

Effect of Subsurface Drainage Systems on Soil Salinity at Saemangeum Reclaimed Tidal Land

Sanghun Lee*, Hui-Su Bae¹, Soo-Hwan Lee¹, Yang-Yeol Oh¹, Jin-Hee Ryu¹, Jong-Cheol Ko, Ha-Chul Hong¹, Yong-Doo Kim¹, and Sun-Lim Kim¹

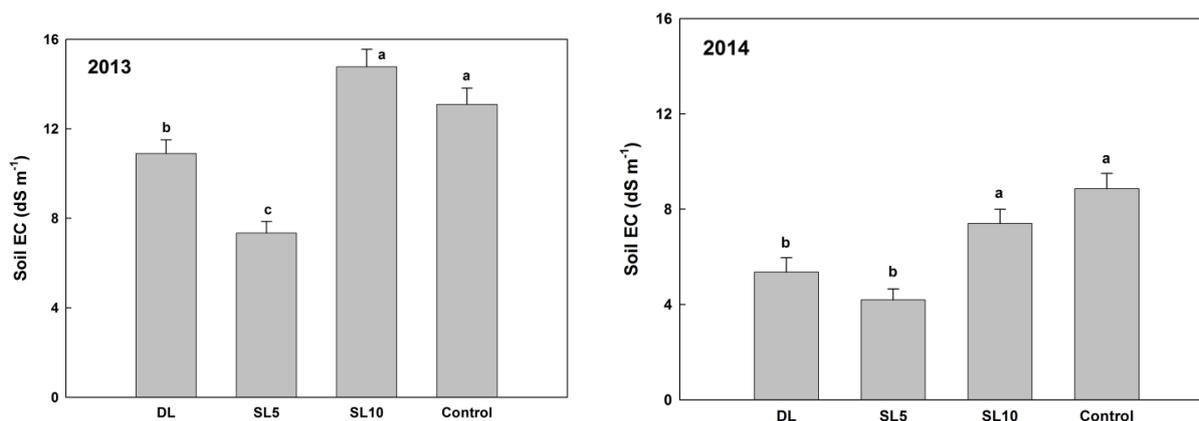
National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Miryang 50424, Korea

¹*National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju-gun 55365, Korea*

(Received: April 14 2015, Revised: October 30 2015, Accepted: November 5 2015)

Soil salinity is the most critical factor for crop production at reclaimed tidal saline soil. Subsurface drainage system is recognized as a powerful tool for the process of desalinization in saline soil. The objective of this study was to investigate the effects of subsurface drainage systems on soil salinity and corn development at Saemangeum reclaimed tidal saline soil. The field experiments were carried out between 2012 and 2014 at Saemangeum reclaimed tidal land, Buan, Korea. Subsurface drainage was installed with four treatments: 1) drain spacing of 5 m, 2) drain spacing 10 m, 3) double layer with drain spacing 5 m and 10 m, and 4) the control without any treatment. The levels of water table showed shorter periods above 60 cm levels with the deeper installation of subsurface drainage system. Water soluble cations were significantly greater than exchangeable forms and soluble Na contents, especially in surface layer, were greatly reduced with the installation of subsurface drainage system. Subsurface drainage system improved biomass yield of corn and withering rate. Thus, the biomass yield of corn was improved and the shoot growth was more affected by salinity than was the root growth. The efficiency of double layer was not significant compared with the drain spacing of 5 m. The economic return to growers at reclaimed tidal saline soil was the greatest by the subsurface drainage system with 5 m drain spacing. Our results demonstrated that the installation of subsurface drainage system with drain space of 5 m spacing would be a best management practice to control soil salinity and corn development at Saemangeum reclaimed tidal saline soil.

Key words: Subsurface drainage, Reclaimed tidal land, Saline soil, Salinity, Desalinization



Mean values of soil salinity at surface layer between April and September of 2013 and 2014. Columns labelled with the same letter are not significantly different at 0.05 probabilities. DL stands for drain spacing of 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m.

*Corresponding author: Phone: +82553501256, Fax: +82553523059, E-mail: sangusa@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01025801)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

우리나라의 곡물자급률은 지난 1970년에 80%를 웃돌았으나 해마다 감소하여 2012년에는 23.6%로 매우 낮으며, 도시화 및 산업화 등으로 인한 국내 농경지는 지속적으로 감소하고 있어 식량안보에 큰 위협이 되고 있다 (KOSIS, 2015). 이에 따라 식량자급률 증대 및 안정적인 식량 수급을 위한 경지면적 확보차원에서 국가에서 관리하는 대규모 면적의 농경지인 간척지에 대한 중요성이 더욱 커지고 있다. 간척지란 공유수면 또는 간석지(干潟地)를 매립하거나 배수하여 새롭게 조성한 토지를 말하는 것으로 우리나라 간척지 면적은 135천ha에 달해 총 경지면적의 약 9%를 차지하고 있다 (Lee et al., 2012). 특히 새만금 간척지는 식량생산기지 조성을 위해 1991년에 시작하여 2006년에 완공되어 33 km의 세계 최장의 방조제를 보유하고 있으며 새만금 간척지구 28,290 ha에 대한 토지이용 계획 중 농지면적이 8,570 ha로 전체 면적의 약 30%로 가장 큰 비중을 차지한다 (Shin, 2011).

