

토양중 Na⁺ 이온이 간척지 토주의 수리전도도와 용출수의 화학성 변화에 미치는 영향

유진희 · 정덕영¹ · 양창휴 · 이상복 · 최원영 · 김시주

국립식량과학원, ¹충남대학교 농업생명과학대학

Effect of Na⁺ ion on Changes in Hydraulic Conductivity and Chemical Properties of Effluent of Reclaimed Sandy Soil Column

Jin-Hee Ryu, Doug-Young Chung^{1,*}, Chang-Hyu Yang, Sang-Bok Lee, Weon-Young Choi, and Si-Ju Kim

National Institute of Crop Science, RDA, Iksan 570-080, Korea

¹College of Agricultural and Life science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

In order to identify the effect of soil salinity on saturated hydraulic conductivity in reclaimed paddy soils, we established the soil columns uniformly packed with soils collected at every 20 cm up to 60 cm from the reclaimed paddy area with high and low salinity which has been cultivated rice plants for the last 30 years. The soil textures were sandy loam and loamy sand for high-salinity and low-salinity topsoils, respectively. For high-salinity and low-salinity soils the ECes were ranged from 25.2 to 37.8 dS m⁻¹ and 3.0 to 3.4 dS m⁻¹ while the ESPs were ranged from 7.70 to 20.84 % and from 5.12 to 11.33 %, respectively. The bulk densities of the soil columns were adjusted to 1.15 ± 0.03 g cm⁻³. The results of the soil column experiments shows that the stabilized saturated hydraulic conductivity of low-salinity soil was 0.62 cm hr⁻¹ at the topsoil while there were little water flow at the bottom of the soil columns packed with high-salinity soils. After removal of Na⁺ ions with 1N NH₄OAc from the high-salinity soil, K_{sat} of the saline soil was drastically increased to 0.23 cm hr⁻¹. Soil columns of high-salinity topsoil treated with four different concentration of NaCl influent after removal of soluble and exchangeable cations with 1N NH₄OAc show K_{sat} in the range of 0.1~0.15 cm hr⁻¹ and the K_{sat} slightly decreased as the concentration of NaCl influent was increasing. Conclusively, we could assume that Na⁺ can be significantly contributed to the saturated hydraulic conductivity in newly reclaimed sandy soil.

Key words : Reclaimed paddy soil, Saturated hydraulic conductivity, Soil washing, Sodium content

서 언

우리나라의 농경지는 도시화와 산업화로 인해 잠식되어 현재 그 면적이 급속히 감소되고 있는 추세에 있다. 이러한 상황에서 간척사업을 통한 국토의 확장은 기본적인 식량기지로써 농경지를 확보할 수 있다는 면에서 큰 의의를 가진다.

새로이 조성된 간척지 토양은 일반적으로 지하수위가 높고 수직배수가 불량하며, 높은 염농도로 인하여 토양용액내 삼투압이 높아 작물의 정상적인 생육이 불가능하다. 따라서 일정 수준까지 제염이 이루어져야 작물의 재배가 가능한데 제염과정은 일종의 용질이동으로 용매인 토양수분의 이동과 병행하여 일어난다

(Yoo and Lee, 1988; Yoo et al., 1993).

간척지 토양의 제염을 위해서는 토양의 물리·화학적 특성에 대한 이해가 중요하다. Koo et al.(1986)은 염해토양의 개량에 있어서 가장 중요한 요소는 제염을 위한 충분한 수리전도도(Hydraulic conductivity)의 유지로 투수성이 비교적 양호한 토양에서 효과적인 제염방법은 수리전도도를 증가시켜 지하배수에 의해 염분을 용탈시키는 방법이라고 하였고, Yoo and Lee(1988)는 간척지토양의 제염을 위해서는 토양의 물리적 측면뿐만 아니라 토양내 치환성 Na⁺이온과 석회물질의 Ca²⁺이온과의 치환반응 같은 토양의 화학적 측면에 관한 이해가 중요하다고 하였다.

