

새만금 간척지 포화상태 흙의 제염예측기법 개발

Development of Prediction Method of Desalination on a Saturated Soil in Saemangeum Reclaimed Area

서동욱^{*,†} · 김현태^{*} · 장병욱^{**} · 이상훈^{***}

Seo, Dong Uk^{*,†} · Kim, Hyeon Tae^{*} · Chang, Pyoung Wuk^{**} · Lee, Sang Hun^{***}

ABSTRACT

A series of laboratory model tests and numerical analysis is performed to analyze characteristics of desalination and to predict a period of desalination for subsurface saturated soil in Saemangeum reclaimed area. The results show that quantity of desalination is small as salinity of water is increased. On the contrary, quantity of desalination is increased as salinity of soil is high. In order to decrease the salinity to 10 % of initial salinity of soil at depth of 2 m, it takes 11 years to desalinate the soil 50 m away from drainage ditch. For soil at depth of 1.5 m only 1 year to desalinate the soil near drainage ditch. Also, water head of 80 cm is required to desalinate to 10 % of initial salinity for 60 cm thick soil. Because the following results is based upon the Saemangeum soil, an application of this result for another field will be cautious. More research will be required on this matter.

Keywords: Desalination; saturated soil; saemangeum; reclaimed area

I. 서 론

본 연구는 새만금 간척지 원지반 흙의 염도 변화특성과 제염 기간을 예측하는 연구로서, 제염 현상을 파악하기 위한 실내모형실험, 실험 결과를 이용한 수치해석으로 나뉘어진다. 새만금 간척지와 같이 염도가 남아있는 농지 또는 단지 조성 후, 지반 내의 잔류 염도를 평가하고 이를 분석함으로써 제염소요기간을 예측하고자 한다.

제염에 의한 흙의 위치별, 심도별 염도를 분석하고, 소요기간을 예측하기 위해서는 흙의 종류, 흙의 포화 상태, 토층 조건, 용탈수의 염도, 흙의 염도, 기상 조건 등 매우 다양한 인자들에 따른 분석이 필요하다. 기존의 제염 연구는 배수로의 침투특성과 토층조건을 고려하지 않는 문제점을 가지고 있다. 또

한, 기존 연구는 주로 제염 실험결과로부터 경험회귀식을 이용하여 간척지의 염도변화를 예측하였으나, 본 연구에서는 침투류해석과 염분이동 수치해석을 통해 염도변화를 예측하고자 한다.

따라서, 본 연구는 흙이 포화된 상태에서의 새만금 흙과 같은 투수성이 좋은 사질토를 대상으로 배수로의 침투특성과 토층 조건을 고려하여, 용탈수, 원지반 흙의 염도에 따른 제염 특성을 분석하고, 제염 소요기간을 예측하고자 한다.

II. 재료 및 방법

현장의 제염 현상을 파악하고 제염 상관식을 도출하기 위한 자료를 얻기 위하여 실내모형실험을 실시하였다. 실내모형실험은 원지반의 토양을 모형에 축소시켜 실제 지반에서의 제염변화를 알아보기 위한 실험이다. 본 실험은 현장에서 직접 채취한 불교란 시료를 상대로 염도가 서로 다른 물을 각각 투하시켜, 몰드 상부에서 시료를 통과하여 하부로 빠져나오는 물의 염도를 측정하는 실험이다. 불교란 시료는 현장에서 깊이 6 cm, 직경 10 cm로 제작한 몰드를 토양층에 직접 삽입하여 채취를 하였으며, 교란이 일어나지 않도록 몰드 끝에 컷터 (Cutter)를

* 한국농어촌공사 농어촌연구원
** 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과
*** 한국건설기술연구원
† Corresponding author. Tel.: +82-31-400-1786
Fax: +82-31-400-1794
E-mail address: duseo@hanmail.net