간척지는 개발초기 식량증산을 목적으로 조성되어 벼 재배가 주를 이루고 있었지만, 쌀의 자급률이 향상되고 최근에는 작물의 다양화 및 부가가치를 향상시킬 수 있는 고소득 작물 생산기반을 통한 농업의 경쟁력 강화를 위해 밭작물 위주로 변화가 시도되고 있다. 그러나, 새만금 간척지 토양은 유기물과 점토 함량이 낮아 양분 보유력이 낮은 반면, pH와 염분농도, 치환성 Na과 Mg의 함량이 높아 일반 농경지에 비해 작물생육이 상당히 불량하다 (Lee et al., 2014). 우리나라 간척지 토양은 미사질 양토가 전체 간척지의 76%를 차지하고 있으며, 개발초기의 토양 전기전도도 값은 대부분 20~40 dS m⁻¹로 매우 높고 간척농지의 95% 이상이 배수 불량지역으로 구분되고 있다 (Seo, 2011). 간척농지에 벼 재배 시 작물 생육기간 중 담수로 인하여 토양 제염이 일어나며, 모세관 상승에 의한 염분의 표면 집적도 억제되는 효과를 나타낸다. 하지만, 밭작물 재배 시 담수를 하지 않기 때문에 기반 초기 제염과정을 통한 염농도를 낮추는 것이 필요하며, 더불어 꾸준한 재염화 억제과정을 통해 간척지 토지의 염류농도가 높아지는 것을 방지하여야 한다. 하지만, 기후 변화 등에 따른 해수면의 상승과 기온 상승으로 인한 증발산량의 증가는 간척지 토양의 염류집적 피해가 증가할 것으로 예상되고 있다 (Cazenave et al., 2014; Jung, 2014). 따라서 간척지에서 안정적인 밭작물을 재배하기 위해서는 조속한 제염 과정 및 재염화 억제기술을 통한 지속적인 관리가 필요하다.

염류 농도가 높은 염류집적 토양에서 염농도를 경감시키는 기술로는 관수제염, 심토파쇄, 객토, 미생물 제재 등의 방법들이 많이 시도되었다. 그 중 지하배수 시설을 이용한 기술은 토양의 지리적, 물리적 특성에 의해 배수가 불량하

거나 높은 지하수위를 보이는 지역에서 지표배수로 제거할 수 없는 지표 잔류수와 토양 속의 과잉수를 암거배수관을 설치하여 배수시키는 방법이다. 지하배수 시설은 표층의 물 관리를 용이하게 하여 농작업 기계의 효율성을 향상시키고, 지하수위를 낮추어 토양의 통기성을 좋게 하고 토양온도를 높이며, 작물의 뿌리발육을 촉진하고 수량을 높이는 것으로 보고되고 있다 (Kim et al., 2006; Shao et al., 2012; Shin et al., 2008). 더불어 염류집적 토양에 지하배수 시설의 설치는 표층의 염분을 하층 배수구로 제거하여 제염을 촉진시키고 모세관 상승을 억제하여 표층의 재염화를 억제시킨다 (Bao et al., 2013). 지하배수 시설은 대상 지역의 지하수위, 토성 및 토양 염농도 등 토양특성과 지하배수 시설의 구조에 의해서도 많은 영향을 받는다. 예를 들어 중국 해안가 염류집적 토양에서 수행된 연구결과 지하배수 설치 시 암거관의 간격이 좁고 설치 깊이가 깊을수록 제염효율이 증가하는 경향을 보였으며, 지하배수 설치로 1년 후 토양 염농도는 시험 전에 비해 최대 54%의 제염율을 나타내 지하배수 시설이 토양 염농도 개선에 긍정적인 영향을 주는 것으로 평가되었다 (Shao et al., 2012). 또한 새만금 간척지 계획지구 에 5 m와 8 m 간격으로 암거배수관을 설치하면, 토양 염농도가 0.3%에 도달하는 시간이 무처리에 비해 각각 1/3과 2/3로 단축시킬 수 있다고 보고하였다 (Kim et al., 1997). 또한 지하배수 시설의 구조도 중요한 요소로 지하배수관을 다중구조로 설치 시 토양 염농도 및 지하수위 저감효과가 더 큰 것으로 보고하였다 (Hornbuckle et al., 2007).

