

간척지 염해토양의 특성과 제염기법*

손재권** · 송재도** · 신원태*** · 이수환**** · 류진희**** · 조재영*****

Properties and Desalination of Salt-affected Soil

Son, Jae-Kwon · Song, Jae-Do · Shin, Won-Tae ·
Lee, Su-Hwan · Ryu, Jin-Hee · Cho, Jae-Young

Accumulation of excessive salt in Reclaimed coastal tidelands can reduce crop yields, reduce the effectiveness of irrigation, degradation of soil structure, and affect other soil properties. These salts has shown to cause specific ions in the plant over a period of time leads to ion toxicity or ion imbalance and a continuous osmotic phase that prevents water uptake by plants due to osmotic pressure of saline soil solution. This review focuses on the characteristics of salt-affected soils, mechanisms of salt-tolerance plants, desalination technology, and soil management to maintain sustainable agro-ecosystem in salt-affected soils.

Key words : *reclaimed tidelands, salinity, salt-affected soil, sodicity*

I. 간척지 염해토양의 특성

간척지 염해토양(salt-affected soil)은 가용성 염류와 교환성 나트륨이 과다하게 함유되어 있어 염류농도가 높다. 토양 내 가용성 염류는 토양용액의 삼투압을 증가시키는 원인이 되고, 교환성 나트륨은 토양의 알카리도를 증가시키는 요인이 되어 궁극적으로 염해토양의 물리화학적성을 악화시키는 요인이 되고 있다. US Salinity Staff (1954)에서는 25°C 토양 포화 추출액을 기준으로 전기전도도(electrical conductivity, EC) 4 dS m⁻¹, 교환성나트륨백분율

* 본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010258)의 지원에 의해 이루어진 것임.

** 전북대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

*** 전북대학교 농업생명과학대학 생물환경화학과

**** 국립식량과학원 작물기초기반과

***** Corresponding author, 전북대학교 농업생명과학대학 생물환경화학과(soilcosmos@jbnu.ac.kr)

(exchangeable sodium percentage, ESP) 15% 그리고 수소이온농도(potential of hydrogen, pH) 8.5를 기준으로, 이들 중 한 가지 이상이 기준값을 초과하여 토양생산성을 감소시키는 원인이 되는 토양을 염해토양으로 정의하고 있다. 염해토양은 가용성 염류만을 과다하게 함유하고 있는 염류토양(saline soil), 가용성 염류와 교환성 나트륨을 동시에 과다하게 함유하고 있는 염류알칼리토양(saline-sodic soil, saline-alkali soil) 그리고 교환성 나트륨만을 과다하게 함유하고 있는 비염류알칼리토양(non-saline alkali soil, non-saline sodic soil)으로 분류하고 있다. 염해토양은 지역에 따라서 기상학적 요소, 지형학적 요소, 토양구조 그리고 생성인자 등이 다르므로 근본적인 차이가 있을 수 있지만, US Salinity Staff (1954)의 분류방법에 의하면, 우리나라 간척지 토양은 염류알칼리토양(saline-sodic soil, saline-alkali soil)에 속하며 대체적으로 유사한 성질을 지니고 있다(Ministry of Agriculture and Forestry, 2001).

Table 1. Conditions of saline, sodic, and saline-sodic soils (US Salinity Staff, 1954)

Soil	pH	EC (dS m ⁻¹)	ESP (%)	SAR (%)
Normal	<8.5	<4	<15	0-12
Saline	<8.5	>4	<15	0-12
Sodic	>8.5	<4	>15	>12
Saline-sodic	<8.5	>4	>15	>12

SAR : Sodium adsorption ratio

Table 1에 제시된 염해토양의 특성을 보다 상세히 알아보면 다음과 같다(Ministry of Agriculture and Forestry, 2001).

(1) 염류토양(saline soil)

- 가용성 염류가 과다하게 함유되어 있어, 토양용액의 삼투압이 상당히 높다.
- 교환성 나트륨의 함유량은 높지 않아, 토양입자가 응집되기 쉽고 일반 알칼리토양에 비하여 투수성이 높다.
- 나트륨 이온(Na⁺)이 가용성 양이온의 1/2 이상을 차지하는 경우가 적고, Ca²⁺와 Mg²⁺의 양이 상대적으로 높다.
- 주요 음이온은 염소이온(Cl⁻)과 황산이온(SO₄²⁻)이다.
- 배수가 양호한 토양에서는 용탈법으로 비교적 용이하게 가용성 염류를 제거하여 정상적인 토양으로 개량 할 수 있다.

(2) 염류알칼리토양(saline-sodic soil, saline-alkali soil)

- 가용성 염류가 과다한 경우에는 토양의 특성이 염류토양과 유사해서 pH 값이 보통 8.5 이하이다.

