

간척지 토양의 제염과정 중 교환성 나트륨 백분율 분석

Analysis of Exchangeable Sodium Percentage During Desalinization of Reclaimed Tidal Lands

구 자 웅*, 최 진 규*, 손 재 권*
Koo, Ja Woong, Choi, Jin Kyu, Son, Jae Gwon

Abstract

This study was performed in order to produce the basic data for the estimation of water requirements for desalinization and developing prediction techniques of desalinization to be applicable in the beginning of tidal land reclamation, through analyzing changes of the exchangeable sodium percentage during the desalinization of reclaimed tidal lands.

In this study, the desalinization experiments were carried out by two water management practices, namely, the leaching method by subsurface drainage and the rinsing method by surface drainage, using 5 soil samples collected from 4 tidal land reclamation projects.

Regression equations were obtained in order to investigate the changes of exchangeable sodium percentage during the desalinization of reclaimed tidal lands and to estimate water requirements for desalinization.

The results obtained from this study were summarized as follows:

1. According to USDA Salinity Laboratory classification system of salt affected soils, the reclaimed tidal land soils used in this study were saline-sodic soils with the high electrical conductivity and the high exchangeable sodium percentage.

2. With the increase of the water requirements for desalinization, the exchangeable sodium percentage was decreased with high degree of relationships and the desalinization effects were remarkable in both the leaching method and the rinsing method.

3. In case of the leaching method, the exchangeable sodium percentage had been reduced below the classification value of salt affected soils when the depth

* 전북대학교 농과대학 (농업과학기술연구소)

키워드 : 간척지 토양, 제염, 교환성 나트륨 백분율, 수세법, 침출법, 제염효과, 제염용수량

of water leached per unit depth of soil (D_{wl}/D_s) was 0.2 in the model experiments and 0.3 in the lysimeter experiments, and the desalinization effects showed a tendency to be much the same in each treatment.

4. In the model experiments by the rinsing method, the exchangeable sodium percentage had been reduced below the classification value of salt affected soils when the depth of water applied per unit depth of soil (D_{wa}/D_s) was 2.5 in both permeable soils and impermeable soils. In the lysimeter experiments by the rinsing method, it was estimated that the exchangeable sodium percentage could be reduced below the classification value of salt affected soils when the depth of water applied per unit depth of soil would be 3.0 in permeable soils and 4.5 in impermeable soils.

5. The leaching method has the merits of saving water requirements for desalinization and the convenience of desalinization works in permeable soils, but the demerit of a long period for desalinization. Also desalinization works would be next to impossible in impermeable soils through the leaching method.

On the other hand, the rinsing method has the advantage of a short period for desalinization regardless of permeability, but the desalinization of subsoil would be difficult and the water requirements for desalinization would require 10 times more than those of the leaching method.

I. 서론

우리나라 서남해안의 풍부한 간척자원을 효율적으로 활용하기 위한 방법의 일환으로, 개발 초기 고염도 간척지를 농경지로 조성하여 과학적인 간척영농기술을 개발하고, 수익성이 높은 간척영농을 조기에 실현하여 간척농지의 농업생산성을 향상시키기 위해서는 작물의 정상생육을 가능하게 할 수 있는 제염대책의 수립이 무엇보다도 중요한 최우선 과제라고 할 수 있다. 이를 위해서는 제염방법에 대한 체계적인 이론을 정립하고, 실내 모형시험과 현장 포장시험을 통한 제염기술 및 제염추정모형을 개발하여 간척지의 제염예측기법을 구축하고, 제염예측기법을 적용하여 개발초기 고염도 간척지의 제염대책을 수립하는 것이 합리적인 방법이라고 생각한다.

대체적으로 가용성염류와 교환성 나트륨을

과다하게 함유하고 있는 간척지 토양에서 가용성염류는 토양용액의 삼투압을 증가시키고 교환성 나트륨은 알칼리성을 증가시키는 주된 원인이 되어 작물생육의 큰 저해요인이 되고 있으며, 또한 교환성 나트륨은 토양입자의 분산현상과 밀접한 관계가 있어 투수성에 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 가용성염류함량은 포화추출액의 전기전도도, 교환성 나트륨 함량은 양이온교환용량에 대한 교환성 나트륨 백분율, 토양반응은 pH로 표시하고 있으며, 이들 전기전도도, 교환성 나트륨 백분율 및 pH를 지표로 하여 간척지토양과 같은 염해도양을 분류하고 있다.⁹⁾

우리나라 개발초기 고염도 간척지의 조기영농을 실현하기 위한 제염대책을 수립하기 위하여 전북대학교 농공학과에서는 농림부의 지원으로 1996년 10월부터 현재까지 “간척지 제염예측기법 개발”⁴⁾에 관한 연구를 수행하고 있다.

'97년도에는 서남해안의 간척 예정지, 시행 지구, 준공지구 중 그 대표성이 있다고 판단되는 11개 지구 34지역에서 총 306점의 토양시료를 채취하여 토양의 이화학적 성질을 분석하고 간척지 토양의 특성을 규명하였으며, 토성별 분포와 기존의 제염자료를 토대로 하여 5가지 토양으로 분류하였다⁴⁵⁾.

'98년도에는 실내모형시험을 위한 시험장치를 제작 설치하고 토양 특성별로 5종의 공시토양을 선정하여 제염시험을 실시하였으며, 지표배수, 지하배수, 지표·지하배수 병용 물관리방법에 의한 제염효과, 토양개량제처리에 의한 제염효과, 물관리방법 및 토양개량제 처리별 제염효과 비교분석, 염분농도의 시간적 변화, 염분집적현상, 토양염분의 용탈과정 분석 등 제염과정중 염분거동해석, 제염방법별 제염용수량 산정, 수리전도도의 시간적 변화 등에 대하여 분석하였다⁴⁾.

