

Salt Removal in a Reclaimed Tidal Land Soil with Gypsum, Compost, and Phosphate Amendment

Jeong-Eun Lee^{1,†}, Dong-Hyuk Seo^{1,†}, and Seok-In Yun^{1,2,*}

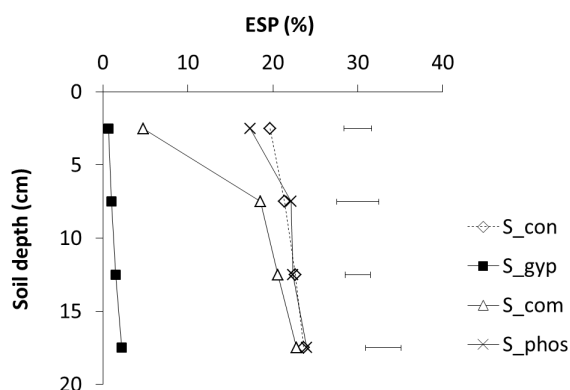
¹Department of Bio-Environmental Chemistry, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

²Institute of Life Science and Natural Resources, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

(Received: August 27 2015, Revised: September 15 2015, Accepted: September 17 2015)

High salinity and sodicity of soils play a negative role in producing crops in reclaimed tidal lands. To evaluate the effects of soil ameliorants on salt removal in a highly saline and sodic soil of reclaimed tidal land, we conducted a column experiment with treating gypsum, compost, and phosphate at 0-2 cm depth and measured the salt concentration of leachate and soil. Electrical conductivity of leachate was 45-48 dS m⁻¹ at 1 pore volume (PV) of water and decreased to less than 3 dS m⁻¹ at 3 PV of water. Gypsum significantly decreased SAR (sodium adsorption ratio) of leachate below 3 at 3 PV of water and soil ESP (exchangeable sodium percentage) below 3% for the whole profile of soil column. Compost significantly decreased ESP of soil at 0-5 cm depth to 5% compared with the control (20%). However, compost affected little the composition of cations below a depth of 5 cm and in leachate compared with control treatment. It was concluded that gypsum was effective in ameliorating reclaimed tidal lands at and below a soil layer receiving gypsum while compost worked only at a soil layer where compost was treated.

Key words: Exchangeable sodium percentage, Salinity, Salt leaching, Sodicity, Sodium adsorption ratio



Exchangeable sodium percentage (ESP) with soil depth after eluting soil columns receiving gypsum, compost, and phosphate with 3 pore volumes of water.

*Corresponding author : Phone: +82638506677, Fax: +82638507308, E-mail: siyun@wku.ac.kr

†These authors contributed equally to this work.

§Acknowledgement : This work was carried out by the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ0098032015), Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

해안 간척지 토양은 염류 농도와 나트륨 (Na) 비율이 높은 것이 특징이다. 식물은 토양 수의 삼투 퍼텐셜이 낮은 염류 토양 (saline soil)에서 수분을 흡수하는 데 어려움을 겪게 되고 나트륨성 토양 (sodic soil)에서 나트륨에 의한 독성 피해를 받기도 하고 양분 흡수 불균형이 일어나기도 한다 (Munns and Termaat, 1986). 염류 농도와 나트륨 비율이 모두 높은 염류-나트륨성 토양 (saline-sodic soil)의 경우 식물은 수분 스트레스와 함께 나트륨 독성 및 양분 흡수 불균형을 겪을 수 있다. 한편 나트륨성 토양은 식물 생육에 가장 안 좋은 조건으로 여겨지는데, 나트륨 비율이 높아 콜로이드 입자가 분산되어 토양 물리성이 불량해지고 낮은 염류 농도에서 그 정도가 더욱 심해지기 때문이다 (Lebron et al., 1994). 간척지에서 14종의 발작물을 재배한 실험에서 토양 포화침출액의 전기전도도 (EC_e)가 1 dS m^{-1} 증가할수록 작물 수량이 3.4–8.5% 만큼 감소하였고, 작물 건물중이 50% 감소하는 EC_e 는 8.6–18.9 dS m^{-1} 였다고 보고하였다 (Lee et al., 2000; Lee et al., 2003). 또한 토양 중 나트륨의 비율 (SAR)이 증가할수록 작물의 건물중이 감소하였고, 가장 양호한 생육을 나타낸 SAR은 21 이하라고 보고된 바 있다 (Lee et al., 2003).