담수되어 있는 토양에서 물의 이동은 주로 중력의 작용에 의해 물이 하강하는 포화상태의 흐름(포화류: saturated flow)인데, 이는 논토양의 투수성(permeability)과 밀접한 관계에 있고 물의 점성계수

접수 : 2009. 9. 21 수리 : 2009. 10. 25

*연락처 : Phone: +82428216739,

E-mail: dychung@cnu.ac.kr

와 장력·공극률·입자의 크기와 모양·배열상태·고상의 비표면적·지하수위 등과 같은 환경조건에 의하여 크게 영향을 받는다(Cho et al., 2002; Michaels et al., 1954). 또한 토양의 수리전도도는 토양중 양이온의 종류와 함량, 그리고 침출액의 전해질 농도와 밀접한 관계를 가지며 이와 관련하여 다수의 연구결과가 보고되었다(Ahmed et al., 1969; Alperovitch et al., 1981; Alperovitch et al., 1985; Frenkel et al., 1978; Shainberg et al., 1987; Shainberg et al., 1988; Keren et al., 1988; Dikinya et al., 2004).

본 연구는 토양중 염류가 간척지 논토양의 수직배수에 미치는 영향을 구명하고자, 1968년에 방조제가 완공되어 지난 30여 년간 벼를 재배해온 계화도 간척지 시험포장에서 염농도가 높은 지점과 낮은 지점을 대상으로 표토와 심토를 채취하여 토양의 물리·화학성을 조사하였다.

재료 및 방법

토양시료 채취 및 분석 시험토양은 전북 부안군 소재 농촌진흥청 계화도시험지의 문포통을 선택하였다. 이 토양의 염농도가 높은 지점과 낮은 지점에서 표토(0~20 cm)와 심토(20~60 cm)를 채취하여 음건 후 2 mm체를 통과시킨 것을 실험에 사용하였다. 시험토양의 물리·화학성은 Table 1과 같다. 시험토양의 토성은 사양토(Sandy Loam)~양질사토(Loamy Sand)였고, 7.5~12.5 %의 점토를 함유하고 있었다. 시험토양을 U.S. Salinity Laboratory Staff의 분류기준(1954)에 의거 분류한 결과, 고염지 표토는 saline soil 이었고, 고염지 심토는 saline-sodic soil에 해당하였으며, 저염지 표토 및 심토는 일반 토양(normal soil)에 해당되었다.

포화수리전도도 및 이온 용출 토주실험은 30 cm Acryl 원통 (I.D 5 cm)을 이용하여 고염지와 저염지 표토 시료를 각각 18.5cm로 충전하여 컬럼내 용적밀도가 1.15 g cm⁻³가 되도록 하였다. 포화수리전도도 (Saturated Hydraulic Conductivity; K^{sat}) 측정은 토주(土柱)를 증류수를 이용하여 모세관 상승에 의해

상향 포화시킨 후 토주의 상단부 표층에 증류수로 10.5 cm깊이로 일정수두(Constant head method)를 유지하면서 조사하였다. 이때 토주의 바닥면에서 용출수를 수집하여 시간에 따른 용출액의 부피를 측정하여 포화수리전도도를 Darcy's Law(식 1)에 따라 환산하였다.

$$q = k_{sat} \frac{dH}{L} \quad (\text{식 1})$$

여기서 q(flux)는 $\frac{Q}{A \cdot T}$ 를 의미하며 Q는 유량, A는 수분이 통과하는 토주의 단면적, T는 유량(Q)을 얻는데 소요된 시간을 의미하고, K_{sat}는 포화수리전도도이며 $\frac{dH}{L}$ 는 수두차이를 수분이 통과하는 토양의 길이로 나눈 수리편차(hydraulic gradient)를 의미한다. 용출수의 분석은 양이온을 분석하기 위해 ICP(Varian Vista-MPX)를 사용하였고, 음이온을 분석하기 위해 Ion Chromatography(Dionex DX-500, AS14 Column)를 사용하였다.

토양 세척에 따른 포화수리전도도 고염지 표토 시료에 증류수를 토양무게에 대하여 1:2의 비율로 가하고 10분간 진탕·세척한 후 상등액을 제거하고, 이 토양을 105°C 12시간 건조후, 다시 1N NH₄OAc를 1:2의 비율로 가하고 10분간 진탕 후 상등액을 제거하였으며 또한 이 토양을 다시 105°C, 12시간 건조한 후, 0.1eq L⁻¹ oxalic acid를 1:2의 비율로 가하고 10분간 진탕한 후 상등액을 제거하여 수용성 및 치환성 양이온과 음이온을 제거하였다. 이와 같이 증류수, 1N NH₄OAc, 0.1eq L⁻¹ oxalic acid로 연속하여 세척하고 남은 고염지의 표토 토양을 30cm, Acryl 원통(I.D 2 cm)에 5 cm 높이로 충전하여 컬럼내의 용적밀도를 1.15 g cm⁻³로 조정하였다. 이 토주를 증류수로 토주의 밑면으로부터 상향 포화시킨 후, 토주의 상단 표층에 증류수로 수두를 10 cm로 일정하게 유지하면서 토주의 바닥면에서 용출수를 수집하여 시간에 따른 용출액의 부피를 측정하여 포화수리전도도를 측정하였다. 이와 동일한 방법으로 토양에 대하여 1:3, 1:5, 1:7의 희석비율(Dilution Factor 3, 5, 7)에서 토양을 세척하여 포화수리전도도를 측정하였다.