'99년도에는 제염시험을 위한 대형 라이시미터(Lysimeter) 시험장치를 설치하고, 전년도 실내모형시험에서 사용한 공시토양과 토성이 같은 5종의 토양시료를 새만금지구(2개소), 부창지구, 고흥지구 및 화옹지구 등 5개소에서 채취 운반하여 시험구를 정비한 후 제염시험을 실시하였으며, 시험결과를 이용하여 제염과정중 염분농도의 변화 및 염분거동, 염분집적현상, 수리전도도의 시간적 변화 및 제염기간, 제염방법별 제염효과 및 제염용수량 등에 대하여 분석하였다.

본 논문에서는 '98년도에 실시한 실내 모형시험과 '99년도의 라이시미터 제염시험에서 얻은 시험자료를 이용해서 제염방법 및 토성별로 제염과정중 제염용수량의 증가에 따른 교환성 나트륨 백분율의 변화를 분석하고, 교환성 나트륨 백분율을 기준으로 한 제염효과를 검토하여 개발초기 고염도 간척지의 제염에 필요한 제염용수량을 추정함과 아울러 합리적인 제염대책을 수립하기 위한 제염예측기법을

개발하는데 기초자료를 제공하고자 한다.

제염시험을 통한 간척지 토양의 제염효과 분석에는 제염과정중 전기전도도, 교환성 나트륨백분율 및 pH의 변화를 종합적으로 고찰하여 염해기준치 이하로 될 때까지의 제염용수량, 제염기간 추정 등이 포함되어야 할 것이다. 그러나 논문 분량이 많아 하나의 논문으로 작성하지 못하고 교환성 나트륨 백분율만을 기준으로 한 제염효과를 분석하였고, 전기전도도 및 pH를 기준으로 한 제염효과는 별도로 분석하였으며, 본 연구결과를 포함해서 최종 결론을 얻을 계획이다.

II. 재료 및 방법

1. 공시토양

가. 제염시험용 공시토양의 선정

“간척지 제염예측기법 개발”에 관한 연구로 '97년도에 조사한 간척사업지구 중에서 토양의 이화학적 특성이 5가지 토양 분류⁵⁾ 범위내에 있는 대표적인 지역으로 전북 새만금지구(S1 및 S2), 전북 부창지구(S3), 경기 화옹지구(S4), 전남 고흥지구(S5) 등에서 5개소를 선정하여 채취한 간척지 토양을 실내 모형시험 및 라이시미터 제염시험의 공시토양으로 사용하였다.

나. 공시토양의 토양특성 분석

1) 토양의 물리적 특성

가) 용적밀도, 입자밀도, 공극율 및 포화도
미국농무성(USDA)의 토양분석법에 의거 Core sample을 사용하여 용적밀도를 구하고 Pycnometer를 이용한 직접측정법으로 입자밀도를 구하여 공극률을 산정하였으며, 포화도는 토양포화반죽 수분함유율로 표시하였다⁹⁾.

나) 입도분석

비중계 및 체분석법에 의해서 입도분석을

실시하고, 미국농무성의 입도조성에 의한 삼각 분류법에 의거 토성을 분류하였다.

2) 토양의 화학적 특성

가) 교환성 양이온 함량

EDTA 적정법 및 염광분석법으로 공시토양에 함유되어 있는 Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} 등의 주요 양이온함량을 측정하였으며, Ammonium acetate 용액에 의하여 추출한 추출성 양이온 함량으로부터 포화추출액의 가용성 양이온 함량을 빼어서 교환성 양이온함량을 산정하였다.

나) 양이온 교환용량(CEC) 및 교환성 나트륨 백분율(ESP)

AOAC-ASTM 방법에 의하여 양이온 교환용량을 측정하였으며, 교환성 나트륨 함량을 양이온교환용량으로 나누어 교환성 나트륨 백분율을 구하였다.

다) 전기전도도(EC) 및 pH

전기전도도계 및 pH-meter를 사용하여 공시토양의 포화추출액으로부터 전기전도도 및 pH를 측정하였다.

2. 실내 모형시험장치 및 라이시미터 제염 시험시설

가. 실내 모형시험장치 제작 및 설치

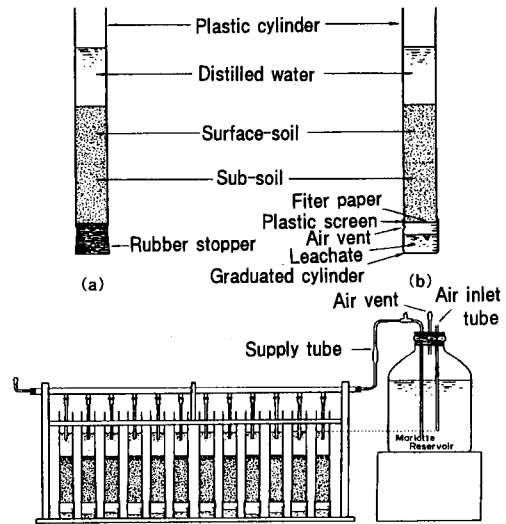
1) 침출법에 의한 제염시험에 사용하기 위하여 수위를 일정하게 유지할 수 있도록 제작한 용량 90 l의 수조(Mariotte reservoir) 9조를 설치하였으며, 각각의 수조에는 제염용 공시토양을 넣은 12개의 실린더(직경 6.6cm, 길이 100cm)에 연결된 급수관을 부착하였다<Fig. 1> 참조.

2) 총 90개의 침출법용 실린더 한 끝에는 제염중 토양의 유출을 막기 위한 여과지를 부착할 수 있도록 35개의 구멍이 뚫려 있는 플라스틱 스크린을 설치하였다.

3) 수세법에 의한 제염시험장치로는 한 끝을

고무마개로 막은 총 30개의 실린더를 3조의 지지대에 배치하였다.

4) 제염시험방법 처리별로 12조의 모형시험장치 지지대(15cm×120cm×90cm[B×L×H])를 제작하여 설치하였다.