간척지 토양은 염류 농도가 높을 뿐만 아니라 유기물이 적고 양분 함량 및 보유력이 낮아 작물 재배에 부적합하다. 이와 같은 토양의 불리한 조건을 개량하기 위해 보편적으로 이용되고 있는 방법 중에 하나가 유기물을 공급하는 것이다. 토양 물리성을 개량하고 양분 보유력을 높이기 위해 팽화왕겨, 벧짚 등을 공급하기도 하고 (Kim et al., 2005; Baek et al., 2008), 유기물과 양분 공급을 위해 퇴비를 처리하거나 녹비 작물을 재배하여 토양에 환원시키기도 한다 (Moon et al., 2011; Kang et al., 2014). 이와 같은 방법으로 토양 유기물과 양분 함량이 증가하고 전용적 밀도가 감소하여 작물 생육이 증가하였다고 보고되었다.

간척지에 유기물과 양분 공급이 작물 생육에 긍정적 작용을 함에도 불구하고 일반 토양과 비교하여 생산성이 경제적인 편은 아니다. 결국 간척지 생산성을 더욱 높이기 위해 토양 염류 문제가 해결되어야 한다. 토양 염류는 시간이 지남에 따라 자연적으로 제거될 수 있으나 오랜 시간이 걸리고 높은 Na 비율을 개선하기에 어려움이 있다 (Koo et al., 1998). 해수의 영향을 받은 간척지 토양은 나트륨 비율이 높기 때문에, 염류 농도는 낮아진다고 하더라도 나트륨 비율은 여전히 높아 토양의 투수성 및 통기성이 낮아져 식물 입장에서 더욱 불리한 조건이 될 수 있다 (Lebron et al., 1994).

단기간에 토양 염류를 제거하거나 나트륨 비율을 낮추기 위해 개량제를 이용할 수 있다. 앞에서 유기물질은 근본적

으로 토양 물리성을 개량하지만 그 결과 토양 투수성을 좋게 하여 염류 제거에 기여하기도 한다. 유기물 개량제인 퇴비의 경우 양이온을 방출하면서 토양의 높은 나트륨 비율을 개선하는 데 기여할 수 있다. 그 외에도 수용성 유기물은 이동성이 낮은 양이온과 수용성 작물을 형성하여 양이온이 용탈을 용이하게 해 준다 (Kuiters and Mulder, 1993). 또 다른 개량제로 토양의 나트륨 비율을 낮추는 데에 효과적인 칼슘 (Ca)을 함유한 석고가 있다 (Kim et al., 2005; Baek et al., 2008). 석고 내 칼슘은 토양 중 Na^+ 이온을 대체하여 토양 콜로이드 입자가 응집하는 데에 기여하는 것으로 알려져 있다 (Lee and Yun, 2014). 본 연구에서는 간척지 토양의 염류 개선 개량제로서 퇴비, 석고, 인산의 제염 효과를 구명하기 위해 토양 칼럼 실험을 통해 염류의 용탈 및 토양 잔류를 분석하였다. 여기서 인산은 간척지에 부족한 양분으로 양이온과 결합된 화합물 형태이고 특히 간척지에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} 등의 양이온이 용탈되는 것을 막을 수 있다고 판단하여 개량제로서의 효과를 검증하고자 하였다.

Materials and Methods

시험에 사용한 토양은 전라북도 부안군 계화도에 인접한 새만금 간척지에서 2013년에 채취한 사양토 (문포통, coarse loamy, mixed, nonacid, mesic family of Typic Fluvaquents)로 (Lee and Yun, 2014), 피펫법으로 분석한 토양 중 모래, 실트, 점토의 함량은 각각 627, 306, 67 g kg^{-1} 이었다 (Gee and Bauder, 1986). 채취한 토양은 풍건 후 2 mm 체로 걸러 칼럼 실험에 이용하였다. 토양 $\text{pH}_{(\text{soil}:\text{water}=1:5)}$ 은 8.1이고, Walkley-Black법으로 분석한 유기물 함량은 2.2 g kg^{-1} 이었다 (Nelson and Sommers, 1996). 토양을 1:5 비율의 증류수로 침출한 용액의 전기전도도 ($EC_{1:5}$)는 3.9 dS m^{-1} 이고 포화침출액의 전기전도도 (EC_e)는 39.8 dS m^{-1} 이었다. 암모늄아세테이트법으로 분석한 토양의 양이온교환용량 (CEC)는 5.0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이고 교환성 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 이온의 농도는 각각 0.2, 3.1, 2.2, 9.6 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이었으며 (Sumner and Miller, 1996), 교환성나트륨퍼센트 ($\text{ESP}=\text{Na}/\text{CEC}\times 100$)는 194%였다.