Table 1. Physico-chemical properties of the high-salinity and low-salinity soils used in this experiment.

	pH	EC _e	OM	ESP	CEC	Particle Size Distribution			Soil Texture	
						Clay	Silt	Sand		
	1:5	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	%	cmol _e kg ⁻¹	----- % -----				
High-salinity soil	0~20cm	7.9	25.2	15.8	7.70	8.13	12.5	20.0	67.5	Sandy Loam
	20~60cm	9.0	37.8	9.2	20.84	6.19	10.0	17.5	72.5	Sandy Loam
Low-salinity soil	0~20cm	7.8	3.0	11.5	5.12	7.52	7.5	12.5	80.0	Loamy Sand
	20~60cm	9.6	3.4	8.0	11.33	6.06	10.0	12.5	77.5	Sandy Loam

토양의 양이온 제거 및 NaCl 처리에 따른 포화수리 전도도 고염지 표토 시료에 1N NH₄OAc를 토양무게에 대하여 1:10의 비율로 가하고 1시간 진탕하여 토양내 수용성 및 치환성 양이온의 대부분을 제거한 후, 이 토양을 30 cm Acryl 원통(I.D 5cm)에 5 cm로 충전하여 컬럼내 용적밀도가 1.15 g cm⁻³가 되도록 하였다. 이 토주를 증류수와 NaCl 용액(1, 2.5, 5, 10 cmol L⁻¹)으로 토주의 밑면으로부터 상향 포화시킨 후, 토주의 상단부 표층에 증류수로 수두를 15cm 깊이로 유지하면서 토주의 바닥면에서 용출수를 수집하여 시간에 따른 용출액의 부피를 측정하여 포화수리전도도를 측정하였다.

결과 및 고찰

포화수리전도도 및 이온 용출 Fig. 1에 저염지 표토의 포화수리전도도 값을 공극수량에 대한 변화값으로 나타내었다. 토주실험 결과 저염지 표토는 용출액이 12.3 공극수량(pore volume)에 도달한 후에 포화수리전도도값 0.623 cm hr⁻¹을 나타냈다.

반면 고염지 표토는 용출수의 하향이동이 거의 일어나지 않아 K_{sat}의 측정이 불가능하였다. 토양의 수리전도도는 토양내에 존재하는 점토광물의 종류와 치환성양이온의 조성 및 공극수의 전해질 농도에 의존한다(Quirk et al., 1955). 일반적으로 사질 논에서 K_{sat} 값은 대체로 10⁻²~10⁻³ cm sec⁻¹ 정도인데(Cho et al., 2002), 저염지 표토와 고염지 표토의 투수성이 이와 같이 차이가 나는 것은 토양중 염류가 토양의 포화수리전도도에 큰 영향을 미치고 있기 때문으로 판단되었다.

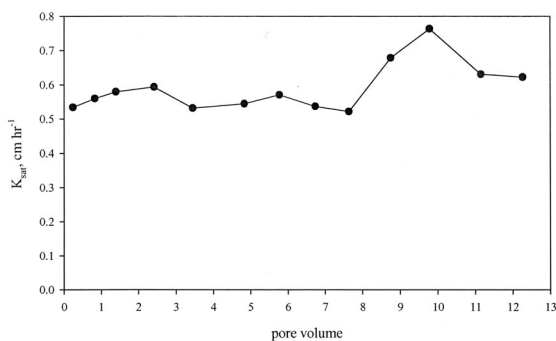


Fig. 1. Changes of K_{sat}(saturated hydraulic conductivity) of a soil column packed with surface soil of low-salinity soil.