- 토양용액 중 염류농도가 낮으면서 나트륨 비율이 높을 경우 교환성 나트륨과 이산화탄소(CO₂)의 반응으로 생성된 Na₂CO₃의 작용에 의해 pH가 8.5 이상 증가할 수 있다.
 - 염류가 용탈과정을 통해 감소될 경우, 교환성 나트륨의 가수분해율이 증가하여 토양의 pH가 8.5 이상의 강한 알칼리성으로 전환되고, 토양입자가 분산되어 투수성이 낮아지는 경우가 생긴다.
 - 염류알칼리토양을 개량하기 위해서는 석고(gypsum, CaSO₄·2H₂O) 등과 같은 토양개량제를 토양에 공급함과 동시에 용탈법을 병행하는 것이 바람직하다.
- (3) 비염류알칼리토양(non-saline alkali soil, non-saline sodic soil)
- 교환성 나트륨의 함량이 과잉으로 증가함에 따라 토양은 분산되기 용이한 경향이 있고 가끔씩 pH 값이 10까지 증가한다.
 - 과도하게 함유되어 있는 교환성 나트륨이 토양의 물리적·화학적 성질에 현저하게 영향을 끼친다.
 - 비염류알칼리토양에 함유되어 있는 주요 양이온은 Na⁺이며 Ca²⁺와 Mg²⁺ 등이 소량 함유되어 있다.
 - 비염류알칼리토양을 개량하기 위해서는 석고 등과 같은 토양개량제의 공급과 함께 동시에 심경(深耕) 및 용탈법을 병행하는 것이 바람직하다.

Koo et al. (1998)이 우리나라 서남해안 간척지를 대상으로 306점의 시료를 채취하여 물리·화학적 특성을 조사한 결과, 우리나라 간척지 토양의 토성(soil texture)은 대부분 미사(silt)를 다량으로 함유하고 있는 미사토(silt soil) 또는 미사질양토(silt loam soil)인 것으로 나타났다. 전기전도도는 20-30 dS m⁻¹인 토양이 전체의 63% 그리고 30~40 dS m⁻¹인 토양이 전체의 23%의 분포를 나타내었다. 간척지 토양의 pH는 전체적으로 6.5~7.9 범위 내에 분포되어 있고, 전체평균값은 7.2로 나타났다. 토양의 ESP는 ESP 30~40% 범위가 전체의 38% 그리고 ESP 40~50%가 전체의 58%를 점유하여 전체의 약 90% 이상이 ESP 30~50% 범위에 분포하였다. Koo et al. (1998)의 연구결과를 토대로 우리나라 간척지 토양을 US Salinity Staff (1954)의 염해토양분류법으로 분류하였을 때 염류알칼리토양(saline-sodic soil, saline-alkali soil)으로 나타났다.

II. 간척지 염해토양에서 염류로 인한 식물 피해기작

토양중 염류는 식물체에 주요 환경 스트레스 요인으로 작용하고 있다. 가장 일반적으로 식물체의 생육에 바람직하지 못한 영향을 끼치는 염류는 다름 아닌 Na⁺ 이온과 Cl⁻ 이온이다. Na⁺ 이온이 Cl⁻ 이온 보다 더 심한 식물독성(phytotoxicity)을 일으키는 것으로 알려져 있

다. 이 같은 이유로는, Na^+ 이온은 식물체내 효소 활성부터 단백질 합성경로까지 포괄적으로 이온-특이 손상(ion-specific damage) 등 적극적인 영향을 끼치지만, Cl^- 이온은 식물체의 줄기에 축적되어 광합성을 저해하는 소극적인 영향을 끼치기 때문이다(Tester and Davenport, 2003). 염류는 아래 세가지의 경로를 통해 식물체의 생장에 영향을 끼치게 된다. 1) 토양으로부터 식물체 수분흡수를 저해하는 삼투효과(osmotic effects), 2) 과도한 Na^+ 이온과 Cl^- 이온으로 인한 이온-특이 손상 그리고 3) Na^+ 이온의 농도가 특이적으로 높아졌을 때, 식물체의 이온수송을 저해함으로써 다른 식물양분의 흡수를 저해한다(Tester and Davenport, 2003).

1. 생장 장애

토양 포화추출액의 전기전도도가 16 dS m^{-1} 이상인 고염도에서는 식물체의 생장과 발아 등 심각한 생장장애가 나타나게 된다. Table 2에는 토양중 염류농도에 따른 식물체의 생장 정도를 비교한 자료가 제시되어 있다. 토양중 과도한 염류농도는 삼투압과 식물양분의 불균형을 초래하여 식물체 안으로 물과 다른 식물양분의 뿌리 흡수를 저해하게 된다. 식물체 뿌리는 다양한 종류의 환경스트레스에 대해 미세한 조정센서 기능을 하기도 하며(Colmer et al., 1994), 토양 내에서 염류의 순간적인 농도증가는 식물 뿌리 주변 세포가 순간적으로 축소되거나 확장되는 원인을 제공하기도 한다(Cramer와 Bowman, 1991). 식물체에 대한 염류피해 영향은 염류에 노출된 후 몇 주가 지난 후에 나타나기 시작하는데, 염류민감성 식물(salt-sensitive plants)은 액포내에 염류가 저장되어 이동성이 감소하면서 주로 잎의 황화현상과 고사현상이 발현되기 시작한다(Karley et al., 2000). 염류저항성 식물(salt-tolerant plants)은 수개월 후에 피해증상이 나타나는데, 조기 개화 또는 화방생성에 영향을 끼친다.