(a) Cylinder for rinsing method

(b) Cylinder for leaching method

<Fig. 1> Arrangement of apparatus for desalinization experiments

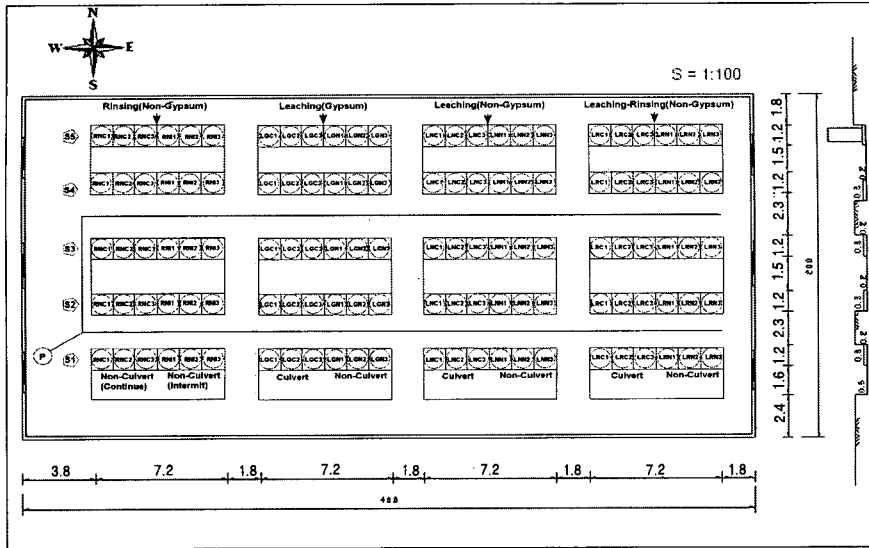
나. 포장 라이시미터 제염시험시설 설치 및 배치

1) 시험포장에 라이시미터를 설치하기 위하여 면적 800m²의 3연동 비닐하우스를 축조하였다.

2) 비닐하우스내에 제염용수 공급용 관정 1공을 굴착하였고, 각각의 라이시미터에 급·배수시설을 하였다.

3) 직경 1.0m, 높이 1.1m인 원통형 라이시미터 120조를 설치하였으며, 각각의 라이시미터에는 지표·지하배수구 및 침출수 채취용기를 부설하였다.

4) 45조의 라이시미터에 지하배수용 암거를 설치하였고, 60조의 라이시미터에 염분농도 및 토양수분함량 측정용 실린더를 부설하였다.



(Fig. 2) Arrangement of lysimeters for desalination experiments

5) 시험포장에 제염시험을 위한 라이시미터를 토성, 제염방법, 토양개량제처리, 암거처리별로 <Fig. 2>와 같이 배치하고, 시험결과 분석 및 DB구축에 편리하게 사용할 수 있도록 <Table 1>과 같이 각 시험구에 토양분류 코드(Code)를 부여하였다.

3. 제염시험

가. 실내 모형시험

1) 침출법(Leaching method) : 침출법에 의한 제염시험의 경우는 제염과정중 투수성이 현저하게 감소하는 것을 방지하고 제염효과를 증대시키기 위해 토양개량제로서 석고를 사용하는 석고처리구와 사용하지 않는 석고무처리구로 나누어 실시하였다.

가) 석고처리구의 경우 석고사용량은 Beyce의 석고소요량 산출식⁷⁾을 적용하여 결정하고, 석고무처리의 경우는 공시토양만을 사용하였다.

나) 한 종류의 토양시료를 6개의 실린더에 각각 토심이 40cm 되도록 넣었다.

다) 수조(Mariotte reservoir)를 이용하여 실

린더에 수심 20cm가 유지되도록 제염용수를 공급하면서 토양을 통해 침투시켰다.

라) 적당량의 침출수(1~4회는 약 70cm³, 5~8회는 약 140cm³ 정도)가 생기면 경과시간과 침출수량을 측정하였다.

마) 매회마다 염분농도 분석용 침출수와 토양시료를 채취하였다.

바) 위와 같은 3반복 시험과정을 8회 연속하여 실시하였다.

2) 수세법(Rinsing method) : 수세법에 의한 제염방법은 지표배수에 의한 것이기 때문에 토양의 투수성과는 무관하여 토양개량제 처리에 의한 제염효과를 기대할 수 없으므로, 토양개량제를 사용하지 않은 석고무처리구에서만 제염시험을 실시하였다.

가) 한 종류의 토양시료를 6개의 실린더에 각각 토심이 40cm 되도록 넣었다.

나) 실린더에 수심이 20cm 되도록 제염용수를 공급하였다.

다) 실린더를 상하로 10~20회 정도 흔들어 뒤섞은 다음 토양입자의 침전과 토양내의 염분용탈을 위하여 24~48시간 동안 가만히 놓

(Table 1) Soil classification codes with soil textures and desalination methods

Soil sample	Desalination method		Leaching method				Leaching · Rinsing method	
	Rinsing method		Gypsum		Non-gypsum		Non-gypsum	
	Continuous ponding	Intermittent ponding	Culvert	Non-culvert	Culvert	Non-culvert	Culvert	Non-culvert
S1	S1RNC1	S1RNI 1	S1LGC1	S1LGN1	S1LNC1	S1LNN1	S1LRC1	S1LRN1
	S1RNC2	S1RNI2	S1LGC2	S1LGN2	S1LNC2	S1LNN2	S1LRC2	S1LRN2
	S1RNC3	S1RNI3	S1LGC3	S1LGN3	S1LNC3	S1LNN3	S1LRC3	S1LRN3
S2	S2RNC1	S2RNI1	S2LGC1	S2LGN1	S2LNC1	S2LNN1	S2LRC1	S2LRN1
	S2RNC2	S2RNI2	S2LGC2	S2LGN2	S2LNC2	S2LNN2	S2LRC2	S2LRN2
	S2RNC3	S2RNI3	S2LGC3	S2LGN3	S2LNC3	S2LNN3	S2LRC3	S2LRN3
S3	S3RNC1	S3RNI1	S3LGC1	S3LGN1	S3LNC1	S3LNN1	S3LRC1	S3LRN1
	S3RNC2	S3RNI2	S3LGC2	S3LGN2	S3LNC2	S3LNN2	S3LRC2	S3LRN2
	S3RNC3	S3RNI3	S3LGC3	S3LGN3	S3LNC3	S3LNN3	S3LRC3	S3LRN3
S4	S4RNC1	S4RNI1	S4LGC1	S4LGN1	S4LNC1	S4LNN1	S4LRC1	S4LRN1
	S4RNC2	S4RNI2	S4LGC2	S4LGN2	S4LNC2	S4LNN2	S4LRC2	S4LRN2
	S4RNC3	S4RNI3	S4LGC3	S4LGN3	S4LNC3	S4LNN3	S4LRC3	S4LRN3
S5	S5RNC1	S5RNI1	S5LGC1	S5LGN1	S5LNC1	S5LNN1	S5LRC1	S5LRN1
	S5RNC2	S5RNI2	S5LGC2	S5LGN2	S5LNC2	S5LNN2	S5LRC2	S5LRN2
	S5RNC3	S5RNI3	S5LGC3	S5LGN3	S5LNC3	S5LNN3	S5LRC3	S5LRN3

아 두었다.