2009년 1월 14일 투고
2009년 2월 17일 심사완료
2009년 3월 17일 게재확정

제작하여 장착하였다. 흙의 제염특성은 흙의 종류, 투수성 등의 물리적 성질과 흙의 염도, 침투수의 염도, 침투수량 등에 따라서 다른 특성을 나타낼 수 있으나, 흙의 물리적인 특성이 동일하다면, 흙의 염도변화량은 침투수 및 흙의 염도와 상관관계가 있으므로 식(1)과 같은 제염상관식으로 나타낼 수 있다. 따라서, 물의 염도가 0 ppm인 것과 3,000, 5,000 ppm의 물을 각각 투하시켜 시료를 통과하여 나오는 물의 염도 변화와

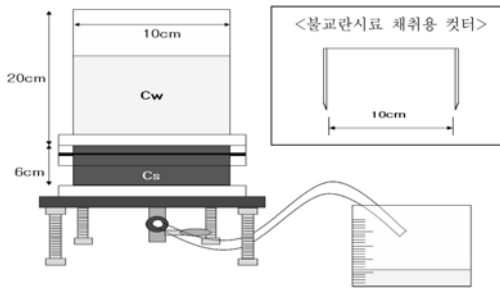


Fig. 1 The concept of experimental device



Fig. 2 Setting of sample mold



Fig. 3 Test as a salinity of water

물이 빠져나가는 흙의 염도 변화를 분석하여 다음과 같은 제염 상관식을 도출하고자 한다.

$$\Delta C = \alpha \cdot a C_s^b \cdot \left(1 - \frac{C_w}{C_s}\right)^c \cdot Q \quad (1)$$

여기서, a, b, c 는 상수 ΔC : 염도변화량
 C_s : 토양의 염분농도 C_w : 물의 염분농도

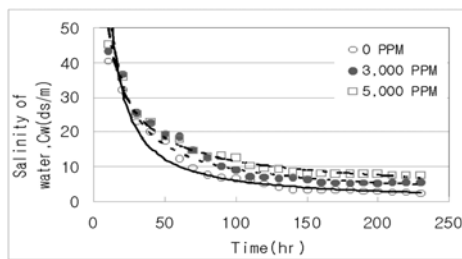
토양의 염도를 현장조건과 비슷한 30 ds/m로 맞춘 후 물의 염도가 0, 3,000, 5,000 ppm인 물을 각각 투하하여 각각 토양의 제염속도를 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

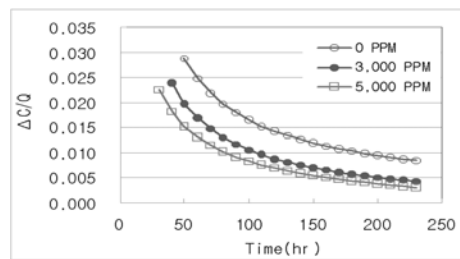
1. 실험 결과

시간경과에 따른 각각의 시료를 통과한 물의 염도를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 시료를 통과한 탈염수의 염도가 처음에는 높다가 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 시료에 유입되는 탈염수의 초기 염도가 각각 0, 3,000, 5,000 ppm일 때, 이를 640을 나누어 전기전도도로 환산하면, 0, 4.7, 7.8 ds/m로 표현되므로, 시료를 통과한 탈염수의 염도는 최종적으로 이들 값 이하로는 떨어지지 않을 것이다. 이는 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 0, 3,000, 5,000 ppm 모두 0, 4.7, 7.8 ds/m의 값 근처로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

탈염수의 염도가 처음에는 높다가 점점 감소하는 것은, 초기에는 흙속의 염분을 탈염시키는 양이 많다가 시간이 지남에 따라 탈염되는 양이 점점 줄어든다는 것을 의미한다. Fig. 4(b)가 이러한 현상을 설명해주고 있는데, 시료에 통과되는 물의 초기 염도 (0, 3,000, 5,000 ppm)가 낮을수록 탈염량이 많다는 것을 증명한다. 반대로, 시료에 유입되는 물의 초기 염도가 높을수록 탈염량은 줄어든다.