Table 2. Soil salinity classes in terms of ECe (US Salinity Staff, 1954)

Salinity class	ECe (dS/m)	Salinity effects of crops
Non-saline	<2	Salinity effects are negligible
Slightly saline	2-4	Yields of very sensitive crops may be restricted
Moderately saline	4-8	Yields of many crops restricted
Very saline	8-16	Only tolerant crops yield satisfactory
Extremely saline	>16	Only a few very tolerant crops yield satisfactory

2. Na^+ 이온 독성

Na^+ 이온이 식물체의 세포질내에 과도하게 축적이 이루어질 경우 이온 독성과 삼투압 스트레스가 나타나게 된다. 이 과정에서 아포플라스트(apoplast)의 수분포텐셜은 저하하게 된

다(Binzel et al., 1988). 토양중 염류농도가 증가하게 되면, 염류의 과도한 축적으로 인해 식물체내 삼투 장애(osmotic damage)가 나타나게 된다. Na^+ 이온은 뿌리를 통해 식물체로 흡수되었을 때, 물관(xylem)을 통해 줄기로 빠르게 이행된다. Na^+ 이온의 피해는 식물체 잎의 Na^+ 이온 축적과 관련되어 있으며, 잎의 황백화와 식물체 고사를 유발하여 최종적으로 작물의 생산성을 저하시키게 된다(Munns, 1993). 식물체는 팽압과 수분흡수를 일정하게 유지할 필요가 있다. 식물체가 액포내에서 독성물질의 저장과 같은 세포내 구획화 기능이 없다면, Na^+ 이온의 과도한 흡수는 삼투압 불균형으로 인해 식물독성을 유발하게 될 것이다. 뿐만 아니라, 토양중 높은 Na^+ 이온의 농도는 이온 운반체의 활성화에 영향을 끼쳐 다른 이온들의 흡수를 저해할 수도 있다.

3. Cl^- 이온 독성

Cl^- 이온은 고등식물에 있어 필수 미량원소이다. Cl^- 이온은 광합성에서 산소반응과 관련되어 있으며(Olesen and Andreasson, 2003), 세포막을 통과하는 전하를 일정하게 유지하기도 하고, 액포와 세포질내에서 삼투압을 조절하는 기능을 담당하고 있다. Cl^- 이온의 농도가 높을 경우 Cl^- 이온의 자체 독성과 광합성 저해 현상이 나타나게 된다. 콩, 오렌지 그리고 포도나무와 같은 일부 식물에서는 Na^+ 이온의 염으로의 이동성이 낮지만, Cl^- 이온은 지속적으로 식물체 염에 축적된다. 일반적으로 식물체내에서 Na^+ 이온이 Cl^- 이온보다 독성이 큰 것으로 알려져 있지만, 예외적으로 이들 식물에서는 Cl^- 이온이 Na^+ 이온보다 더 독성이 크게 나타나는 경우가 있다(Munns and Tester 2008).

Ⅲ. 간척지 염해토양에서 염류로 인한 토양의 질(quality) 저하

Na^+ 이온의 토양 내 축적은 치환성 이온뿐만 아니라 토양용액 중에서 Na^+ 이온의 변화, 토양 pH, 토양구조의 불안정화, 토양수리전도도의 붕괴 그리고 토양입단의 감수성 증대와 같은 바람직하지 못한 현상을 일으키는 원인이 된다(Qadir and Schubert, 2002). 염류알카리 토양은 관개수 공급과 강우가 내리는 조건하에서 분산과 팽윤을 거듭하면서 수분과 공기, 식물뿌리 확장 그리고 유묘 성장저해와 같은 불리한 현상이 나타나게 된다. 토양의 물리적, 화학적 그리고 수리학적 특성에 대한 염류의 영향은 토양의 형태와 토성, 토양용액과 토양 점토광물중 일가 양이온(monovalent cations)과 이가 양이온(divalent cations)의 농도와 같은 다양한 변수에 의해 영향을 받는다. 염류알카리토양은 토양광물-토양수-토양공기 상호간 불량한 환경을 조성할 수도 있고, 궁극적으로 토양구조 파괴와 같은 문제점이 대두되고 있다. 토양입단의 팽창과 분산은 토양구조의 파괴를 가져오게 되고, 토양의 통기성을 감소시

키고, 토양 강도를 증가시키게 된다(Rengasamy, 2006). 염해토양의 효과적인 관리는 이들 토양 내에서 수분과 양분의 이동경로에 대한 이해뿐만 아니라 토양구조의 변화를 가져오는 토양염류도와 토양알카리도의 상호관계에 대한 이해가 선결되어야 한다(Rengasamy and Sumner, 1998).