정부는 간척사업을 진행 중이거나 준공 후 미 처분된 서남해안 11개 간척지 (시화, 화옹, 석문, 남포, 이원, 새만금, 영산강, 군내, 보진, 삼산, 고흥간척지)의 다원적 활용을 위해 지구별 특성화 방안을 구상하여 고시 하였으며 현재 다양한 밭작물 재배가 시도되고 있다. 이에 따라 염류농도가 높은 간척지 토양의 제염 및 재염화 억제효과는 지하수위 및 토양 염농도 등 토양특성과 지하배수 시설의 구조에 의해서도 많은 영향을 받기 때문에 이러한 요인들을 고려하여 각 지역에 맞는 최적의 제염관리방안 및 밭작물 재배에 필요한 영농관리기준을 세우는 것이 절실히 요구되고 있다. 그러나, 우리나라 새만금 간척지에 지하배수 시설에 의한 지하수위 저감효과 및 제염효율성과 지하배수관의 다중구조에 대한 연구는 상당히 미미한 수준이다. 따라서, 본 연구에서는 현재 조성중인 새만금 간척지 토양의 심토에 유공 암거배수관의 설치 구조에 따른 토양수분과 염의 이동특성을 구명하고 안정적인 작물 생산을 위한 간척지 지하배수 시설의 설치기준을 제시하고자 수행되었다.

Materials and Methods

시험 토양 및 기상조건 본 연구는 신간척지 토양의

지하배수에 의한 제염효율 및 토양 염농도 변화를 구명하기 위하여 전라북도 부안군에 위치한 새만금 간척지 계획지구 내 국립식량과학원 시험포장 (35°46'N, 126°37'E)에서 2012년부터 2014년까지 수행하였다. 시험포장은 2006년 물막이 공사가 완공된 후 나지로 관리되고 있었다. 시험포장의 공시토양은 하해혼성 충적층 (Fluvio-marine deposit)을 모재로 한 문포토 (coarse loamy, mixed, nonacid, Mesic, Typic, Fluvaquents)이었다. 시험 토양의 pH는 6.7로서 중성을 나타내었고, Cg2층 100 cm까지 대부분 모래로 구성되어 있으며, 점토함량이 10% 내외의 사양토로 깊이 별 토양입자분포는 비교적 균일한 특성을 나타냈다. 시험 전 토양의 이화학적 특성은 Table 1에서와 같이 유기물 함량은 2.2 g kg^{-1} , 유효인산 함량은 26 mg kg^{-1} 으로 매우 낮은 함량을 보이고 있었으나, 토양 전기전도도 (EC) 값은 29 dS m^{-1} 로 매우 높은 값을 보이고 있었다. 치환성 양이온의 함량은 토양 깊이 별 큰 차이를 보이고 있지 않았지만, 수용성 양이온의 함량은 지표에서 가까울수록 높은 함량을 보여 토양 전기전도도 값과 유사한 경향을 보였다.

시험 지역의 30년 (1981년부터 2010년까지) 평균 대기 기온은 12.5°C 로서 1월에 최저기온 -0.6°C 와 8월에 최고기온 25.6°C 를 보였으며, 연중 강우량은 $1,250 \text{ mm}$ 으로 이 중 66%가 6~9월 사이에 집중되었다. 시험 기간 동안의 평균 기온 및 강우량은 2013년 13.0°C 와 2014년 13.1°C 로서 30년 평균 기온보다 높은 값을 나타내고 있었으나, 2013년과 2014년 강우량은 각각 $1,159 \text{ mm}$ 와 $1,188 \text{ mm}$ 로 30년 평균 강우량보다 낮은 강우량을 기록하였다 (KMA, 2015).

지하배수 시설 설치 및 작물재배 본 시험에 설치된 지하배수 시설은 지름 200 mm의 PVC 유공 암거관을 이용하였으며, 두 암거관 사이의 거리 및 구조에 따라 4종류(암

거관 사이의 거리가 5 m, SL5; 암거관 사이의 거리가 10 m, SL10; SL5와 SL10이 이중구조 설치된 처리구, DL; 무처리구)로 설치하였다 (Fig. 1). 각 처리구는 400 m^2 의 면적에 2012년 11월에 설치하였으며, 처리간에는 5 m의 완충지대를 두었다. 지하배수 시설은 포크레인을 이용하여 굴착작업을 하였으며 유공관내의 물고임을 방지하기 위하여 집수조와 반대쪽의 높이에 0.2%의 기울기를 주어 집수조 쪽으로 침출수가 모일 수 있도록 시공하였다. 매설된 지하배수 암거관 주위는 쇠석 (13 mm 이하)으로 충전하였다.