(a) Salinity of desalting water



(b) Unit quantity of desalination

Fig. 4 Quantity of desalting with time

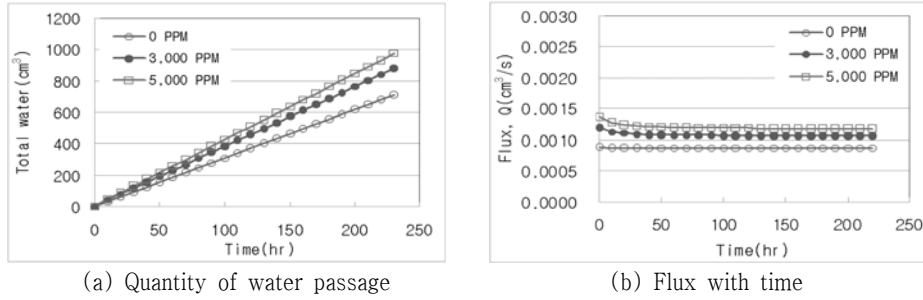


Fig. 5 Quantity of flow with time

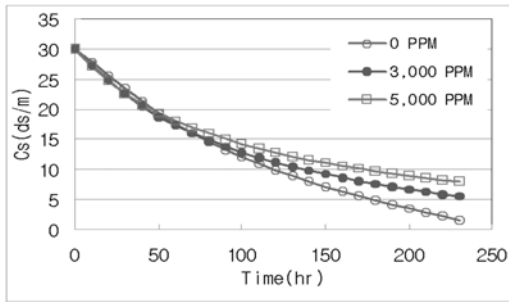


Fig. 6 Salinity of soil with time

Fig. 5(a)는 시료에 유입되는 물의 초기 염도에 따라 수량변화가 다르다는 것을 나타내며, 이를 Fig. 5(b)와 같이 유량으로 나타내었을 때도 물의 초기 염도에 따라 유량이 다르다는 것을 알 수 있다. Jeong (2002)은 흙의 염도가 높을수록 투수성이 커진다는 것을 보여주었는데, 이러한 현상은 염도가 높을수록 흡입자 중 세립자의 표면 흡착수를 형성하고 있는 확산 이중층이 얇아져 흡입자의 공극이 커지게 됨으로써, 물의 흐름이 더 빨라지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 시간에 따른 흙의 염도 변화를 나타낸다. 실험 결과에 의하면, 실험 물드(직경 10 cm, 높이 6 cm)안의 시료의 초기 염도가 30 ds/m이고, 0, 3,000, 5,000 ppm의 물을 각각 통과시킬 때 약 230시간이 경과하면 1.5, 5.5, 8.0 ds/m로 흙의 염도가 떨어지는 것으로 나타났다.

2. 제염 상관식 도출

본 실험을 통한 염도변화 분석을 위해서는 다음과 같은 몇 가지의 전체 조건이 필요하다.

- ① 흡과 물의 염분 총량은 일정하다. 즉, 탈염화 과정을 거치면서 다른 화학적인 반응 등에 의해 염의 절대량은 변하지 않는다.
- ② 지반 내 물의 이동은 유선(침투해석 결과)을 따라서만 이동한다.