칼럼 실험에 사용한 PVC (ϕ 5-cm, h 25-cm)관은 윗부분이 뚫려있고 밑부분은 실리콘 튜브에 연결되어 칼럼 용리액을 받을 수 있는 형태이다. PVC관에 토양을 20 cm 높이까지 전용적밀도가 1.3 Mg m^{-3} 가 되도록 균일하게 채웠다. 이때 토양 전체 깊이의 10%에 해당하는 상층부 2 cm 토양은 처리에 따라 개량제를 혼합한 후 채웠다. 처리는 무처리 (S_{con})와 퇴비 (S_{com}), 석고 (S_{gyp}), 인산 처리 (S_{phos})로 4가지를 두었고 각 처리에 대해 3개의 컬럼 (3반복)을 준비하였다. 퇴비는 작물 중 배추 재배 기준으로 2배인 60 Mg ha^{-1} 로 처리하였고, 석고는 토양 ESP값을 기준으로 석고 요

구도에 따라 계산하여 10 Mg ha^{-1} 로 처리하였으며 (Rasouli et al., 2013), 인산은 간척지의 표토 내 부족한 인산 농도를 $20 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 만큼 높이기 위한 양을 계산하여 $1.2 \text{ Mg P}_2\text{O}_4 \text{ ha}^{-1}$ 로 처리하였다. 시험에 사용된 퇴비는 톱밥, 팽연 왕겨, 계분, 곡물박, 우분 등을 혼합하여 제조한 부산물 비료로 유기물 함량은 550 g kg^{-1} 이었다. 석고와 인산 처리에 일급 시약 순도의 황산칼슘 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)과 인산이수소칼륨 (KH_2PO_4)을 이용하였다. 토양을 채운 후 칼럼 밑으로 증류수가 유입되도록 하여 2일만에 걸쳐 토양을 서서히 포화시켰다. 포화 2일 후 토양 칼럼 윗부분에 토양 공극 용적 (PV, pore volume)의 1/2에 해당하는 증류수를 부어 24시간에 걸쳐 토양에 침투되도록 하였다. 칼럼 하단으로 침출된 용액은 부피를 측정된 후 전기전도도 (EC) 및 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 이온을 분석하였다. 위와 같은 침출 과정을 3일 간격으로 총 6회 시행하여 총 3 PV의 침출액을 받았다. 전도도 측정기 (455C, Istek, Korea)로 EC를 측정하였고, 원자흡광분광광도계 (SpectraAA 220 FS, Varian, USA)로 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 를 분석하였다. 양이온 함량을 이용하여 아래 Eq. 1로부터 나트륨흡착비 (SAR)을 구하였다:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 은 침출 용액 중 각 이온의 농도 ($\text{mmol}_e \text{ L}^{-1}$)이다. Eq. 1에 의해 SAR 단위는 $\text{mmol}^{1/2} \text{ L}^{-1/2}$ 로 나타낼 수 있으나 (Rasouli et al., 2013), 이 경우 일반적으로 생략할 수 있어 단위 없이 표기하였다. 실험 결과에 대한 통계 분석은 SAS 프로그램 (SAS Institute, Cary, NC, USA)을 이용하였다. 완전임의배치법으로 처리간 차이를 분석하였고, 처리간 차이의 유의성 비교는 최소유의차 (LSD) 검정을 이용하였다.