IV. 식물의 내염성 기작

고염도 스트레스하에서 식물체의 내염성 기작은 아래와 같이 4가지 요인을 포함하고 있다. 1) 액포와 같은 저장공간 속으로 염류의 분리 포획(James et al., 2006), 2) 이온의 흡수 조절, 배출 그리고 포획과 같은 뿌리로부터 엽까지 염류 이동 조절(Xiong and Zhu, 2002), 3) 아브시스산(abscisic acid, ABA)과 에틸렌(ethylene)과 같은 식물호르몬(phytohormones)의 생산(Xiong and Zhu, 2002) 그리고 4) 식물체내 대사체 형성에 필요한 프로린(proline)과 같은 삼투물질(osmolytes)의 생산(Ueda et al., 2007). 고염도 스트레스하에서 식물의 내염성 메카니즘을 Table 3에 요약 정리하였다. 식물체가 염류 스트레스에 가장 효율적으로 대처하는 방법은 독성이 있는 물질은 배제하고 필요한 이온성물질만을 식물체 안으로 선택적으로 이온을 흡수하는 것이다. 과도한 Na^+ 이온이 식물체 내부로 유입되었을 때, 그들은 액포 또는 세포질 내 삼투 포텐셜을 유지하기 위해 식물체 세포내 액포에 저장된다. Na^+ 이온의 이행은 Na^+ 이온 확산경로(diffusion channel), Na^+ 이온 펌프(ion pump), 그리고 Na^+/H^+ 상호수송(antiporters)을 통해서 이루어진다(Apse et al., 1999; Blumwald et al., 2000). 그리고 액포내 Na^+ 이온의 축적은 세포질내 삼투포텐셜과 액포내 삼투포텐셜이 균형을 이루어야만 가능하다. 이것은 프롤린(proline)과 수크로스(sucrose)와 같은 유기용질의 합성과 축적에 의해서 이루어진다(Ueda et al., 2007; Xiong and Zhu, 2002). 부가적으로, 과도한 염류집적은 과산화물(superoxide), 과산화수소(hydrogen peroxide, H_2O_2), 하이드록시 라디칼(hydroxyl radical, OH^\cdot)과 일중항산소(singlet oxygen)와 같은 반응성 산소종(reactive oxygen species, ROS)을 과도하게 생산함으로써 식물체에게 산화적 스트레스를 제공하는 원인이 된다. 반면에, 아스코르브산(ascorbic acid), 글루타치온(glutathione), 티오레독신(thioredoxin)과 카로티노이드(carotenoids)와 같은 항산화물질은 식물의 내염성을 증대시키고 이들 ROS를 소거할 수 있다(Xiong and Zhu, 2002).

Table 3. Tolerance mechanisms of halophytes on saline-sodic soil (Alberta Agriculture, 1995)

Avoidance	<ol style="list-style-type: none"> 1. Growth only during favourable seasons 2. Grow only in favourable areas 3. Limitation of root growth to selected soil horizons
Adaptation process	<ol style="list-style-type: none"> 1. Selectivity against Na^+ and Cl^- 2. Exclusion of salt from shoots 3. Diversion of salt out of assimilating tissues 4. Compartmentalization of salt within plant, tissue, and cells 5. Synthesis of organic solutes and osmolytes 6. Disposal of older plant parts (“salt-filled organs”)
Tolerance	<ol style="list-style-type: none"> 1. Increase salt tolerance of tissues, cells, and organelles 2. Increase in halo-succulence <ul style="list-style-type: none"> - Increase in leaf-succulence - Increase in stem-succulence, reduction of leaves

V. 간척지 염해토양의 제염(desalinization) 기법

1. 물리적 제염

간척지 염해토양의 물리적 제염 방법으로 가장 널리 이용되는 것은 물을 이용한 수세법(rinsing method)과 침출법(leaching method) 그리고 전기동력학적(electrokinetics) 방법이다. 수세법과 침출법은 여러 문헌에서 포괄적으로 언급하고 있으므로 본고에서는 전기동력학적 기법을 이용한 염류제거기법을 소개하고자 한다. 간척지 염해토양에 전기동력학적 기술을 도입한 사례는 많지 않은데, KRCIST (산업기술연구회, 2013)에서 우리나라 시설원예토양과 간척지 염해토양을 대상으로 이 기술을 도입하여 현장 실증연구를 수행한 바 있다. 전기동력학적 복원기술(electrokinetic remediation technique, EK)은 여러해 전부터 연약지반의 안정화 및 토양에서의 수분제거 등에 이용된 기술로서, 토양 내에 다수의 양극(anode)과 음극(cathode) 전극을 설치한 후 수 mA/cm^2 수준의 직류전류를 양극과 음극 사이에 흘려줌으로써 토양 입자 사이의 세공 유체에 전기이동(electromigration), 전기삼투(electro osmosis) 및 전기영동(electrophoresis)과 같은 전기동력학 현상(electrokinetic phenomena)을 발생시켜 점토 등의 세립토와 같은 저투수성 토양으로부터 중금속 등의 오염물질을 제거하고, 토양의 pH와 같은 화학적 특성을 제어하기 위한 원위치(*in-situ*) 정화기술이다. 양극과 음극 사이에 직류전류를 가하면 두 전극 사이에 생성된 전위 구배(potential gradient)의 영향을 받아

서 양이온은 음극으로, 음이온은 양극으로 이동하게 되므로 대상물질을 쉽게 제거할 수 있다(KRCIST, 2013). 전기동력학적(electrokinetic) 반응기 모식도는 Fig. 1에 제시되어 있다.