- ③ 물의 염도가 $C_{w(i-1)}$ 이고, 흙의 염도가 $C_{s(i-1)}$ 인 상태에서 탈염(ΔC)을 거친 후의 단위시간 당 물의 염도(C_{wi})와 흙의 염도(C_{si})는 다음과 같다.

$$C_{wi} = \frac{\Delta C}{W_w / \Delta t} = \frac{\Delta C}{(r_w \cdot V_w) / \Delta t} = \frac{\Delta C}{V_w / \Delta t} = \frac{\Delta C}{Q} \quad (2)$$

$$C_{si} = \frac{\Delta C}{W_s} = \frac{\Delta C}{(r_d \cdot V_s)} \quad (3)$$

여기서, r_d : 흙의 건조단위중량(gf/cm^3)

r_w : 물의 단위중량(gf/cm^3)

W_w : 물의 중량(gf)

V_w : 물의 체적(cm^3)

W_s : 흙의 건조중량(gf)

V_s : 흙의 체적(cm^3)

따라서, 첫 단계(i)를 통과한 다음 단계(i+1)에서의 단위시간 당 물과 흙의 염분량은 다음과 같다.

$$C_{w(i+1)} = \frac{C_{wi} \cdot Q_i + \Delta C}{Q_{i+1}} \quad (4)$$

$$C_{s(i+1)} = \frac{C_{si} \cdot r_d \cdot V_{si} - \Delta C}{r_d \cdot V_{s(i+1)}} \quad (5)$$

Fig. 7(a)는 흙의 단위탈염량과 흙의 염도와의 관계를 나타낸다. 염도가 높은 흙일 수록 단위탈염량은 증가하며, 마찬가지로 유입되는 물의 염도가 낮을수록 단위탈염량은 증가한다. Fig. 7(b)는 유입되는 물의 염도가 높을수록 단위탈염량은 감소하고, 마찬가지로 흙의 염도가 낮아질수록 단위탈염량이 감소하는 것을 보여준다.

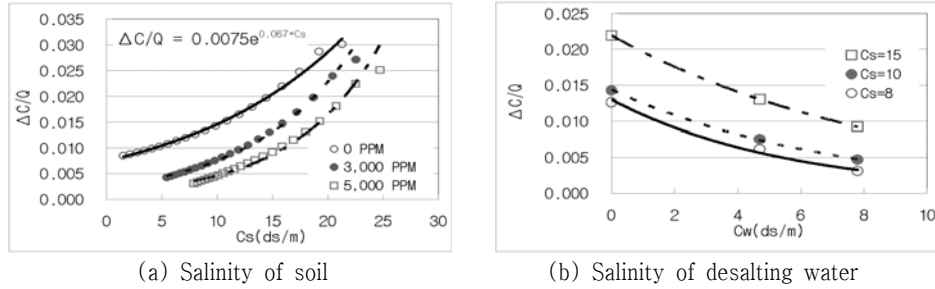


Fig. 7 Unit quantity of desalting with salinity of soil and desalting water

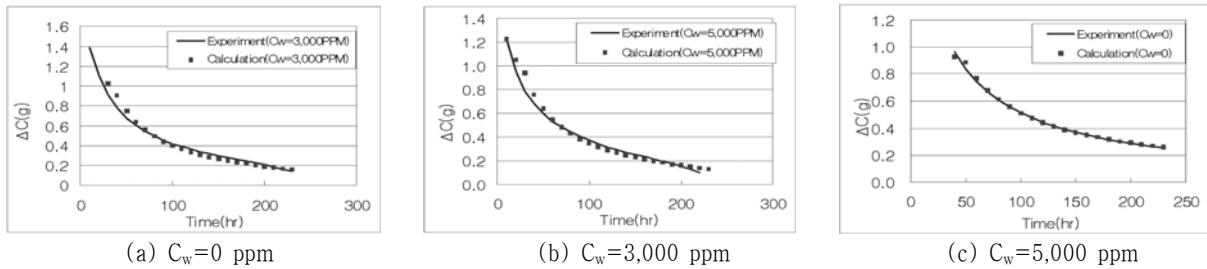


Fig. 8 Comparison of results between calculation and experiment

이 결과를 바탕으로 아래와 같은 상관식을 도출할 수 있다.