저염지 표토의 토주(soil column) 하단에서 수집된 용출수의 EC를 공극수량(pore volume)에 대하여 나타낸 결과는 Fig. 2와 같다. 용출수의 EC는 0.83 공극수량에 도달할 때까지 급격히 증가하여 최대치를 나타내었고, 다시 2.41 공극수량까지는 급격히 감소하는

경향을 보여 주었으며, 4.84 공극수량 이후에는 낮은 값을 유지하였다.

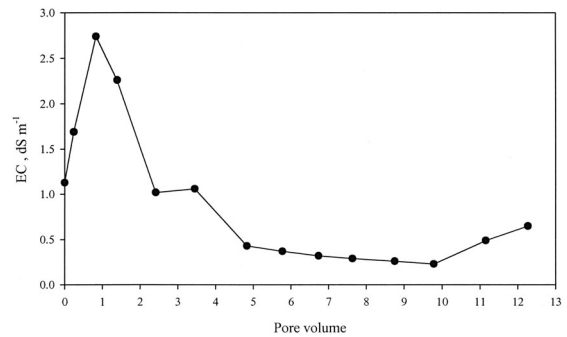


Fig. 2. Changes of EC(electrical conductivity) of effluent collected at the bottom of the soil column packed with surface soil of low-salinity soil.

저염지 표토의 토주 하단에서 수집된 용출수의 양이온과 음이온을 공극수량에 대하여 나타낸 결과는 Fig. 3과 같다. 용출수 중에는 Na⁺와 Cl⁻이온의 함량이 타 이온에 비해 크게 많았는데, 이는 이미 제염이 이루어진 저염지 토양도 이온 조성에 있어서는 간척지 토양의 특성을 계속 유지한다는 사실을 말해 주고 생각된다.

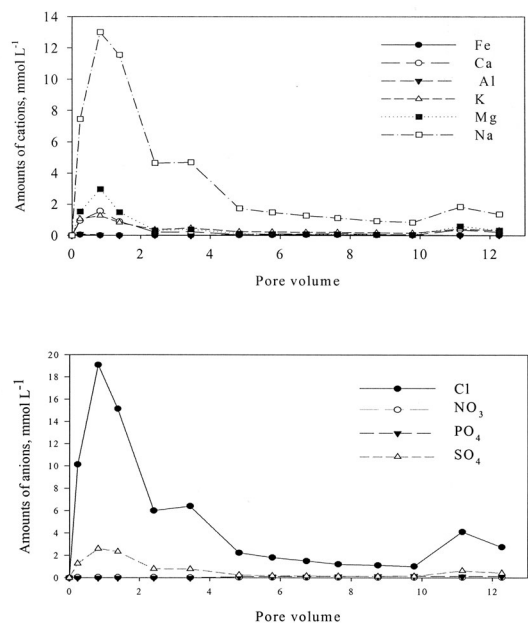


Fig. 3. Amounts of ions recovered at the bottom of soil column packed with surface soil of low-salinity soil.

세척토양의 포화수리전도도 및 이온 용출 Fig. 4에 희석요인별로 세척한 고염지 표토의 K_{sat}를 공극수량에 대한 변화값으로 나타내었는데, 1:2비율(Dilution Factor 2)로 세척한 토주에서는 25.0 공극수량이 용출

된 후에 안정화된 K_{sat} 값이 0.68 cm hr^{-1} 로 나타났고, 1:3 비율(DF 3)로 세척한 토주에서는 26.2 공극수량이 용출된 후에 안정화된 K_{sat} 값이 0.71 cm hr^{-1} 로 나타났으며, 1:7 비율(DF 7)로 세척한 토주에서는 27.0 공극수량이 용출된 후에 안정화된 K_{sat} 값이 0.73 cm hr^{-1} 로 나타났다. 종합하여 볼 때 토양에 대한 세척액량의 비가 증가할수록, 즉 희석요인(Dilution Factor)이 커질수록 K_{sat} 값은 더 커지는 것을 알 수 있었다. 이는 토양중 용질의 농도가 토양의 포화수리전도도에 영향을 미친다는 것을 말하는 것으로, 토양중 높은 염 농도는 토양의 투수성을 크게 떨어뜨릴 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

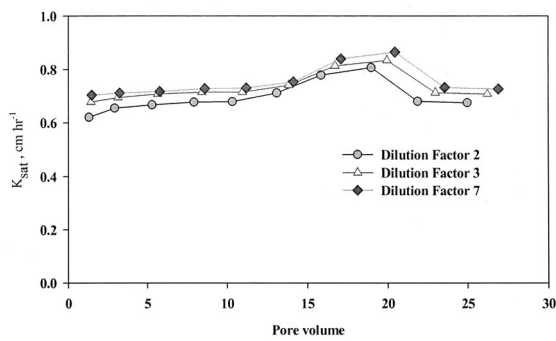


Fig. 4. Changes of K_{sat} (saturated hydraulic conductivity) of a soil column packed with washed surface soil of high-salinity soil.