라) 일정시간후 표면부유액(배출수)의 부피를 측정하고, 염분농도 분석용 배출수와 토양시료를 채취하였다.

마) 위와 같은 3반복 시험과정을 8회 연속하여 실시하였다.

나. 포장 라이시미터 제염시험

1) 침출법(Leaching method) : 실내 모형시험에서와 같이 제염과정중 투수성이 현저하게 감소하는 것을 방지하고 제염효과를 증대시키기 위한 석고처리구와 석고를 사용하지 않는 석고무처리구로 나누고, 각 처리구를 암거설치유무에 따라 암거구와 무암거구로 구분하여 제염시험을 실시하였다.

가) 석고처리 침출법의 경우는 Beyce의 석

고소요량 산출식⁷⁾에 의해 산정한 석고를 토양에 혼합하고, 석고무처리 침출법의 경우는 공시토양만을 사용하였다.

나) 한 종류의 토양시료를 6개의 라이시미터에 각각 토심이 90cm가 되도록 넣었다.

다) 라이시미터에 수심 15cm가 되도록 제염용수를 공급하여 토양을 통해 침출시켰다.

라) 적당량의 침출수(매회 약 25 l 정도)가 생기면 공급수량(감수심)과 경과시간 및 침출수량을 측정하였다.

마) 매회마다 염분농도 분석용 침출수와 토층별 토양시료를 채취하였다.

바) 위와 같은 시험과정을 3반복하여 10회 연속 실시하였다.

2) 수세법(Rinsing method) : 실내 모형시험에서와 같이 수세법에 의한 제염방법은 토양

개량제 처리에 의한 제염효과를 기대할 수 없으므로, 토양개량제를 사용하지 않은 석고무처리구에서만 연속담수구와 간단담수구로 나누어 제염시험을 실시하였다.

가) 한 종류의 토양시료를 6개의 라이시미터에 각각 토심이 90cm가 되도록 넣었다.

나) 라이시미터에 수심이 15cm가 되도록 제염용수를 공급하였다.

다) 라이시미터내의 포토층 토양을 20~30cm 깊이로 경운한 후 3~4회 정도 충분히 썩레질하고, 토양입자의 침전과 토양내의 염분 용탈을 위하여 얼마 동안 가만히 놓아 두었다.

라) 썩레질 24~48시간 후에 라이시미터내의 수심을 측정하고 배출수를 채취한 다음 완전히 배수시키고 염분농도 분석용 토양시료를 토층별로 채취하였다.

마) 연속담수구에서는 약 1주일 간격으로 제염용수를 공급하며, 간단담수구에서는 배수후 포토층을 건조시켜 어느 정도 염분이 집적된 다음에 제염용수를 공급하였다.

바) 위와 같은 시험과정을 3반복하여 10회 연속 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 공시토양의 특성

본 시험에 사용된 공시토양의 물리적 성질은 <Table 2>에서 보는 바와 같이 용적밀도, 입자밀도, 공극률 및 포화도가 각각 1.31~1.37Mg/m³, 2.63~2.69Mg/m³, 48.5~50.6%, 40.7~69.7% 이었으며, 입도분석결과 S1 토양은 미사질토양(Si), S2~S5 토양은 미사질양토(SiL)로 조사되었다.

한편 화학적 성질은 <Table 3>에 나타난 바와 같이 양이온 교환용량(CEC)은 9.2~14.4cmol/kg이었고, 포화추출액의 전기전도도(EC), 교환성 나트륨 백분율(ESP) 및 pH는 각각 24.6~31.2dS/m, 40.2~47.3%, 7.5~7.9로서 USDA Salinity Laboratory의 염해도양분류법⁹⁾에 따르면 어느 경우나 고염도 염류알칼리토양에 속하였다.

2. 침출법에 의한 제염시험 과정중 교환성 나트륨 백분율의 변화

(Table 2) Physical properties of soil samples used in desalinization experiments

Soil sample	Bulk density (Mg/m ³)	Particle density (Mg/m ³)	Porosity (%)	Saturation percentage (%)	Mechanical composition (%)			Soil texture class
					Sand	Silt	Clay	
S1	1.37 (1.36)	2.66 (2.64)	48.5 (48.5)	54.5 (60.5)	6.9 (7.7)	84.0 (86.2)	9.1 (6.1)	Si (Si)
S2	1.34 (1.35)	2.69 (2.65)	50.2 (49.1)	47.8 (51.3)	24.6 (25.4)	68.5 (69.2)	6.9 (5.4)	SiL (SiL)
S3	1.36 (1.37)	2.67 (2.66)	49.1 (48.5)	40.7 (42.9)	41.8 (44.4)	51.0 (50.7)	7.2 (4.9)	SiL (SiL)
S4	1.35 (1.31)	2.65 (2.65)	49.1 (50.6)	69.7 (68.5)	4.2 (4.6)	83.8 (81.3)	12.0 (14.1)	SiL (SiL)
S5	1.35 (1.34)	2.64 (2.63)	48.9 (49.0)	64.3 (63.4)	16.3 (17.2)	72.1 (71.3)	11.6 (11.5)	SiL (SiL)

Upper data obtained from soil samples used in lysimeters (1999)
(Lower) data obtained from soil samples used in cylinders (1998)