Results and Discussion

토양 칼럼 침출액의 염도에 대한 개량제의 효과 토양 칼럼 하단으로 용리된 침출액의 EC는 침출액의 공극 용적 (PV)이 증가함에 따라 크게 변동되었다 (Fig. 1a). 1 PV의 침출액에서 EC가 $45\text{--}48 \text{ dS m}^{-1}$ 으로 가장 높았고, 시험 토양의 포화침출액 염도 (EC_e)인 47.7 dS m^{-1} 와 비슷하였다 (Fig. 1a). 이와 같은 비슷한 값은 침출액의 EC가 용리 전 토양 공극 용액의 EC를 반영한 결과이다. 1 PV 이후 침출액의 EC는 급격히 감소하여 3 PV에서 $0.6\text{--}3.0 \text{ dS m}^{-1}$ 의 범위였고 (Fig. 1a), 기존 연구에서 시험한 벼 및 14개 밭 작물 (배추, 무, 토마토, 고추, 메밀, 콩, 참깨, 들깨, 쑥갓, 열무, 알타리, 케일, 양상치, 적상치) 대부분이 생육할 수 있는 수준이었다 (Lee et al., 2000; Choi et al., 2003; Lee et al.,

2003). 본 연구에서 EC를 5 dS m^{-1} 이하로 낮추는 데에 2 PV 이하의 증류수가 사용되었는데, 순수하게 빗물만 유입될 경우에도 비슷한 결과를 보였을 것으로 판단되고 이는 일반적으로 빗물의 염도가 $0.003\text{--}0.05 \text{ dS m}^{-1}$ 로 매우 낮기 때문이다 (Han et al., 2002). 2 PV에서 침출액의 EC값이 크게 낮아졌지만, Na 농도는 $6\text{--}31 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ 범위로 Ca, Mg, K이 $2 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ 이하인 것에 비해 매우 높았다 (Fig. 1). 이를 반영하여 용액 중 SAR도 모든 처리에 대해 27–50 범위의 높은 값을 보였다 (Fig. 2b). EC 기준으로 기존 연구의 14개 밭 작물이 생육할 수 있지만, SAR 값이 기존 연구에서 생육이 양호한 수준 (21 이하) 또는 시험한 범위 (25 이하)를 벗어났다 (Lee et al., 2000; Lee et al., 2003).

토양 개량제에 따른 침출액 EC 차이는 1.5 PV 이후로 나타났고, 대조구에 비해 개량제 처리구의 EC가 유의적으로 ($P < 0.05$) 높았다 (Fig. 1a). 이는 퇴비, 석고, 인산에서 방출된 염류와 토양에서 용리된 염류가 침출액의 EC를 높인 결과이다. 특히 2 PV 이후 석고 처리구 (S_{gyp})의 침출액 염도가 뚜렷하게 높게 유지되었는데, 석고 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)에서 방출된 Ca^{2+} , SO_4^{2-} 등이 토양 칼럼을 통해 용리되고 토양에 있던 Mg, Na이 같이 용탈된 결과이다. 이는 2 PV 이후 대조구와 비교하여 석고 처리구 침출액의 EC뿐만 아니라 Ca, Mg, Na의 농도가 높게 유지된 것이 이를 반영해 준다 (Fig. 1).

석고 처리구에서 2 PV 이후 침출이 진행될수록 침출액의 Na 농도는 낮아지고 있으나 Ca와 Mg 농도는 증가하였다. 이는 토양 콜로이드에 흡착된 양이온에 따라 용탈이 다르게 나타나기 때문이다. Na^+ 이온의 경우 다른 양이온에 비해 콜로이드 표면에 대한 흡착력이 낮기 때문에 이동 과정 중 콜로이드 표면에 재흡착하는 과정을 덜 거쳐 초기에 빠르게 용탈되고 후기에 침출액 내 농도가 낮아지게 된다 (Zaka et al., 2008). 그러나 Ca^{2+} , Mg^{2+} 이온의 경우 토양을 통해 이동하면서 콜로이드 표면에 흡착-탈착 과정을 반복하기 때문에 (Murtaza et al., 2013), 느리게 이동하게 되고 그 결과 후반부로 갈수록 용탈되는 양이 증가했다고 판단된다. 이와 같은 결과는 간척지 토양에서 Na를 선택적으로 빠르게 용탈시키는 데에 석고가 효과적임을 제시해 준다.