세척토양의 토주실험에서 공극수량에 대한 용출수의 EC 변화치를 Fig. 5에 나타내었다. 용출수의 EC는 희석요인(DF)이 적을수록 큰 값을 나타내어 DF 2 > DF 3 > DF 7의 경향을 나타냈고, 초기 $1.20 \sim 1.70 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 지속적으로 감소되어 25공극수량 이후에는 $0.05 \sim 0.26 \text{ dS m}^{-1}$ 까지 감소되었다.

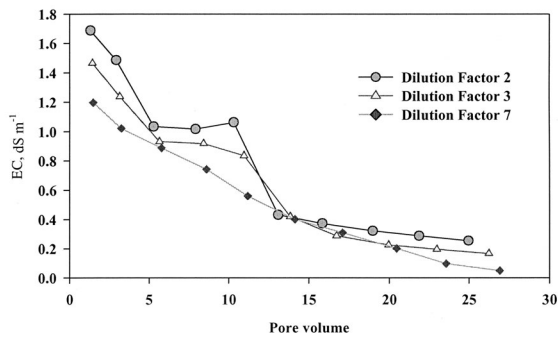


Fig. 5. Changes of EC(electrical conductivity) of effluent recovered at the bottom of the soil column after removal of soluble and solid phase ions for high-salinity topsoil.

희석요인별로 세척한 고염지 표토의 토주 하단에서 용출수를 수집하여 양이온을 조사한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 용출수 중에는 Na⁺의 함량이 단연 많았는데 희석요인 2에서 용출수의 양이온 중 K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Fe³⁺, Al³⁺은 5.3 공극수량에 도달할 때 까지 대부분 용출되었고, Na⁺는 10.3 공극수량에 도달하여 대부분 용출되었다. 희석요인 3과 7에서는 용출수의 양이온 중 K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Fe³⁺, Al³⁺은 3.3 공극수량에 도달할 때까지 대부분 용출되었고, Na⁺는 8.6 공극수량까지 대부분 용출되었다.

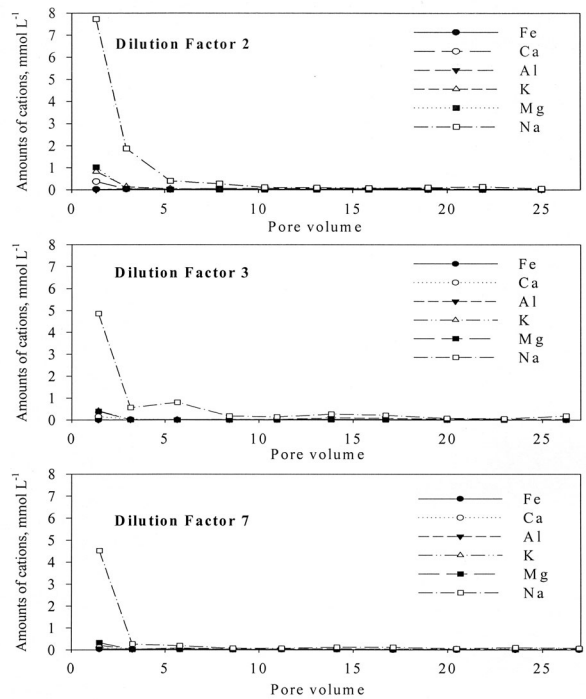


Fig. 6. Changes of amounts of cations of effluent recovered at the bottom of the soil column after removal of soluble and solid phase ions for high-salinity topsoil.