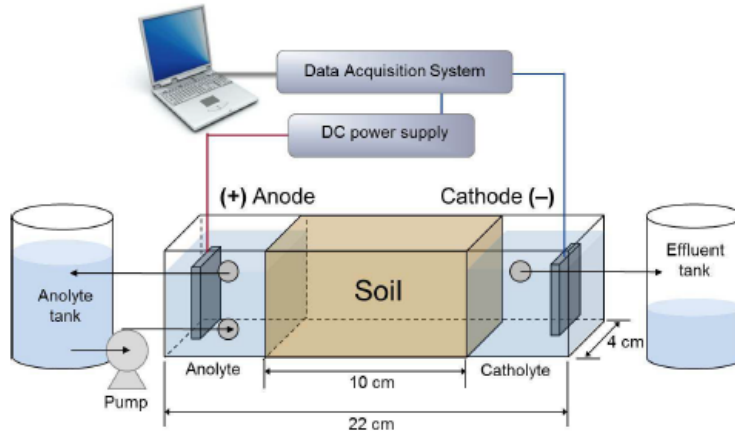


Fig. 1. Schematic diagram of electrokinetic remediation technique (KRCIST, 2013).

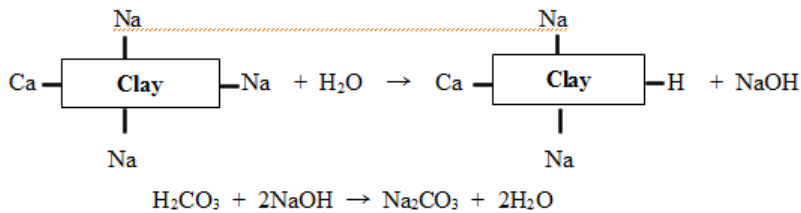
간척지 염해토양을 대상으로 전기동력학적 제염기술을 적용한 결과, 실험 후 Na^+ 이온은 토양에 거의 남아있지 않았으며(3% 이내), 초기 Na^+ 이온의 67-89%가 유출수를 통해 제거되었고, 음극 전해조에 일부가 남아 있었다. 이같은 결과는 Na^+ 이온이 토양으로부터 쉽게 제거되며, 전기이동과 전기삼투현상에 의해 음극방향으로 이동하여 유출수와 함께 배출되었음을 보여주는 결과이다. Cl^- 이온의 경우도 토양으로부터 거의 제거되었으며(97% 이상), 이들 대부분은 양극 전해액에 포함되어 있었다. 이는 비록 Cl^- 이온이 음극방향으로 형성되는 전기삼투흐름에 의해 방해를 받을지라도 전기이동에 의해 양극 방향으로 이동되었음을 보여주는 결과이다.

2. 화학적 제염

간척지 염해토양의 화학적 제염방법은 주로 석고(gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 또는 유기물자재를 사용해 오고 있다. 대표적으로, Son et al. (2001)이 석고처리에 의한 간척지 토양의 제염 효과에 대한 연구를, Ryu et al. (2010)이 석고 혼합량에 따른 간척지토양의 양이온 용탈 및 분포에 대한 연구를, Oh (1990)는 석회의 종류와 하해간척지 토양의 제염에 대한 연구를 그리고 Koo (1989)가 간척지토양의 제염을 위한 석고처리효과를 검토한 바 있다. 이 밖에도 간척지 염해토양에서 화학자재를 활용한 제염기법 연구에 대해 다수의 논문이 보고되어 있다. 가수분해와 석고처리에 따른 제염과정과 관련된 자료는 Ministry of Agriculture and Forestry (2001)에서 부분 발췌하여 인용하였다.

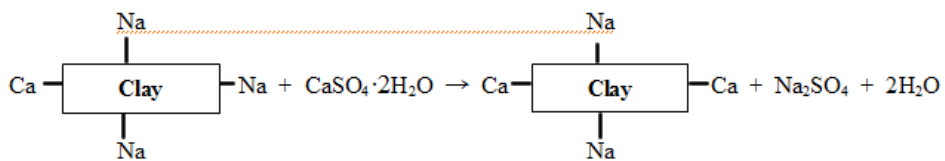
1) 가수분해에 의한 염분용탈

Na^+ 이온과 Ca^{2+} 이온을 함유하고 있는 점토입자가 가수분해되면 Na^+ 이온이 H^+ 이온으로 치환되고 물분자와 결합해서 NaOH 를 형성한다. 공기 중에 함유되어 있는 CO_2 는 토양수분에 녹아서 H_2CO_3 를 형성하게 되는데 이는 NaOH 와 쉽게 반응하여 Na_2CO_3 를 생성시킨다. 용탈에 의해서 Na_2CO_3 를 제거시키면 토양입자는 Na^+ 이온 대신에 H^+ 이온을 갖게 되어 H^+ 이온이 증가되므로 pH 값이 낮아진다.



2) 석고 시용에 의한 염분 용탈

염류토양에 석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)를 사용하면 점토입자에 흡착되어 있는 Na^+ 이온이 석고의 Ca^{2+} 이온으로 치환되어 Na_2SO_4 를 형성하게 되는데, 이 Na_2SO_4 는 용탈에 의해서 제거할 수 있다. 따라서 석고를 사용하여 용탈시킴으로서 토양입자는 Na^+ 이온 대신에 Ca^{2+} 이온을 갖게 되어 토양 구조를 발달시켜 투수성을 양호하게 할 수 있으며 토양의 알칼리성도 낮출 수 있다.