$$\Delta C = (0.987e^{0.06C_w}) \cdot (0.0075e^{0.067C_s}) \cdot \left(1 - \frac{C_w}{C_s}\right)^{0.4} \cdot Q \quad (6)$$

$$= (0.0074e^{(0.06C_w + 0.067C_s)}) \cdot \left(1 - \frac{C_w}{C_s}\right)^{0.4} \cdot Q \quad (7)$$

여기서, ΔC : 탈염량(g), C_w : 물의 염도(ds/m)
 C_s : 흙의 염도(ds/m),
 Q : 유량(cm^3/sec)
 단, $C_w/C_s \leq 1$

여기서, C_w/C_s 의 값은 1을 넘을 수 없으며, 1보다 클 경우 $(1 - C_w/C_s)^{0.4}$ 의 값은 0.1로 가정한다. 상기 도출된 제염상관식으로 계산된 흙 속의 염분 탈염량을 실험치와 비교하여 보았을 때, 물의 염도가 0, 3,000 (4.7), 5,000 ppm (7.8 ds/m)일 때, Fig. 8에서 보는 바와 같이 계산치가 실험치와 비교적 잘 일치하는 것으로 검증되었다.

3. 제염 기간 예측

실내모형실험 결과에 따라 제염 상관식을 추정한 후 이를 토대로 수치해석을 실시하여 심도별, 위치별 염도 변화와 제염

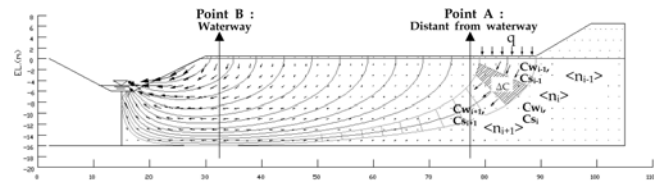


Fig. 9 Numerical modelling using seepage analysis

기간을 예측하고자 한다. 지반 내 물의 흐름 특성을 파악하고자 침투류해석을 실시하고, 제염 상관식을 적용하여 지반 내 염도의 변화 특성을 파악한다.

식(7)을 Fig. 9의 수치해석 모델링에 적용하여 위치별로 제염기간을 예측하였다. 위치는 배수로에서 50 m 떨어진 곳, 배수로에서 가까운 곳 두 위치를 검토하였다. 원지반 흙의 초기 염도는 30 ds/m, 표층에서 유입되는 물의 염도는 0 ds/m로 검토하였다. 지하수위는 표층에 상시 유지되고 있어 물은 관개나 강우 등으로 상시 공급되는 조건이며, 목표 염도는 30 ds/m의 10 %인 3 ds/m로 본다.

첫 번째로, 배수로측에서 50 m 떨어진 A지점의 해석 결과, 목표염도 이하로 흙의 염도가 낮아지는 시간은, 심도 0.5 m는 0.4년, 심도 2 m는 11.2년, 심도 4 m는 23.2년, 심도 6 m는 33.9년이 걸리는 것으로 나타났다. 두 번째로, 배수로측 B지점의 해석 결과, 흙의 염도가 목표 염도 이하로 떨어지는데 걸리는 시간은, 심도 0.5 m는 0.1년, 심도 1.5 m는 1년, 심도 3 m는 2.3년, 심도 4.5 m는 3.7년, 심도 6 m는 9.1년이 걸리는

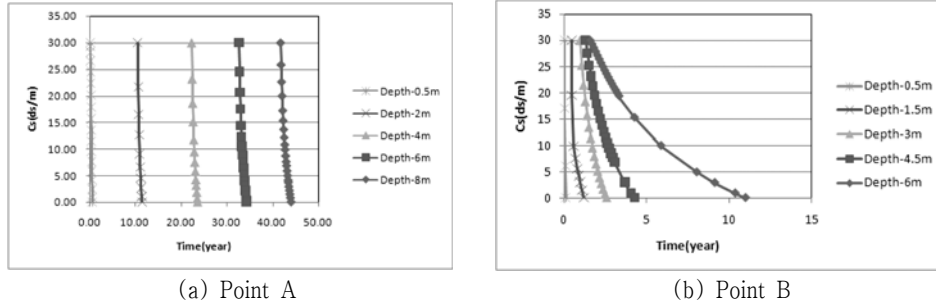


Fig. 10 Results of numerical analysis (time of desalination)