토양의 양이온 제거에 따른 포화수리전도도 Fig. 7에 1N NH₄OAc로 토양중 양이온의 대부분을 제거한 고염지 표토 토주의 포화수리전도도 변화를 공극수량에 대하여 나타내었다. 포화수리전도도는 95 공극수량 후에 안정화된 K_{sat} 값은 0.23 cm hr^{-1} 을 나타내었다. 이는 세척전 고염지 표토 토양의 투수가 이루어지지 않아 K_{sat} 값을 측정할 수 없었던 것과 비교해 볼 때 토양의 수리전도도가 현저히 증가한 결과로, 토양의 수리전도도는 치환성양이온의 종류와 삼투용액의 염농도에 크게 의존하는데 수리전도도는 치환성나트륨을(ESP)의 증가에 따라 감소되고, 삼투용액의 염농도가 감소함에 따라 감소한다는 Pupiski and Shaingerg (1979)와 Shaingerg et al.(1988)의 연구결과와 일치하였다.

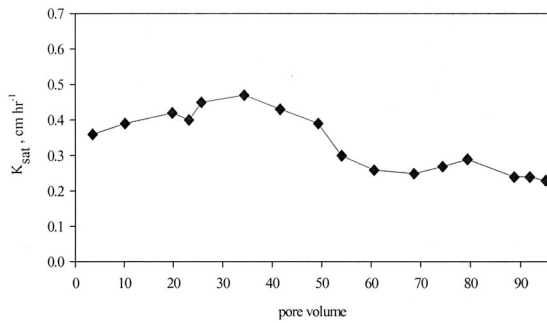


Fig. 7. Changes of K_{sat} (saturated hydraulic conductivity) of the soil column after removal of soluble and exchangeable ions with 1N NH_4OAc for high-salinity topsoil.

Fig. 8에 양이온을 제거한 고염지 표토 토주의 공극 수량에 대한 EC의 변화를 나타내었다. EC값은 25.8 공극수량까지는 급격히 감소하였고 그 후에는 큰 변화없이 낮은 값을 유지하였다.

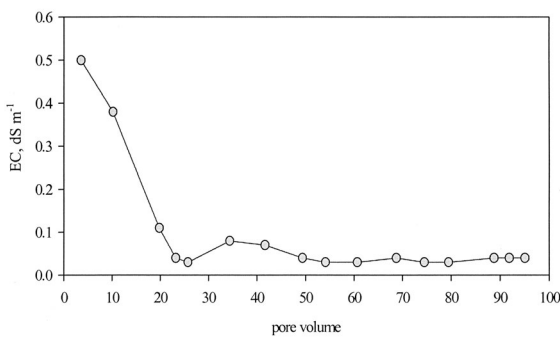


Fig. 8. Changes of EC(electrical conductivity) of effluent recovered at the bottom of the soil column of high-salinity topsoil after removal of soluble and exchangeable cations with 1N NH_4OAc .

토양의 NaCl 처리에 따른 포화수리전도도 1N NH_4OAc 로 양이온을 제거한 고염지 표토 토주에 NaCl을 농도별로 처리하고 공극수량에 대한 K_{sat} 값 변화를 조사하여 Fig. 9에 나타내었다. NaCl 처리결과, NaCl 1cmol L⁻¹로 처리한 토주에서는 58.6 공극수량이 용출된 후에 K_{sat} 값 0.15 cm hr⁻¹를 나타냈고, NaCl 2.5cmol L⁻¹로 처리한 토주에서는 57.4 공극수량이 용출된 후에 K_{sat} 값 0.15 cm hr⁻¹를 나타냈으며, NaCl 5cmol L⁻¹로 처리한 토주에서는 54.9 공극수량이 용출된 후에 K_{sat} 값 0.14 cm hr⁻¹를 나타냈고, NaCl 10cmol L⁻¹로 처리한 토주에서는 54.6 공극수량이 용출된 후에 K_{sat} 값 0.13 cm hr⁻¹를 나타냈다. 전체적으로 볼 때 NaCl의 처리 농도가 증가할수록 K_{sat} 값은 낮아지는 경향을 나타냈다. 이는 토양중의 Na⁺이온의 함량이 토양의 포화수리전도도에 영향을 미친다는 것을 말하는 것으로, 토양중 높은 Na⁺는 토양의 수리전도도를 떨어뜨린다는 결과를 얻을 수 있었다.

