

따라서 흙 성토층이 바닥사석층의 투수성에 비해 지나치게 낮은 재료로 축조되면 흙 성토층내 수두가 높아져 침윤선이 상승해 해수가 침출할 위험성이 있다. 이를 방지하려면 방조제 단면을 수직방향으로 키워야 하는 비경제적인 단면이 될 수 있다.

나. 침투유량 변화

Fig. 6은 흙 성토층의 투수성의 변화에 따른 제체를 통해 흐르는 침투유량의 변화를 도시하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 성토층 재료의 투수성 증가에 따라 침투유량이 비례하여 증가하고 있으며 그 기울기는  $0.912(\log_{10}(m^3/day)/\log_{10}(m/s))$  이다.

다. 파이핑 안전율 변화

Fig. 7은 흙 성토층의 투수성의 변화에 따른 제체에 작용하는 파이핑 안전율의 변화를 도시하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 성토층의 투수성 증가에 따라 파이핑 안전율이 미미한 증가를 보이고

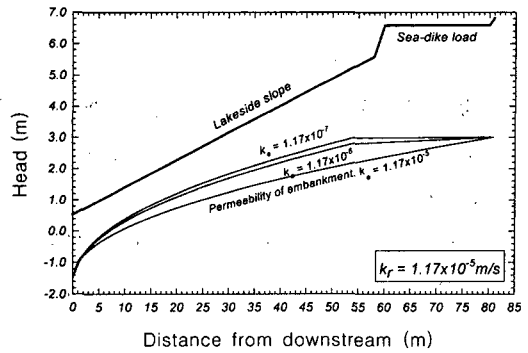


Fig. 5 Changes in water head by varying the permeability( $k_e$ ) in soil embankment ( $i = 0.05$ )

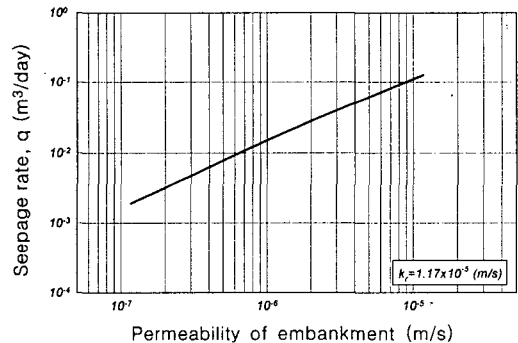


Fig. 6 Change in Seepage rate by varying the permeability( $k_e$ ) in embankment ( $i = 0.05$ )

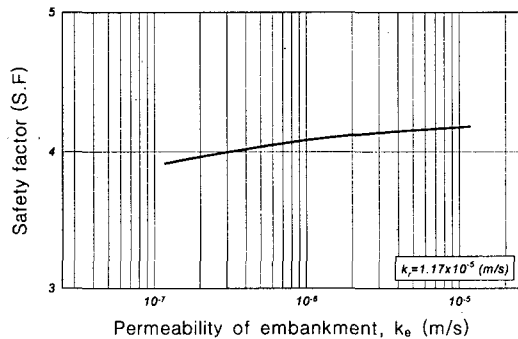


Fig. 7 Change in safety factor by varying the permeability( $k_e$ ) in embankment ( $i = 0.05$ )

있다. 이는 앞서서도 언급 했듯이 성토층이 투수성이 크면 배수가 양호하여 성토층에 작용하는 침투수압이 감소하기 때문이다. 흙 성토층의 투수계수가

$k_e = 1.17 \times 10^{-7}$  에서  $1.17 \times 10^{-5}$  m/s로 증가할 때 0.133  $1/\log_{10}(m/s)$ 의 기울기로 증가하고 구간별 기울기는  $k_e = 1.17 \times 10^{-7}$  에서  $1.17 \times 10^{-6}$  m/s로 증가할 때 0.177  $1/\log_{10}(m/s)$ ,  $k_e = 1.17 \times 10^{-6}$  에서  $1.17 \times 10^{-5}$  m/s로 증가할 때 0.089  $1/\log_{10}(m/s)$  나타나 흙 성토층의 투수성이 증가할수록 파이핑에 대한 안전율은 약간 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로 보아 흙 성토층의 투수계수가 증가하면(바닥사석층의 투수계수를 일정하게 고정되어 있다고 가정) 배수가 원활해 침투수량은 증가하나 침투수압이 감소해 침윤선은 낮아지고 이로 인해 파이핑 안전율은 증가한다. 이는 방조제 안전적 측면과 경제적 측면에서는 유리하나 해수침투량이 증가해 담수호의 염도관리에 영향을 미칠 수 있으므로 방조제 설계 시 종합적으로 판단하여 적절한 투수성의 재료를 선택해야 할 것으로 판단된다.