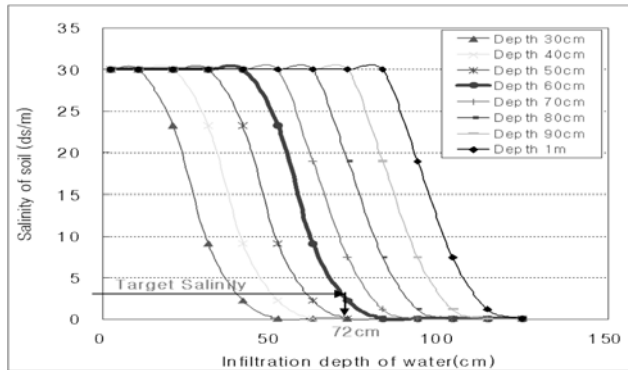


Fig. 11 Results of numerical analysis (Needed quantity of desalting water)

것으로 나타났다. 이 지점은, 2년이 경과하면 작물의 근구역과 작물생육에 영향을 미치는 심도 이상의 4 m 지점까지는 목표 염도 이하로 흙의 염도가 떨어진다고 볼 수 있으며, A지점에 비해 제염에 걸리는 시간이 10~25년가량 짧음을 알 수 있다 (Fig. 10).

그리고, 1 m 이내의 일반적인 토양층에서는 Fig. 11과 같이 깊이 60 cm까지 초기 염도 대비 10 % 이하로 제염이 이루어지기 위해서는 72 cm 이상, 즉 80 cm의 침투수량이 필요한 것으로 분석되었다.

한편, Hoffman (1980)은 세계 각지로부터 얻은 포장 실험 자료를 기초로 하여 1차원적 용탈하의 염류이동 효율에 대한

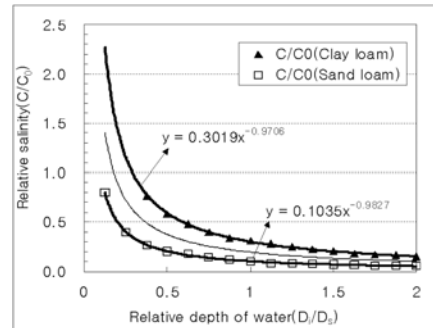


Fig. 12 Rate of salinity vs. rate of water depth (Hoffman, 1980)

경험식을 제시하였다. Fig. 12와 같이, 침투수가 전 단면적에 균등하게 침투한다고 가정하였을 때, 토양의 종류별로 목표 도달 깊이에 대한 침투수의 깊이의 비와 초기 토양 염도에 대한 상대 토양 염도비의 관계를 통해 필요 침투수량을 개략적으로 구할 수 있다. 예를 들어, 사질토 (사양토)의 경우 목표 상대염 농도를 0.1 (초기염도 20 ds/m ⇒ 목표 염도 2 ds/m)로 본다면, 이는 초기 염농도 대비 10 %이하로 제염하는 것으로, 이때 상대 물깊이의 비는 1.0이 된다. 즉, 토양 60 cm깊이까지 초기 염도대비 10 %이하로 제염시키고자 한다면, 60 cm 이상의 담수가 침투되어야 한다. Hoffman의 실험결과는 염도가 0인 담수를 토양에 침투시켜서 포장답의 침투수량과 제염 가능토심과의 관계를 구한 것이므로, 본 연구의 침투수의 염분