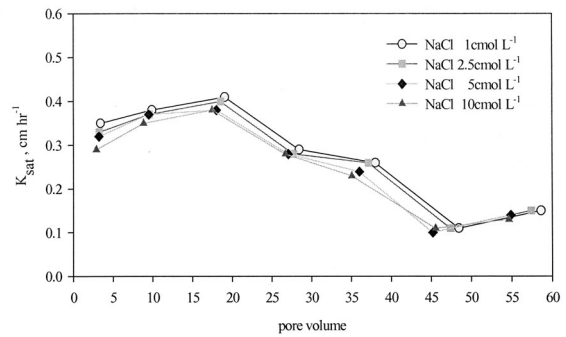


Fig. 9. Changes of K_{sat} (saturated hydraulic conductivity) of effluent recovered at the bottom of the soil column of high-salinity topsoil treated with four different concentration of NaCl influent after removal of soluble and exchangeable cations with 1N NH_4OAc .

Fig. 10에 농도별로 NaCl을 처리한 고염지 표토 토주의 하단에서 수집한 용출수의 EC 변화값을 공극수량에 대하여 나타내었다. 용출수의 EC값은 NaCl의 처리 농도 순으로 높은 값을 나타내었고, 용출액양의 증가와 함께 지속적으로 감소하여 27 공극수량 이후에는 EC값에 큰 변화가 없이 낮은 값을 유지하였다.

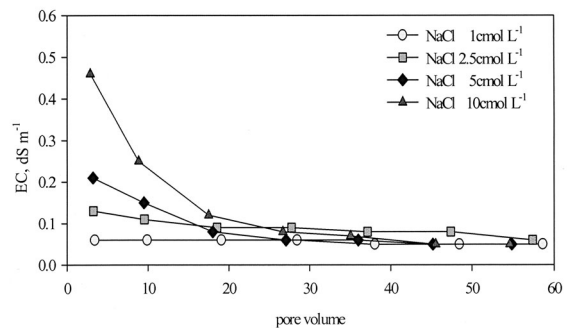


Fig. 10. Changes of EC(electrical conductivity) of effluent recovered at the bottom of the soil column of high-salinity topsoil treated with four different concentration of NaCl influent after removal of soluble and exchangeable cations with 1N NH_4OAc .

이상의 결과에서 보듯이 시험토양은 양이온 제거로 포화수리전도도가 증대되고 NaCl의 처리로 포화수리전도도가 감소되는 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 토양에 흡착된 양이온의 원자가 증가하는 토양의 수리전도도를 높이고, 흡착된 양이온의 수화반지름이 커질수록 수리전도도가 낮아지며, 원자가가 낮고 수화반지름이 큰 치환성양이온은 점토의 분산과 해교(deflocculation)을 증가시켜 수리전도도를 감소시킨다는 Rao and Mathew(1995)의 연구결과와 일치하였다. 즉 간척지토양에 다량 함유되어있고, 원자가가 낮으며 큰 수화반지름(7.9Å)을 가진 Na⁺이 간척지 논토양이 보이는 투수성 불량的重要原因이 된다고 볼 수 있었다. 따라서 토양중 Na⁺를 제거 또는 감소시키

는 효율적인 방법에 대한 연구·개발은 토양의 수직 배수를 증대시켜 염류토양이 가진 문제점을 해결하는데 매우 긴요하다고 생각된다.

적 요

전북 부안군 소재 계화도간척지 시험포장에서 토양의 염류가 농토양의 투수성에 미치는 영향을 알고자 염농도가 높은 지점과 낮은 지점을 대상으로 시료를 채취하여 토양의 물리·화학성을 조사한 결과는 다음과 같다.

시험토양은 포화침출액 전기전도도(EC_e)가 고염지 표토 25.2 dS m⁻¹, 고염지 심토 37.8 dS m⁻¹, 저염지 표토 3.0 dS m⁻¹, 저염지 심토 3.4 dS m⁻¹로 시험토양을 염류토양 분류기준에 의거 분류한 결과, 고염지 표토는 saline soil, 고염지 심토는 saline-sodic soil이었고 저염지 표토 및 심토는 일반 토양(normal soil)에 해당되었다.

토주실험 결과 저염지 표토의 포화수리전도도(K_{sat})는 0.623 cm hr⁻¹이었으나, 고염지 표토에서는 용출수의 하향이동이 거의 일어나지 않았다.