### III. 결 론

SAMTLE 모형을 이용하여 방조제 바닥사석층과 흙 성토층 2층으로 구성된 방조제의 이질층간 투수성의 상대적 차이가 제체 침투문제에 미치는 영향을 모의 분석하였다. 분석에 이용된 방조제의 제원은 폭이 81 m, 바닥사석층은 상류에서 폭 27 m, 높이 2 m이며, 흙 성토층의 투수계수의 범위를  $\alpha \times 10^{-7} \sim \alpha \times 10^{-5}$  m/s 사이에서 분석하였다. 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 방조제 바닥사석층의 투수성이 증가해 상대 투수계수비( $k_r/k_e$ )가 증가할수록 침윤선은 상승, 침투유량은 증가, 파이핑 안전율은 감소하였다.
- 2) 미공병단(USBR) 파이핑 안전율 4.0을 기준으로 할 경우 상대 투수계수비( $k_r/k_e$ ) 10배까지는 파이핑에 안전하나 10 이상에서는 불안전 것으로 나타났다.
- 3) 방조제 바닥사석층의 투수계수( $k_r$ )를 고정시키고 흙 성토층의 투수계수( $k_e$ )를 증가시키면

침투유량은 증가하고 침윤선은 하강, 파이핑 안전율은 증가하였다.

- 4) 이상의 결과로 보아 방조제 설계 시 및 유지관리 개보수 시에 성토 재료는 신중하게 선택해야 하며 담수호의 염도관리에 지장을 주지 않는 범위에서 흙 성토 재료는 투수성이 큰 재료, 바닥사석층은 투수성이 낮은 재료를 선택하여 두층간의 상대 투수계수비( $k_r/k_e$ )가 10 미만이 돼야 침투문제에 안전할 것으로 판단된다.

### References

1. Abt, S. R., Ruff, J. F., and Wittler, R. J., 1991, "Estimating flow through riprap." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117 (5): 670-675.
2. George, G. H., and Hansen, D., 1992, "Conversion between quadratic and power law for non-Darcy flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(5): 792-797.
3. Lee, H. W., 2005, Seepage Characteristics of Sea Dike depending on the Size and Permeability of Embedded Rock Layer under soil Fill, Ph.D thesis. Seoul National University. (in Korean)
4. Lee, H. W., Chang, P. W., 2005a, "Development and Application of Seepage Analysis Model of Two-Layer Embankment (SAMTLE)", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 25(5C): 353-359. (in Korean)
5. Lee, H. W., Chang, P. W., 2005b, "Seepage Problems due to Seawater Intrusion through Embedded Rock Layer of Sea dyke", 4<sup>th</sup> International Workshop on Sustainable Development of Tidal Areas, 19<sup>th</sup> Congress and 56<sup>th</sup> IEC, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Beijing, China, Sept. 13, 2005,

- pp. 137-139.
6. Lee, H. W., Chang, P. W., 2005c, "Seepage Characteristics of Embedded Rock Layer Under the soil Fill", *Journal of Korean Society of Geotechnical Engineers*, 21 (8): 55-61. (in Korean)
  7. Lee, H. W., Chang, P. W., Chang, W. H., Kim, S. W., 2005, "Seepage Characteristics of Embankment with or without Gravel Layer under the soil Fill", *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, 47(4): 53-61. (in Korean)
  8. Lee, H. W., Chang, P. W., Song, C. S., Won, J. Y., 2006, "Simulation of Effects of the Size of Embedded Rock Layer under soil Fill on Seepage Problems of Sea-dike", *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, 48(1): 81-88. (in Korean)
  9. Li, B., Garga, V. K., and Davies, M. H., 1998, "Relationship for non-Darcy flow in rockfill." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(2): 206-212.
  10. Ministry of Agriculture & Forestry and Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, 2002, A Study on the Method of Preventing Piping for the Hwaong Seadike. (in Korean)
  11. Rural Development Corporation, 1995, Tideland Reclamation in Korea. (in Korean)