화학자재 처리에 따른 제염효과를 구명하는데 있어 석고를 비롯한 칼슘자재 또는 퇴비와 신선유기물을 개별적으로 처리하는 것보다 이들 두 가지 자재, 즉 석고와 유기물을 혼합하여 long-term 실험을 진행하였을 때 훨씬 효과가 우수하다는 연구결과가 보고된 바 있다(Fig. 2)(Son et al., 2016).

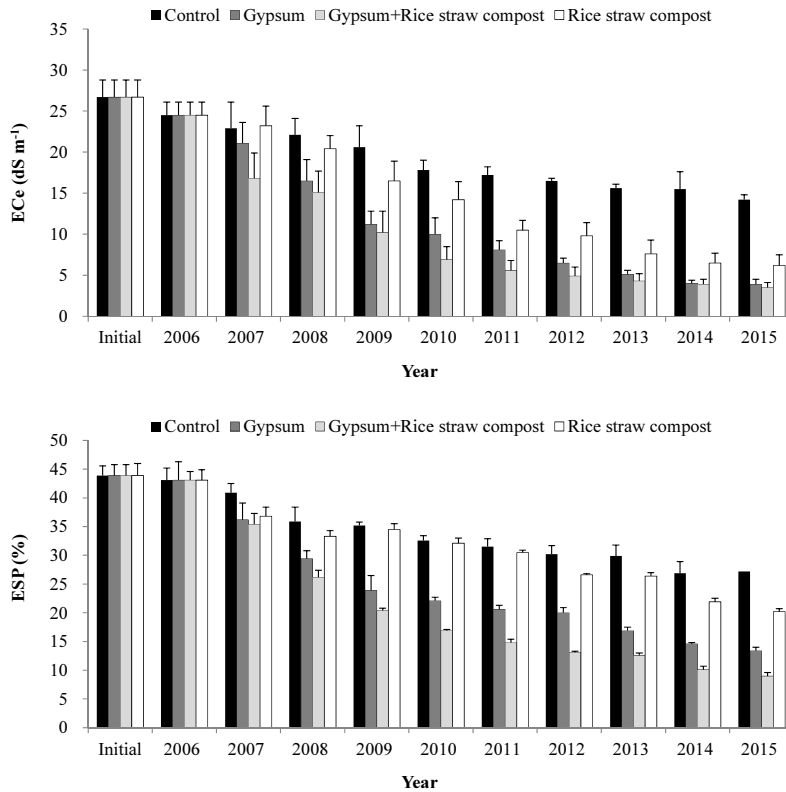


Fig. 2. Effect of different amendments on ECe and ESP in soils during long-term leaching cycles (Son et al., 2016).

3) 생물학적 제염

생물학적 제염은 일반적으로 미생물에 의한 제염(biodesalinization)과 식물에 의한 제염(phytodesalinization)을 조합한 용어로 이용되고 있다. 개별적으로 분류하면, 미생물을 이용한 간척지에서 염류제거(biodesalinization)와 내염성식물을 이용한 간척지에서 염류제거(phytodesalinization, vegetative desalinization)로 구분되어야 할 것이다. 그러나 현실적으로 국내·외에서 생물학적 제염을 논할 때는 포괄적으로 ‘vegetative desalinization’이라는 용어가 더 널리 사용되고 있다. 이유인즉, 미생물을 이용한 ‘biodesalinization’은 그 적용미생물이 한정되어 있고, 제염효과 역시 미미하기에 아직 활발하게 연구가 진행되지 않은 상태이기 때문이다. 본 총설 논문은 궁극적으로 지속가능한 간척농지 최적관리를 위한 식물학적 제염기술 개발과 관련된 자료를 제공하는데 목적이 있다.

간척지 토양의 이화화성을 개량하기 위해서는 내염성 식물을 활용한 것이 효과적이는데 최근 연구동향에 따르면, 약 1,560종의 내염성식물이 존재하며, 이 중 46.8%가 명아주과, 목초과, 국화과, 두과식물이다(Zhao and Li, 1999). 따라서 다양한 내염성 식물들은 염해지 환

경개선에 좋은 자원으로 활용될 수 있다. 내염성식물은 토양중 염분을 흡수하고, 식물체내에 염분을 축적시키는 Biological pump 역할을 한다. 하지만 제거시키는 염분량은 식물 종류와 토양 층위별로 다양하다. 염해지의 염생식물은 그 환경에 적응하는 한편, 환경을 변화시키기도 한다. 식물뿌리는 토양의 침식을 방지하며, 토양 염농도는 감소하고, 유기물 함량은 증가한다. 또한 토양의 물리 화학성은 개량되고 토양미생물 활동을 조장하고, 온도, 습도, 조명을 조절할수 있게 된다. 내염성 식물을 간척지에 식재하는 것은 염생식물에서 비염생식물로의 변화를 가속시키며 제염을 촉진시킨다. 간척지의 농경지화는 제염이 일정정도 진행된 후에 이루어져야 하며 간척지의 생물학적 토양개량을 위해서는 식물의 내염성에 관한 연구가 선행되어야 한다(Lee et al., 2007).