고염지 표토를 토양 무게에 대하여 1:2의 비율로 증류수, 1N NH₄OAc, 0.1eq L-oxalic acid로 연이어 세척하여 수용성 및 치환성 이온을 부분 제거하고 컬럼에 충전하여 포화수리전도도를 측정된 결과, K_{sat}값은 세척전에 투수가 거의 일어나지 않았던 것에 비하여 크게 증가하여 0.68 cm hr⁻¹을 나타내었다. 세척비율 1:3과 1:7에서 같은 방법으로 포화수리전도도를 측정된 결과 K_{sat}값은 각각 0.71 cm hr⁻¹, 0.73 cm hr⁻¹을 나타내었고 토양에 대한 희석요인이 증가할수록 K_{sat}값은 더 증가하는 경향을 나타냈다.

고염지 표토 토양을 1N NH₄OAc로 1시간 진탕·세척하여 수용성 및 치환성 양이온의 대부분을 제거한 후 컬럼에 충전하여 포화수리전도도를 측정된 결과, K_{sat}값은 0.23 cm hr⁻¹으로 크게 증가하였고, 수용성 및 치환성 양이온을 제거한 고염지 표토 토주의 하단에 NaCl용액을 농도별로 상향 포화시켜 처리한 후 포화수리전도도를 측정된 결과 K_{sat}값은 NaCl 처리 농도별로 0.13~0.15 cm hr⁻¹을 나타내었으며 NaCl의 처리 농도가 증가함에 따라 K_{sat}값은 더 낮아지는 경향을 보였다.

사 사

The research was supported by ARPC(Project No. 20090264) in 2009

인 용 문 헌

- Ahmed, S., L.D. Swindale, and S.A. El-Swaify. 1969. Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red earths and tropical black earths. *Eur. J. Soil. Sci.* 20:255-268.
- Alperovitch, N.,I. Shainberg, and R. Keren. 1981. Specific effect of magnesium on the hydraulic conductivity of sodic soils. *Eur. J. Soil Sci.* 32:543-554.
- Alperovitch, N.,I. Shainberg, R. Keren, and M.J. Singer. 1985. Effect of clay mineralogy and aluminum and iron oxides on the hydraulic conductivity of clay-sand mixtures. *Clay and Clay minerals.* 33:443-450.
- Dikinya, Oagile, Christoph Hinz and Graham Aylmore. 2004. Dispersion and re-deposition of colloidal particles and their effects on hydraulic conductivity in sandy soils. *SuperSoil 2004. 3rd Australian New Zealand Soils Conference.*
- Frenkel, H., Goertzen, J.O., and Roades, J.D. 1978. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:32-39.
- Keren, R. and M.J. Singer. 1988. Effect of low electrolyte concentration on hydraulic conductivity of sodium/calcium-montmorillonite-sand system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:368-373.
- Koo, J.W. and W. Nham. 1986. Effects of soil hydraulic conductivity on reclaiming salt-affected soils. *Bulletin of the Agricultural college, Chonbuk National University.* 17:129-135.
- Michaels, A.S. and C.S. Lin. 1954. Permeability of Kaolinite. *Industry and Engineering Chemistry.* 46:38-45
- NIAS. 1988. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Pupisky, H. and J. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:429-433.
- Quirk, J.P., and R.K. Schofield. 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *J. Soil Sci.* 6:163-178.
- Rao, S.N. and P.K. Mathew. 1995. Effects of exchangeable cations on hydraulic conductivity of a marine clay. *Clay and Clay Minerals.* 43:433-437.
- Shainberg, I.,R. Keren, N. Alperovitch, and D. Goldstein. 1987. Effect of exchangeable potassium on the hydraulic conductivity of smectite-sand mixtures. *Clay and Clay Minerals.* 35:305-310
- Shainberg, I.,N. Alperovitch, and R. Keren. 1988. Effect of magnesium on the hydraulic conductivity of Na-smectite-sand mixtures. *Clay and Clay Minerals.* 36:432-438.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Agriculture Handbook No. 60.* Washington D. C.
- Yoo, C.H., J.G. Kim, S.Y. Choi, G.H. Cho, S.J. Yoo, J.D. So, and G.S. Rhee. 1993. Studies on amelioration of soil physico-chemical properties and rice yield in sandy tidal saline paddy soil. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* 26:241-248.
- Yoo, S.H. and S.M. Lee. 1988. Laboratory study on changes in hydraulic conductivity and chemical properties of effluent of soil during desalinization. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* 21:3-10.
- 조성진, 박천서, 엄대익 등 11명. 2002. 4정 토양학. p97-98. 향문사.