<Table 3> Chemical properties of soil samples used in desalinization experiments

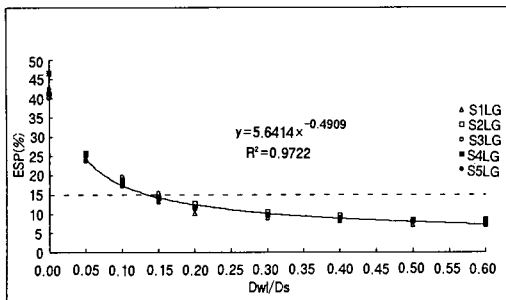
Soil sample	Exchangeable cation (cmol _e /kg)				CEC (cmol _e /kg)	ESP (%)	EC (dS/m)	pH
	Ca	Mg	Na	K				
S1	1.1 (1.2)	1.6 (1.8)	3.9 (4.1)	0.9 (0.9)	9.2 (9.9)	42.4 (41.4)	24.6 (26.1)	7.7 (7.6)
S2	1.0 (1.3)	1.8 (1.9)	4.4 (3.9)	1.1 (1.1)	9.6 (9.5)	45.8 (41.1)	27.3 (25.7)	7.8 (7.7)
S3	1.1 (1.2)	1.8 (1.8)	4.1 (3.7)	1.1 (1.0)	9.5 (9.2)	43.2 (40.2)	25.7 (25.0)	7.7 (7.5)
S4	1.8 (1.3)	2.4 (2.4)	6.2 (6.7)	1.5 (1.5)	13.1 (14.4)	47.3 (46.5)	27.7 (31.2)	7.9 (7.8)
S5	1.6 (2.1)	2.3 (2.2)	5.2 (5.7)	1.5 (1.8)	12.2 (13.4)	42.6 (42.5)	25.1 (26.4)	7.8 (7.8)

Upper data obtained from soil samples used in lysimeters (1999)
 (Lower) data obtained from soil samples used in cylinders (1998)

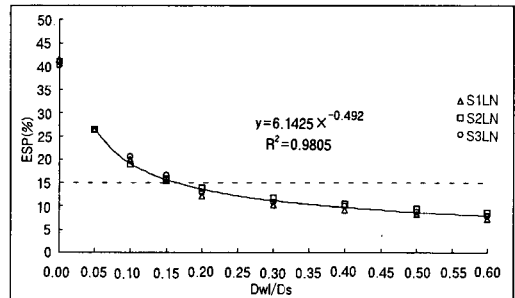
가. 실내 모형시험 결과

석고처리 침출법 및 석고무처리 침출법에 의해 토성별로 제염시험을 실시한 실내 모형 시험 결과를 분석하여 제염진행중 토양의 교환성 나트륨 백분율(ESP)의 변화를 토성 및 처리구별로 도시하면 <Fig. 3> 및 <Fig. 4> 와 같다.

그림에서 Dwl/Ds는 제염토양 깊이당 침출수심의 비율이며, 여기서 제염토양 깊이는 실린더내의 토심인 40cm로 보았고 매회의 침출



<Fig. 3> Changes of exchangeable sodium percentage(ESP) with depth of water leached per unit depth of soil(Dwl/Ds) : Leaching method with gypsum treatment, 1998



<Fig. 4> Changes of exchangeable sodium percentage(ESP) with depth of water leached per unit depth of soil(Dwl/Ds) : Leaching method with gypsum non-treatment, 1998

수심은 Dwl/Ds=0.05~0.10 정도가 되도록 하였다. 초기치는 제염전 토양 포화추출액의 교환성 나트륨 백분율(ESP)이며, 그 외 토양의 ESP 측정자료는 3반복 시험 측정치의 평균값이다. 석고무처리 침출법의 경우 S4 및 S5는 S1~S3에 비하여 점토질이 많은 투수불량 토양으로 침출이 불가능하여 시험자료를 얻지 못하였다.

침출수량이 증가함에 따라 교환성 나트륨 백분율이 변화하는 경향을 회귀분석에 의해

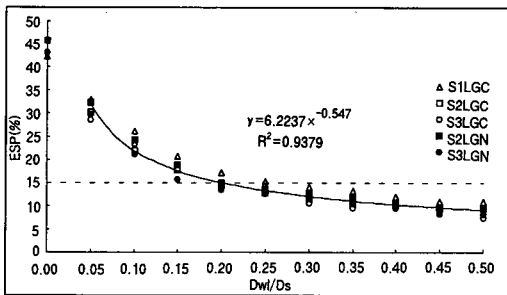
Dwl/Ds(x)와 ESP(y)관계로 나타내면, 석고처리 침출법의 경우는 (1) 식, 석고무처리 침출법의 경우는 (2) 식으로 나타났다.

$$y = 5.6414 x^{-0.4909} \quad (R^2 = 0.9722) \dots\dots(1)$$

$$y = 6.1425 x^{-0.4920} \quad (R^2 = 0.9805) \dots\dots(2)$$

<Fig. 3> 및 <Fig. 4>에서 보는 바와 같이 침출법에 의한 실내 모형시험에서 제염진행중 교환성 나트륨 백분율(ESP)은 토성이나 석고처리에 관계없이 침출수량이 증가함에 따라 초기에 Dwl/Ds=0.2 정도가 될 때까지는 상당히 큰 비율로 감소하다가 그 후에는 감소율이 점점 완화되었으며 모든 처리구에서 경향이 비슷하게 나타났다.

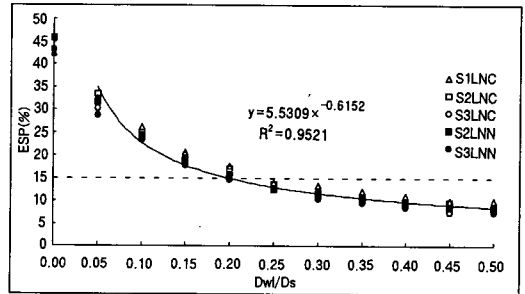
ESP가 USDA Salinity Laboratory의 염해도양의 분류기준치인 15% 이하⁹⁾로 감소될 때까지 필요한 침출수량은 Dwl/Ds=0.2 정도로 추정되었다. 이 경우 토양의 교환성 나트륨 백분율은 입도조성에 따라서 약간의 차이가 있었지만, 석고처리별로 살펴 보면 석고처리구에서 ESP = 10.2~12.6%, 석고무처리구에서 ESP= 12.1~13.8%로서 염해도양분류 기준치 이하로 조사되었다.