개량제의 Na 용탈 효과는 SAR 결과에서 뚜렷하게 나타났다 (Fig. 1b). 1.5 PV 이후 석고를 제외한 나머지 처리구의 경우 침출액의 SAR이 높게 유지되었다. 무처리구의 경우 전체 침출액에 대해 SAR이 19 이상을 유지하였고 퇴비 및 인산 처리의 경우 28보다 높아, 식물이 생육하는 데에 여전히 스트레스 요인으로 작용할 수 있는 수준이었다 (Lee et al., 2000; Lee et al., 2003). 그러나 석고 처리의 경우 1.5 PV 이후 침출액의 SAR이 급격히 감소하여 3 PV에서 3으로 낮아졌다. 퇴비와 인산에 비해 석고를 처리할 경우 적은 양의 물로 토양 용액의 나트륨 비율 (SAR)을 작물 생육

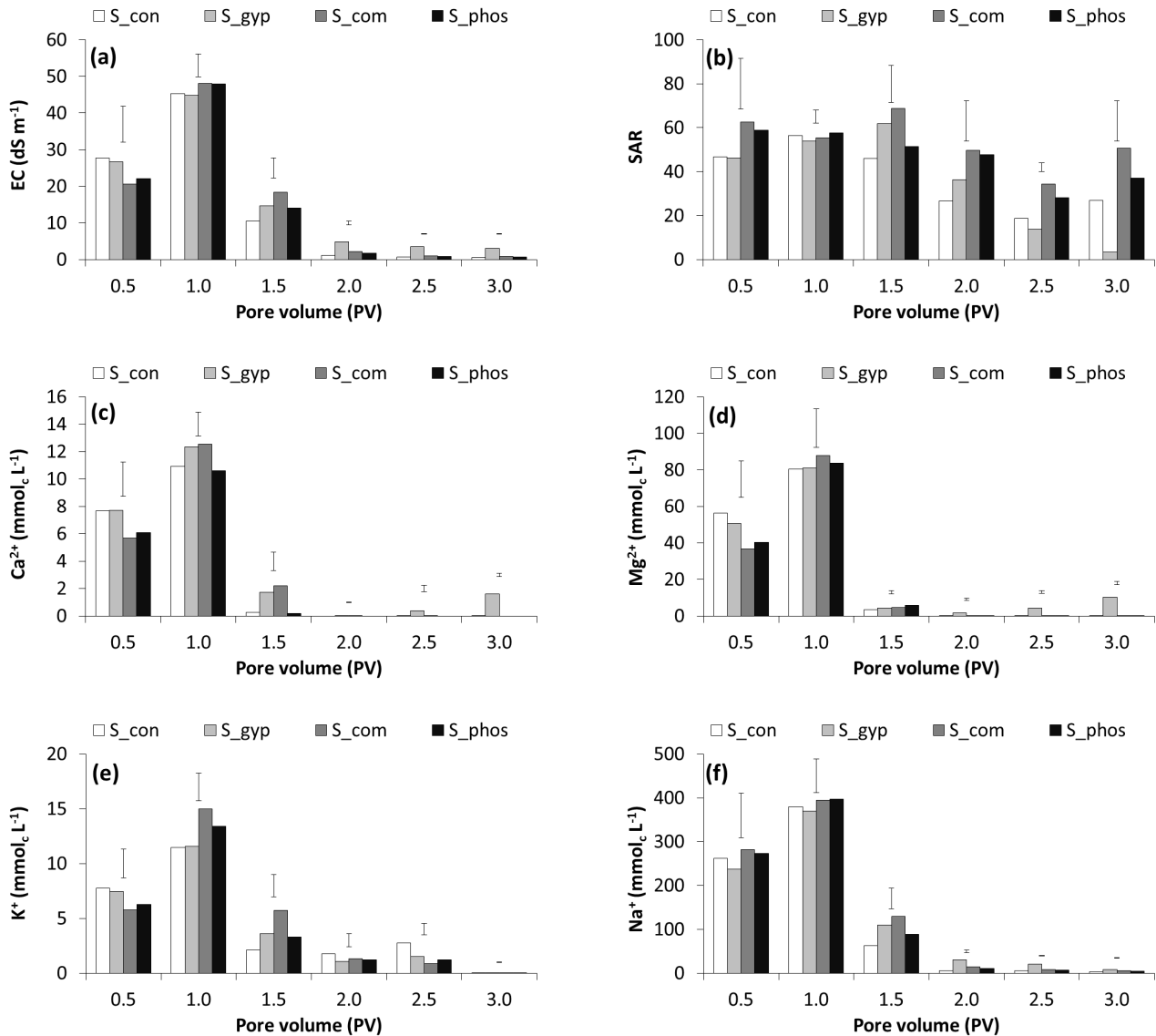


Fig. 1. Changes in (a) electrical conductivity (EC), (b) sodium adsorption ratio (SAR), and (c) Ca²⁺, (d) Mg²⁺, (e) K⁺, and (f) Na⁺ concentrations of leachate with pore volumes (PV) of water. S_con, S_gyp, S_com, and S_phos are the treatment of control, gypsum, compost, and phosphate, respectively. Values are the means of triplicates. Horizontal bars indicate LSD (P=0.05) between treatments.