VI. 염해토양 복원 가이드라인(guide line)

캐나다 앨버타주의 Environmental Protection and Enhancement Act (Alberta, 1992)에 제시되어 있는 염해토양의 복원에 대한 가이드라인을 소개하면 다음과 같다. 앨버타주의 가이드라인이 모든 염해토양에 획일적으로 적용될 수는 없지만, 우리나라 간척지 염해토양을 개량하는 가이드라인으로 적용하는데 문제는 없을 것이다. 가령, 쌀기와 콩과 같은 염류민감성 작물의 재배지에는 보다 엄격한 염류관리가 필요할 것이지만, 염생식물이나 내염성작물은 보다 더 광범위하게 가이드라인이 적용될 수 있을 것이다. Table 3에는 염해토양의 일반적인 가이드라인이 제시되어 있다.

Table 4. Generic guidelines for salt contaminated soil (The Canadian Environmental Quality Guidelines, 1999)

Generic Guidelines for Salt Contaminated Soil	Comments
Soil Quality Relative to Disturbance and Reclamation (adapted from Alberta Agriculture, 1987)	The primary guidelines for assessing salt and sodium status of salt contaminated soil are adapted from the "Soil Quality Criteria Relative to Disturbance and Reclamation". These guidelines were developed to provide physical, chemical, and biological guidelines for evaluation of the suitability of soil materials for revegetation. Application of the guidelines requires comparison with representative off-site controls.
Canadian Council of Ministers of the Environment Commercial/Industrial Criteria (CCME, 1991)	"CCME Industrial/Commercial Criteria" for EC and SAR may be used at sites zoned for commercial or industrial use.

Table 4에 제시된 표토와 심토중 전기전도도와 나트륨백분율을 충족할 경우 토지이용에 특별한 제한을 받지 않고 작물재배가 가능하다.

상업용 또는 공업용 토지의 염류 가이드라인은 Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME)의 'Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites'에서 규정하고 있는데 전기전도도 4 dS m⁻¹ 그리고 나트륨흡착비 12% 이하이다(Table 5).

Table 5. Soil quality guidelines for unrestricted land use (The Canadian Environmental Quality Guidelines, 1999)

Parameter		Rating Categories			
		Good	Fair	Poor	Unsuitable
Top soil	EC dS m ⁻¹ (salinity)	<2	2-4	4-8	>8
	SAR (sodicity)	<4	4-8	8-12	>12
Sub soil	EC dS m ⁻¹ (salinity)	<3	3-5	5-10	>10
	SAR (sodicity)	<4	4-8	8-12	>12

Ⅶ. 결 론

1. 염생식물을 비롯한 내염성 작물의 재배

고염류 간척지 토양에서 초기에는 나문재, 통통마디와 같은 염생식물을 재배하는 것이 토양의 숙답화에 도움이 될 수 있다. 염생식물을 재배할 경우에는 바이오매스(Biomass, 생물량) 생산성이 높은 작물을 선정하는 것이 염류제거에 유리할 것이다. 초기 제염후에는 밀, 보리, 귀리 그리고 호밀과 같은 내염성작물을 재배하는 것이 보편적이다. 그러나 이들 내염성작물을 단일작물로 재배하는 것보다는 수단그라스와 같은 내염성 사료작물과 혼합 작부체계를 구성하는 것이 더 바람직한 것으로 판단된다.

2. 토양개량제 처리

염해토양에 고농도로 함유되어 있는 치환성 나트륨을 제거하기 위해 널리 사용되는 화학자재가 석고를 비롯한 칼슘 자재이다. 석고는 비교적 저렴하고 용이하게 구입할 수 있으며, 토양개량효과가 매우 우수하다. 석고가 토양의 이화학적 개선에 바람직한 자재이지만 단독 처리 보다는 유기물과 혼합 처리시 그 효과가 배가될 수 있으므로 염해토양의 전기전

도도와 ESP를 고려하여 최적의 석고요구량을 처리한 다음 식물성 유기물자재를 병행처리 하는 것이 바람직하다.

3. 토양유실 방지

염해토양은 나트륨으로 인해 토양의 분산되어 있어 풍식/수식으로 인한 토양유실 감수성이 매우 높다. 그뿐 아니라 개발 초기에는 비산먼지 발생으로 인해 토양 손실 및 생활환경의 질을 떨어뜨리는 요인이 되고 있다. 토양개량제 처리를 통한 토양의 입단화, 지표식물 식재를 통해 토양유실 방지대책을 수립하여야 한다.

4. 배수개선 및 지하수위

염해토양은 분산성이 높아 배수관리가 불량한 경우 물에 의해 팽윤되거나 토양구조가 붕괴될 수 있다. 아울러 간척지 염해토양은 보통 지하수위가 1 m 이내로 낮게 형성되어 있다. 따라서 최적의 용/배수 관리와 지하수위를 관리할 수 있도록 하여야 한다.