<Fig. 5> Changes of exchangeable sodium percentage(ESP) with depth of water leached per unit depth of soil(Dwl/Ds) : Leaching method with gypsum treatment, 1999

나. 포장 라이시미터 제염시험 결과

토성별로 암거구와 무암거구로 구분한 라이시미터 시험구에서 석고처리 침출법 및 석고무처리 침출법에 의한 제염시험결과를 이용하여 제염진행중 토양의 교환성나트륨백분율(ESP)의 변화를 토성 및 처리구별로 도시하면 <Fig. 5> 및 <Fig. 6>과 같다.



<Fig. 6> Changes of exchangeable sodium percentage(ESP) with depth of water leached per unit depth of soil(Dwl/Ds) : Leaching method with gypsum non-treatment, 1999

그림에서 Dwl/Ds는 제염토양 깊이당 침출수심의 비율이며, 여기서 제염토양 깊이는 표토로부터 하부 지하배수구(침출구)까지의 깊이인 70cm로 보았고 매회의 침출수심은 Dwl/Ds=0.05 정도가 되도록 하였다. 초기치는 제염전 토양 포화추출액의 교환성 나트륨 백분율(ESP)이며, 그 외 토양의 ESP는 제염진행중 토심 0, 20, 40cm인 근역토양의 평균값이고, 모든 측정자료는 3반복시험 측정치의 평균값이다.

S4 및 S5 토양은 S1~S3에 비하여 점토질이 많은 투수불량 토양으로 침출이 불가능하여 시험자료를 얻지 못하였으며, S1 토양의 무암거구에서는 초기에 약간의 침출이 있었으나 시간이 지남에 따라 투수성이 극히 낮아져서 역시 시험자료를 얻지 못하였다.

침출수량이 증가함에 따라 교환성 나트륨 백분율이 변화하는 경향을 회귀분석에 의해

Dwl/Ds(x)와 ESP(y)관계로 나타내면, 석고처리 침출법의 경우는 (3) 식, 석고무처리 침출법의 경우는 (4) 식으로 나타났다.

$$y = 6.2237 x^{-0.5470} \quad (R^2 = 0.9379) \dots\dots (3)$$

$$y = 5.5309 x^{-0.6152} \quad (R^2 = 0.9521) \dots\dots (4)$$

<Fig. 5> 및 <Fig. 6>에서 보는 바와 같이 라이시미터 제염시험에서도 실내 모형시험에서와 마찬가지로 침출법의 경우 제염진행중 교환성 나트륨 백분율(ESP)은 토성이나 석고처리 및 암거설치의 유무에 관계없이 침출수량이 증가함에 따라 초기에 Dwl/Ds=0.2 정도가 될 때 까지는 상당히 큰 비율로 감소하다가 감소율이 점점 완화되었으며 모든 처리구에서 경향이 비슷하였다.

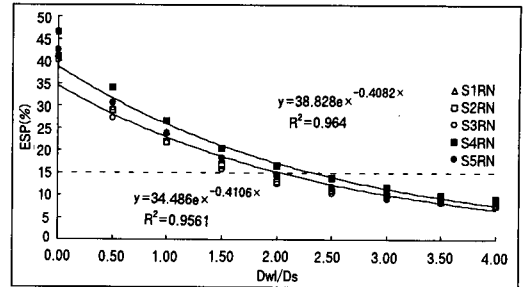
ESP가 USDA Salinity Laboratory의 염해토양의 분류기준치⁹⁾ 이하로 감소될 때까지 필요한 침출수량은 Dwl/Ds=0.3 정도로 추정되었다. 이 경우 토양의 입도조성이나 암거설치의 유무에 따라서는 약간의 차이가 있었지만, 석고처리별로 교환성 나트륨 백분율을 살펴 보면 석고처리구에서 ESP=10.5~14.1%, 석고무처리구에서 ESP=10.5~13.3%로서 염해토양분류 기준치인 15% 이하로 나타났다.

3. 수세법에 의한 제염 과정중 교환성 나트륨 백분율의 변화

가. 실내 모형시험 결과

수세법에 의해 제염시험을 실시한 실내 모형시험 결과를 분석하여 제염진행중 토양의 교환성 나트륨 백분율(ESP)의 변화를 토성별로 도시하면 <Fig. 7>과 같다.

그림에서 Dwa/Ds는 제염토양 깊이당 공급수심의 비율이며, 여기서 제염토양 깊이는 실린더내의 토심인 40cm로 보았고 매회의 공급



<Fig. 7> Changes of exchangeable sodium percentage(ESP) with depth of water applied per unit depth of soil(Dwa/Ds) : Rinsing method, 1998

수심은 Dwa/Ds=0.50 정도가 되도록 하였다. 초기치는 제염전 토양 포화추출액의 교환성 나트륨 백분율(ESP)이며, 그 외 토양의 ESP 측정자료는 3반복 시험 측정치의 평균값이다.

공급수량이 증가함에 따라 교환성 나트륨 백분율이 변화하는 경향을 회귀분석에 의해 Dwa/Ds(x)와 ESP(y)관계로 나타내면, 투수양호토양(S1~S3)인 경우는 (5) 식, 투수불량토양(S4~S5)인 경우는 (6) 식으로 나타났다.