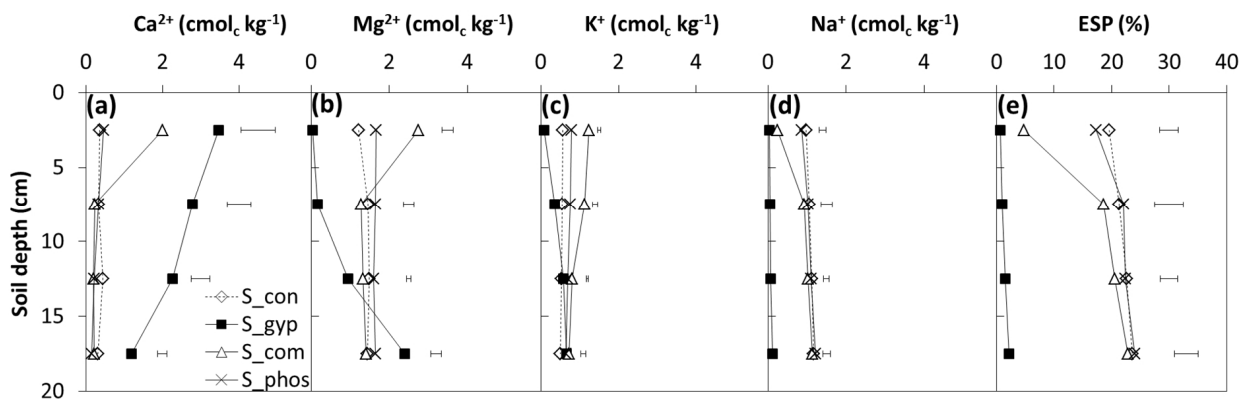


Fig. 2. Variations in (a) ammonium acetate extractable Ca²⁺, (b) Mg²⁺, (c) K⁺, and (d) Na⁺ ions and (e) exchangeable sodium percentage (ESP) with soil depth after eluting soil columns receiving no input (S_con), gypsum (S_gyp), compost (S_com), and phosphate (S_phos) with 3 pore volumes of water. Values are the means of triplicates. Horizontal bars indicate LSD (P=0.05) between treatments.

에 적합한 수준으로 낮출 수 있음을 보여준다.

토양 염도의 개량에 대한 개량제의 효과 토양 칼럼을 3 PV의 증류수로 용리한 후 토양의 교환성 양이온 농도는 Ca^{2+} 를 제외하고 초기 토양에 비해 감소하였다 (Fig. 2). 먼저 Ca^{2+} 의 경우 토양 전체 깊이에 대해 대조구 (S_{con})와 인산처리구 (S_{phos})에서 $0.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이하의 낮은 농도를 유지하였으나, 퇴비 처리구에서 0–5 cm 깊이에서만 초기 토양보다 높았다. 0–2 cm 토양 깊이에 처리한 퇴비에 의해 칼슘이 공급되어 0–5 cm 깊이에서 Ca^{2+} 농도가 증가하였지만 토양 하층으로 Ca^{2+} 의 이동이 없었음을 나타낸다. 이와 같은 결과는 대조구와 퇴비 처리구를 비교하였을 때 하층 토양에서 Ca^{2+} 농도의 유의적인 차이가 없고 ($P > 0.05$) 토양 칼럼에서 침출된 용액에서도 대조구와 비교하여 전체적으로 유의적인 차이가 없다는 점이 이를 뒷받침해 준다 (Figs. 2a, 1c). 석고 처리구에서 Ca^{2+} 농도가 전체 깊이에 대해 시험 전 토양보다 높을 뿐만 아니라 다른 처리구에 비교하였을 때에도 유의적으로 ($P < 0.05$) 높았다. 그리고 깊이에 따라 Ca^{2+} 농도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 침출이 진행됨에 따라 침출액 중 Ca^{2+} 농도가 점차 증가하는 현상과 일치하는 결과로, 석고에서 방출된 Ca^{2+} 이 토양 하층으로 아직 이동되고 있음을 나타낸다.