[Submitted, March. 31, 2016 ; Revised, April. 18, 2016 ; Accepted, April. 19, 2016]

References

1. Alberta Agriculture. 1987. Soil quality criteria relative to disturbance and reclamation. revised ed. Alberta Soils Advisory Committee. Soil Reclamation Subcommittee. Soil Quality Criteria Working Group. Edmonton. Canada.
2. Alberta Agriculture. 1995. Soil Salinity, Soil and Water Conservation Manual Series. Alberta. Canada.
3. Alberta Environment. 2001. Salt Contamination Assessment & Remediation Guidelines. Alberta. Canada.
4. Apse, M. P., G. S. Aharon, W. A. Sneddon, and E. Blumwald. 1999. Salt tolerance conferred by over-expression of a vacuolar Na^+/H^+ antiport in Arabidopsis. *Science*. 285: 1256-1258.
5. Binzel, M. L., F. D. Hess, R. A. Bressan, and P. M. Hasegawa. 1988. Intracellular compartmentation of ions in salt adapted tobacco cells. *Plant Physiol* 86: 607-614.
6. Blumwald E. and G. S. Aharon. 2000. Sodium transport in plant cells. *Biochimica et*

- Biophysica Acta. 1465: 140-151.
7. CCME. 1991. Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites, Canadian Council of Ministers of the Environment. Winnipeg, Manitoba. Canada.
 8. CCME. 1999. Canadian Environmental Quality Guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canada.
 9. Colmer, T. D., T. W. M. Fan, R. M. Higashi, and A. Lauchli. 1994. Interactions of Ca^{2+} and NaCl stress on relations and intracellular pH of Sorghum bicolor root tips. An in vivo ^{31}P -NMR study. J. Exp. Bot. 5: 1037-1044.
 10. Cramer, G. R. and D. C. Bowman. 1991. Kinetics of maize leaf elongation. 1. Increased yield threshold limits short-term, steady-state elongation rates after exposure to salinity. J. Exp. Bot. 42: 1417-1426.
 11. James, R. A., R. Munns, S. Von Caemmerer, C. Trejo, C. Miller, and T. Condon. 2006. Photosynthetic capacity is related to the cellular and subcellular partitioning of Na^+ , K^+ and Cl^- in salt-affected barley and durum wheat. Plant Cell and Environ. 29: 2185-2197.
 12. Karley, A. J., R. A. Leigh, and D. Sanders. 2000. Where do all the ions go? The cellular basis of differential ion accumulation in leaf cells. Trends in Plant Sci. 5: 465-470.
 13. Koo, J. W. 1989. Effects of gypsum treatments for desalinization of reclaimed tidelands. Agri. Sci. Technol. Res. 31: 349-356.
 14. Koo, J. W., J. K. Choi, and J. G. Son. 1998. Soil properties of reclaimed tidelands and tidelands of Western sea coast in Korea. Korean J. Soil Sci. Fert. 31: 120-127.
 15. Korea Research Council for Industrial Science and Technology (KRCIST). 2013. The reclamation for salt-contaminated soil with electrokinetic technology. Sejong. Korea.
 16. Lee, K. B., J. K. Kang, J. M. Li, D. B. Lee, C. W. Park, and J. D. Kim. 2007. Evaluation of Salt-Tolerance Plant for Improving Saline Soil of Reclaimed Land. Korean J. Soil Sci. Fert. 40: 173-180.
 17. Ministry of Agriculture and Forestry. 2001. Prediction technique of desalinization in reclaimed tidelands. Seoul. Korea.
 18. Munns, R. 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: Some dogmas and hypotheses. Plant Cell Environ. 16: 15-24.
 19. Munns, R. and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annu. Rev. Plant Biol. 59: 651-681.
 20. Oh, W. K. 1990. Liming materials and desalinization of marine originated tidal soil. Korean J. Soil Sci. Fert. 23: 31-37.
 21. Olesen, K. and L-E. Andreasson. 2003. The function of the chloride ion in photosynthetic

- oxygen evolution. *Biochem.* 42: 2025-2035.
22. Qadir, M. and S. Schubert. 2002. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land Degrad. Develop.* 19: 275-294.
 23. Rengasamy, P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. *J. Exp. Bot.* 57: 1017-1023.
 24. Rengasamy, P. and M. E. Sumner. 1998. Processes involved on sodic behavior. In: *Sodic Soil: Distribution, Management and Environmental Consequences*. Oxford University Press, New York.
 25. Ryu, J. H., D. Y. Chung, S. W. Hwang, K. D. Lee, S. B. Lee, W. Y. Choi, S. K. Ha, and S. J. Kim. 2010. Patterns of leaching and distribution of cations in reclaimed soil according to gypsum incorporation rate. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43: 474-479.
 26. Son, J. G., J. W. Koo, and J. K. Choi. 2001. Desalinization effects of gypsum treatments in reclaimed tidal lands. *Korean Nat. Committee Irrig. Drain.* 8: 70-79.
 27. Son, J. K., J. D. Song, W. T. Shin, S. H. Lee, J. H. Ryu, and J. Y. Cho. 2016. Effect of gypsum and rice straw treatments on the salinity of reclaimed coastal tidelands. Submitted to *Archives of Agronomy and Soil Science*.
 28. Tester, M. and R. Davenport. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annu. Bot.* 91: 503-527.
 29. Ueda, A., Y. Yamamoto-Yamane, and T. Takabe. 2007. Salt stress enhances proline utilization in the apical region of barley roots. *Biochem. Bioph. Res. Co.* 355: 61-66.
 30. US Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agriculture Handbook No. 60. United States Salinity Laboratory, Riverside, CA.
 31. Xiong, L. and J. K. Zhu. 2002. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant Cell Environ.* 25: 131-139.
 32. Zhao, K. and F. Li. 1999. *China halophytes plants*. Beijing Science press. China.