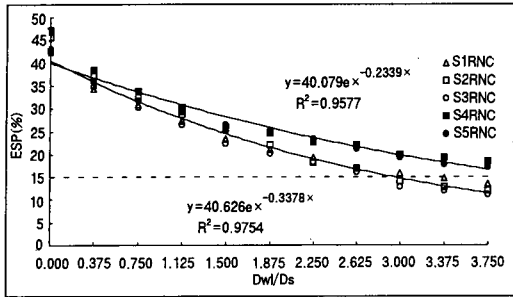
$$y = 34.486 e^{-0.4106 x} \quad (R^2 = 0.9561) \dots\dots (5)$$

$$y = 38.828 e^{-0.4082 x} \quad (R^2 = 0.9640) \dots\dots (6)$$

<Fig. 7>에서 보는 바와 같이 ESP가 염해토양의 분류기준치인 15% 이하로 감소될 때까지 필요한 공급수량은 Dwa/Ds=2.5 정도로 추정되며, 이 때 토양의 교환성 나트륨 백분율은 투수양호토양인 경우 ESP=10.5~11.8%, 투수불량토양인 경우 ESP=12.0~13.8%로서 염해토양분류 기준치 이하로 조사되었다.

나. 포장 라이시미터 제염시험 결과

포장 라이시미터 시험구에서 수세법에 의한 제염시험결과를 이용하여 제염진행중 토양의



<Fig. 8> Changes of exchangeable sodium percentage(ESP) with depth of water applied per unit depth of soil(Dwa/Ds) : Rinsing method, 1999

교환성 나트륨 백분율(ESP)의 변화를 토성별로 도시하면 <Fig. 8>과 같다.

그림에서 Dwa/Ds는 제염토양 깊이당 공급수심의 비율이며, 여기서 제염토양 깊이는 근역의 토심인 40cm로 보았고 매회의 공급수심은 Dwa/Ds=0.375 정도가 되도록 하였다. 초기치는 제염전 토양 포화추출액의 교환성 나트륨 백분율(ESP)이며, 그 외 토양의 ESP는 제염진행중 토심 0, 20, 40cm인 근역토양의 평균값이고, 모든 측정자료는 3반복시험 측정치의 평균값이다.

공급수량이 증가함에 따라 전기전도도가 변화하는 경향을 회귀분석에 의해 Dwa/Ds(x)와 ESP(y)관계로 나타내면, 투수양호토양(S1~S3)인 경우는 (7) 식, 투수불량토양(S4~S5)인 경우는 (8) 식으로 나타났다.

$$y = 40.626 e^{-0.3378x} \quad (R^2 = 0.9754) \dots\dots (7)$$

$$y = 40.079 e^{-0.2339x} \quad (R^2 = 0.9577) \dots\dots (8)$$

<Fig. 8>에서 보는 바와 같이 포장 라이시미터 시험구에서 수세법에 의한 제염시험이 종료된 Dwa/Ds=3.75일 때 토양의 교환성 나트륨 백분율은 투수양호토양인 경우 ESP=11.

1~13.5% 이었고, 투수불량토양인 경우 ESP=17.2~ 18.5% 이었다. ESP가 염해토양의 분류기준치인 15% 이하로 감소될 때까지 필요한 공급수량을 (7) 식 및 (8) 식에 의하여 추정된 결과 투수양호토양에서 Dwa/Ds=3.0, 투수불량토양에서 Dwa/Ds=4.5 정도로 나타났으며, 이 경우의 교환성 나트륨 백분율은 투수양호토양에서 ESP=14.7%, 투수불량토양에서 ESP=14.0% 이었다.

4. 침출법과 수세법에 의한 제염과정중 교환성 나트륨 백분율 비교분석

침출법과 수세법에 의한 실내 모형시험 및 포장 라이시미터 제염시험 결과를 종합해서 검토해 보면 어느 경우나 침출수량 또는 공급수량이 증가함에 따라 토양의 교환성 나트륨 백분율(ESP)은 고도의 상관성을 가지고 감소하며 뚜렷한 제염효과가 입증되었다.

침출법의 경우 제염용수량(침출수량)의 증가만을 고려하여 교환성 나트륨 백분율 측면에서 제염효과를 분석하면 토성, 석고처리 여부, 암거설치 유무에 관계없이 실내 모형시험에서는 침출수심 Dwl/Ds=0.2, 현장 라이시미터 제염시험에서는 Dwl/Ds=0.3 정도에서 USDA Salinity Laboratory의 염해토양의 분류기준치 이하로 감소되었으며, 모든 처리구에서 제염효과에 큰 차이가 없이 비슷한 경향을 보였다. 따라서 침출법의 경우 단순히 침출수량의 증가에 따라서 교환성 나트륨 백분율만을 기준으로 살펴 보면 처리간 제염효과를 인정할 만한 유의성이 없는 것으로 판단된다. 그러나 일반적으로 고염도 간척지토양을 침출법에 의해 제염시킬 때 토성, 석고처리 여부, 암거설치 유무에 따라 투수성에 큰 영향을 받게 되므로 제염기간의 단축 및 제염작업의 용이성 등 매우 높은 제염효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

(Table 4) Water requirements for desalinization and exchangeable sodium percentage

Desalinization method	Experimental method	Soil texture and treatments	Requirements for desalinization	ESP (%)		Regression equation x : Dwl/Ds or Dwa/Ds y : ESP (%)
				Measured value	Estimated value	
Leaching method	Model	Permeable soil (Non-culvert) Impermeable soil (Non-culvert) Gypsum	Dwl/Ds=0.2	10.2~12.6	12.4	$y=5.6414x^{-0.4909}$ ($R^2=0.9722$)
		Permeable soil (Non-culvert) Non-gypsum	"	12.1~13.8	13.6	$y=6.1425x^{-0.4920}$ ($R^2=0.9805$)
	Lysimeter	Permeable soil (Culvert) Permeable soil (Non-culvert) Gypsum	Dwl/Ds=0.3	10.5~14.1	12.0	$y=6.2237x^{-0.5470}$ ($R^2=0.9379$)
		Permeable soil (Culvert) Permeable soil (Non-culvert) Non-gypsum	"	10.5~13.3	11.6	$y=5.5309x^{-0.6152}$ ($R^2=0.9521$)
Rinsing method	Model	Permeable soil (Non-culvert) Non-gypsum	Dwa/Ds=2.5	10.5~11.8	12.4	$y=34.486e^{0.4106x}$ ($R^2=0.9561$)
		Impermeable soil (Non-culvert) Non-gypsum	"	12.0~13.8	14.0	$y=38.828e^{0.4062x}$ ($R^2=0.9640$)
	Lysimeter	Permeable soil (Non-culvert) Non-gypsum	Dwa/Ds=3.0	-	14.7	$y=40.626e^{0.3378x}$ ($R^2=0.9754$)
		Impermeable soil (Non-culvert) Non-gypsum	Dwa/Ds=4.5	-	14.0	$y=40.079e^{0.2338x}$ ($R^2=0.9577$)