Mg^{2+} 이온의 경우 대조구와 비교하여 퇴비 처리에서 0–5 cm 깊이 토양 중 농도가 높았지만, 그 아래에서는 유의적인 차이가 없었다. 그러나 석고를 처리하였을 경우 상층에서 하층 토양으로 깊이가 깊어짐에 따라 농도가 크게 증가하였다. 이는 석고 내 Ca^{2+} 에 의해 토양 중 Mg^{2+} 이 교환되어 하층으로 이동되고 있음을 보여주는 결과이고, 토양 칼럼 침출액의 부피가 2 PV 이상으로 증가함에 따라 Mg^{2+} 의 농도가 증가한다는 것이 이를 잘 반영해 주고 있다.

K^+ 이온의 경우 개량제별로 서로 다른 결과를 보였다. 인산 처리의 경우 인산에 함유된 K의 공급 효과에 의해 토양 칼럼 전체적으로 K^+ 이온 농도가 $0.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 만큼 높아졌다. 퇴비 처리의 경우 대조구와 비교하여 토양 칼럼 전체적으로 K^+ 농도가 크게 높았다. 차이가 없었던 Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 다르게 K^+ 은 이동성이 좋아 하층으로 이동되고 있음을 보여준다 (Jalali and Rowell, 2009). 석고 처리의 경우 K^+ 농도는 상층 토양에서 대조구와 비교하여 크게 낮았고, 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 Mg^{2+} 이온과 비슷한 경향을 보여 Ca^{2+} 이온에 의해 토양 칼럼 내 K^+ 이온이 하층으로 용탈되었음을 보여준다.

Na^+ 이온 농도는 초기 토양에 비해 모든 처리구 및 전체 토양 깊이에 대해 크게 감소하였다. 먼저 대조구의 경우 토양 칼럼 깊이에 따라 $1.0\text{--}1.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 좁은 범위의 농도 변화를 보였다. 개량제 중에서 석고 처리의 효과가 가장 크게 나타났는데, 전체 깊이에 대해 $0.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이하로

크게 낮았다. 퇴비 처리구의 경우 퇴비가 유입된 상층 토양이 대조구에 비해 낮았지만, 하층 토양에서는 대조구와 유의적인 차이가 없었다. 인산은 토양 칼럼 전체 깊이에 대해 대조구와 차이가 없었다. 위의 결과는 토양에 흡착된 Na^+ 이온의 용탈에 석고가 매우 효과적이며, 퇴비와 인산의 효과는 작다는 것을 보여준다.

토양 중 교환성 나트륨의 비율인 ESP는 각 개량제가 토양에 양이온을 공급하는 효과 및 토양에 존재하는 양이온을 용탈하는 효과를 잘 반영해 주고 있다. 먼저 대조구의 경우 초기 토양에 비해 ESP 값이 감소하였지만, 여전히 20–24%의 높은 비율을 유지하고 있어 식물 생육에 불리한 조건이었다 (Lee et al., 2000; Lee et al., 2003). 개량제의 처리 효과는 석고가 가장 좋았는데, 토양 칼럼 전체 깊이에 대해 ESP 값이 3% 이하로 감소하였다. 이는 석고에 의해 Ca이 공급되고 이에 의해 Na이 용탈된 결과이다. 퇴비의 경우 상층 토양에서 ESP 값이 5%였으나, 하층 토양에서는 대조구와 비슷한 높은 수준 (19–23%)을 유지하였다. 인산 처리도 하층 토양에서 17%의 높은 ESP값을 보였다.

결론으로 토양 내 양이온의 용탈에 대한 개량제의 효과에 대해 시험한 결과 석고의 효과가 가장 좋았다. 석고에 함유된 Ca이 토양에 공급되면서 토양 용액의 염도를 증가시켰지만, 토양에서 나트륨 비율 (ESP)을 낮추는 데에 기여하였다. 퇴비는 Ca, Mg, K 등을 공급하는 효과에 의해 표층 토양의 ESP를 낮추었다. 그러나 퇴비에 의해 공급된 양이온이 하층으로 이동되거나 Na를 제거하는 효과는 없었다. 인산 또한 K를 토양에 공급하는 효과는 있었지만 Ca, Mg을 토양에 유지시켜주는 효과는 관찰되지 않았다. 따라서 본 연구의 결과는 나트륨 농도가 높은 간척지 토양을 개량하는 데에 퇴비와 석고 모두 효과가 있지만, 퇴비는 처리된 얇은 토양 층에 유효하고 토양 하층까지 나트륨 농도를 낮추는 데에는 석고가 효과적임을 제시해 준다.