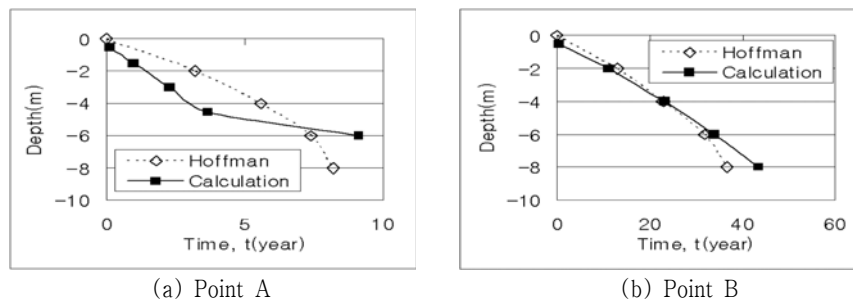


Fig. 13 Comparison of the results with Hoffman method

농도가 0인 경우와 비교하였다.

본 예측결과를 Hoffman의 경험적인 방법과 비교를 한 결과, 배수로측과 같이 유속이 빠른 곳은 Fig. 13(b)와 같이 제염 예측 기간이 0~2년 정도 다소 차이를 보이고 있으나, 배수로측에서 먼 곳에서는 Fig. 13(a)와 같이 유사한 결과를 나타내어, 포화상태 흙의 제염예측에 적용 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 새만금 간척지 포화상태 흙의 제염기간을 예측하기 위한 연구로써 결론은 다음과 같다.

1. 현장 제염 현상을 파악하기 위한 실내모형실험을 실시한 결과, 주입되는 물의 염도가 높을수록 흙으로부터 제염되는 탈염량이 적고, 시험에 사용된 흙의 염도가 높을수록 탈염량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이로부터 제염 상관식을 도출하여 수치해석에 적용하였다.
2. 흙의 위치별, 심도별로 시간에 따른 염도 변화를 예측하고자 수치해석을 실시한 결과, 흙의 염도가 초기 염도 대비 10 %까지 떨어지려면 배수로에서 50 m 떨어진 곳에서는 심도 2 m에서 시간이 11년이 소요되고, 반대로 배수로측은 심도 1.5 m에서 1년이 소요된다.
3. 깊이 60 cm의 토양을 초기 염도 대비 10 % 이하로 염도를 떨어트리기 위해서는 80cm의 침투수량이 필요한 것으로 검토되었다.
4. Hoffman의 경험적인 방법과 비교한 결과, 유사한 결과를 보여 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.
5. 본 해석 결과는 새만금 현장의 흙의 조건에 대한 제염특성을 시험적으로 구하여 수치해석을 통한 제염기간을 예측한 것으로, 타 지구에 적용하기 위해서는 그 지구의 흙의 조건별 제염특성을 규명하는 시험이 필요하며, 앞으로 범용화를 위해서는 보다 더 많은 조사시험과 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Son, J. W., 2001. Prediction Techniques of Desalination in Reclaimed Tidelands, 151-184. Jeonju, Jeonbuk: Chonbuk University.
2. Jeong, Y. S., 2002. A Management Guideline for Soil and Irrigation Water in Reclaimed Saline lands, 31-80. Chuncheon, Gangwon: Kangwon University.
3. Ahn, Y., 2004. Studies on the Changes of Soil Characteristics and Utilization after Tidal Land Reclamation, 53-67, Ansan, Kyeonggi: Rural Rresearch Institute: Korea Rural Community Corporation.
4. Son, Y. M., 2007. Multiple Utilization of Tidal Reclaimed Farmland for Advanced Agriculture, 34-53. Ansan, Kyeonggi: Rural Rresearch Institute: Korea Rural Community Corporation.
5. Jeong, H. I., 1998. A characteristic for a movement of contaminant, Ch. 4. In *Geoenvironmental Engineering*, 171-219. Seoul: Kumiseokwan.
6. Hoffman, G. J., 1980. Guidelines for the reclamation of salt affected soils, 2nd Inter-american Conf. on *Salinity and Water Management Technology*, 11-12. Juarez, Mexico.