수세법의 경우 실내 모형시험에서는 투수양호토양이나 투수불량토양의 모든 처리구에서 공급수심 $Dwa/Ds=2.5$ 정도에서 염해토양의 분류기준치 이하로 감소되었고 투수성에 따라 투수양호토양에서 제염효과가 약간 크게 나타났으며, 현장 라이시미터 제염시험에서는 투수양호토양에서 $Dwa/Ds=3.0$, 투수불량토양에서 $Dwa/Ds=4.5$ 정도일 때 염해토양의 분류기준치 이하로 감소될 수 있을 것으로 추정되었다.

투수성이 양호한 토양에서 침출법에 의해 제염하는 경우는 제염용수량을 절약할 수 있고 제염작업을 용이하게 할 수 있다는 이점이 있지만 제염기간이 길게 소요되며 특히 투수성이 불량한 토양에서는 제염이 거의 불가능하다는 단점이 있다. 반면에 수세법에 의한 제염작업은 단기간에 투수성이 양호한 토양뿐만 아니라 투수성이 불량한 토양에서도 가능하지만 심토층의 제염이 어렵고 제염용수량이 침

출법에 비하여 10배 이상 많이 필요하다는 단점이 있는 것으로 판단된다.

침출법 및 수세법에 의해 염해토양의 분류기준치 이하로 감소될 때까지 필요한 제염용수량 및 그 경우의 교환성 나트륨 백분율을 종합해서 정리하면 <Table 4>에서 보는 바와 같다.

IV. 결 론

침출법 및 수세법에 의한 제염시험을 실시하고 제염방법 및 토성별로 제염과정중 제염용수량의 증가에 따른 교환성 나트륨 백분율(ESP)의 변화를 분석하여, 개발초기 고염도 간척지의 합리적인 제염대책을 수립하기 위한 제염예측기법을 개발하는데 기초자료를 제공하고, 전북 새만금지구 및 부창지구, 경기 화옹지구, 전남 고흥지구 등의 간척지토양을

공시토양으로 실내 모형시험과 현장 라이시미터 제염시험을 수행하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 공시토양은 USDA Salinity Laboratory의 염해토양분류법상 전기전도도와 교환성 나트륨백분율이 매우 높은 고염도 염류알칼리토양에 속하였다.

2. 침출법과 수세법에서 모두 제염용수량이 증가함에 따라 교환성 나트륨 백분율은 고도의 상관성을 가지고 감소하며 현저한 제염효과가 나타났다.

3. 침출법의 경우 실내 모형시험에서는 침출수심이 $D_{wl}/D_s=0.2$, 현장 라이시미터 제염시험에서는 $D_{wl}/D_s=0.3$ 정도에서 USDA Salinity Laboratory의 염해토양의 분류기준치인 $ESP=15\%$ 이하로 감소되었으며 모든 처리구에서 제염효과에 큰 차이가 없이 비슷한 경향을 보였다.

4. 수세법의 경우 실내 모형시험에서는 모든 처리구에서 공급수심 $D_{wa}/D_s=2.5$ 정도에서 염해토양의 분류기준치인 $ESP=15\%$ 이하로 감소되었고, 현장 라이시미터 제염시험에서는 투수양호토양에서 $D_{wa}/D_s=3.0$, 투수불량토양에서 $D_{wa}/D_s=4.5$ 정도일 때 염해토양의 분류기준치인 이하로 감소될 수 있을 것으로 추정되었다.

5. 침출법에 의해 제염하는 경우는 투수성이 양호한 토양에서 제염용수량을 절약할 수 있고 제염작업을 용이하게 할 수 있다는 이점이 있지만 제염기간이 길게 소요되며 투수성이 불량한 토양에서는 제염이 거의 불가능하다는 단점이 있다. 반면에 수세법에 의하는 경우는 투수성이 양호한 토양뿐만 아니라 투수성이 불량한 토양에서도 단기간에 제염이 가능하지만 심토층의 제염이 어렵고 제염용수량이 침출법에 비하여 10배 이상 많이 필요하다는 단점이 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 농림부 첨단기술개발사업으로 지원하는 농림수산특정연구과제 “간척지 제염예측기법 개발”에 관한 연구 2, 3차년도에 수행된 것임.

참고문헌

1. 구자용, 은중호, 1988. 간척지토양의 제염과정중 수리전도도의 변화, 한국농공학회지, 30(4) : pp.85~93.
2. 구자용, 한강완, 은중호, 1989a. 간척지토양의 제염용수량 산정에 관한 실험연구, 한국농공학회지. 31(1) : pp.96~105.
3. 구자용, 한강완, 은중호, 1989b. 새만금지구 간척지토양의 염분거동해석 및 제염효과 분석을 위한 실험적 연구, 한국농공학회지, 31(2) : pp.92~103.
4. 구자용, 손재권, 최진규. 1997~2000. 간척지 제염예측기법 개발, 1~4차년도 연차 실적·계획서, 농림부.
5. 구자용, 최진규, 손재권, 1998. 우리나라 서해안 간척지 및 간척지 토양의 이화학적 특성, 한국토양비료학회지, 31(2) : pp.120~127.
6. Abrol, I. P., I. S. Dahiya, and D. R. Bhumbra, 1975. On the method of determining gypsum requirement of soils. Soil Sci. 120 : pp.30~36.
7. Beyce, O. 1973. Experience in the reclamation of saline and alkali soils and irrigation water qualities in Turkey. FAO Irrigation and Drainage Paper 16, Drainage of Salty Soils. pp.63~82.
8. Prather, R. J., J. O. Goertzen, J. D. Rhoades, and H. Frenkel. 1978. Efficient amendment use in sodic soil reclamation. Soil Sci. Soc. Am. J. 42 : pp.782~786.
9. USDA Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook 60. p.160.