References

- Baek, S.H., S.U. Lee, D.G. Kim, J.W. Heo, and S.J. Kim. 2008. Influence of gypsum, popped rice hulls and zeolite on contents of cation in reclaimed tideland soils in Mangyeong. *Korean J. Environ. Agric.* 26:321-327.
- Choi, W.Y., K.S. Lee, J.C. Ko, S.Y. Choi, and D.H. Choi. 2003. Critical saline concentration of soil and water for rice cultivation on a reclaimed saline soil. *Korean J. Crop Sci.* 48:238-242.
- Jalali, M. and D.L. Rowell. 2009. Potassium leaching in undisturbed soil cores following surface applications of gypsum. *Environ. Geol.* 57:41-48.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, p.383-411. In: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed., ASA and

- SSSA, Madison, WI, USA.
- Han, M.Y., R.I. Lee, M.H. Kim, and Y.J. Kim. 2002. A study on pH and electrical conductivity of harvested rainwater in Seoul. *J. Korean Soc. Water Wastewater* 16:80-86.
- Kang, J.G., S. Lee, K.B. Lee, K.D. Lee, G.H. Gil, J.H. Ryu, K.H. Park, S.H. Lee, H.S. Bae, S.A. Hwang, S.W. Hwang, H.K. Kim, and G.H. Lee. 2014. Effect of cultivation and application of green manure crop on soil physico-chemical properties in Saemangeum reclaimed tidal land. *Korean J. Int. Agric.* 26:54-61.
- Kim, S.J., S.H. Baek, S.U. Lee, D.K. Kim, and Y.J. Na. 2005. Effect of gypsum, popped rice hull and zeolite on soil aggregation in reclaimed tideland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38:231-237.
- Kuiters, A.T. and W. Mulder. 1993. Water-soluble organic matter in forest soils. *Plant Soil* 152:225-235.
- Koo, J.W., J.K. Choi, and J.G. Son. 1998. Soil properties of reclaimed tidal lands and tidelands of western sea coast in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31:120-127.
- Lebron, I., D.L. Suarez, and F. Alberto. 1994. Stability of a calcareous saline-sodic soil during reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1753-1762.
- Lee, J.E. and S.I. Yun. 2014. Effects of compost and gypsum on soil water movement and retention of a reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:340-344.
- Lee, S.H., S.H. Yoo, S.I. Seol, S.I., Y. An, Y.S. Jung, and S.M. Lee. 2000. Assessment of salt damage for upland-crops in Dae-Ho reclaimed soil. *Korean J. Environ. Agric.* 19:358-363.
- Lee, S.H., B.D. Hong, Y. An, and H.M. Ro. 2003. Relation between growth condition of six upland-crops and soil salinity in reclaimed land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36: 66-71.
- Moon, Y.H., Y.R. Kwon, B.K. Ahn, D.H. Kim, and S.S. Han. 2011. Impact of compost application on improvement of rice productivity and quality in reclaimed soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:808-813.
- Munns, R. and A. Termaat. 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13:143-160.
- Murtaza, G., B. Murtaza, B., H. M. Usman, and A. Ghafoor. 2013. Amelioration of saline-sodic soil using gypsum and low quality water in following sorghum-berseem crop rotation. *Int. J. Agric. Bio.* 15:640-648.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter, p.961-1010. In: D.L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis. Chemical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Rasouli, F., A.K. Pouya, and N. Karimian. 2013. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid of Iran as affected by applied gypsum. *Geoderma* 193-194:246-255.
- Sumner, M.E. and W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients, p.1201-1229. In: D.L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis. Chemical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Zaka, M.A., H.U. Rafa, S.M. Mehdi, and O.U. Rehman. 2008. Amelioration of saline-sodic soil by flushing and leaching. *Soil Environ.* 27:171-176.