지하배수가 작물생육에 미치는 영향을 구명하기 위하여 옥수수 (*Zea mays*)를 공시작물로 선정하여 재배하였다. 옥수수의 공시품종은 일미찰이였으며, 옥수수는 인력 파종기를 이용하여 2012년 4월 25일, 2013년 4월 18일에 재식거리 $60 \times 20 \text{ cm}$ 로 m^2 당 8.3 본을 식재 하였으며, 4~5엽기에 1주를 제외한 나머지는 제거하였다. 시비량은 농촌진흥청 표준재배법에 준하여 표준 시비량 질소, 인산, 칼륨 비료를 $200-150-150 \text{ kg ha}^{-1}$ 를 기준으로 질소 (요소)는 밑거름으로 50%를 시비하였고, 유수형성기에 웃거름으로 50%를 시비하여 2회 분시하였다. 인산 (용과린)과 칼륨 (염화칼륨)은 전량 밑거름으로 시비하였으며 잡초 및 병해충 방제는 농촌진흥청 표준재배법 (RDA, 2000a)에 준하였다. 옥수수 수확일은 2013년 8월 20일과 2014년 8월 13일로 생육기간은 각각 121일과 113일이었다. 처리내 조사구는 임의배치 하였으며 수량 등은 처리구안에서 3반복으로 조사하였다.

토양 및 식물체 분석 토양 및 식물체 분석은 농촌진흥청 표준 분석법 (RDA, 2012)에 준하여 분석하였다. 토양 시료는 각 처리구에서 오거 (auger)를 이용하여 지표에서 10 cm 간격으로 0~10, 10~20, 20~30, 30~40 cm에서 시료를 채취하였으며, 시료는 음지에서 풍건 후 2 mm 표준체

Table 1. Chemical properties of the experimental soil at pre-experimental stage.

Soil Depth (cm)	pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	OM (g kg^{-1})	Avail. P (mg kg^{-1})	Water soluble			Exchangeable		
					Ca	Mg	Na	Ca	Mg	Na
0-15	6.7	29	2.2	26	0.68	3.5	15.8	0.73	2.6	2.9
15-30	6.8	20	2.1	33	0.46	1.8	11.8	0.82	2.4	2.5
30-45	7.0	17	2.1	30	0.40	1.2	10.2	0.96	2.3	2.4
45-60	7.3	16	2.4	41	0.33	0.9	9.0	1.13	3.0	3.4

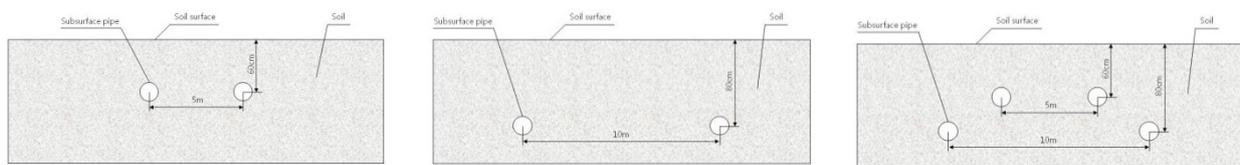


Fig. 1. Diagram of subsurface drainage systems with different depth and spacing of drains. (a) single-layer with 5 m spacing, (b) single-layer with 10 m spacing, and (c) double-layer drainage system with drain spacing 5 m and 10 m.

를 통과한 시료는 일반성분 분석용으로 이용하였고, 이중 일부는 0.05 mm 체를 통과시켜 유기탄소 및 질소함량 분석용으로 사용하였다. 토양 pH와 EC 측정은 시료와 증류수 비율을 1:5 (w/v)로 하여 30분간 진탕한 후 pH meter (Thermo, US/520A, USA)와 전기전도도 측정기 (Orion, US/162A, USA)를 이용해 측정하였다. 토양 유기탄소 측정은 건식연소법 (dry combustion)으로 800~1,000°C에서 토양 중 탄소를 연소시켜 발생하는 이산화탄소를 CN automatic analyzer (Elementar Analysen Systeme, US/VarioMax CNS, Germany)를 이용하여 분석하였다. 유효인산은 Lancaster 법으로 분광측정기 (Shimadzu, JP/UV-2501, Japan)를 이용해 720 nm에서 비색 측정하였다 (Cox, 2001). 수용성 양이온은 토양시료를 증류수와 30분간 교반하여 원심분리 (2,500g) 후 추출하였으며, 침전물은 1N-NH₄OAc (pH 7.0) 용액으로 추출한 액을 ICP-OES (Varian, Vista MPX-ICP, Australia)으로 정량분석하여 치환성 양이온으로 분석하였다. 토양의 용적밀도와 공극률은 지름 5 cm의 토양코어 (100 cm³)를 이용하여 측정하였다. 토양경도는 관입식 경도계 (Daiki, DIK-5530, Japan)으로 측정하였다. 지하수위는 각 포장의 중앙에 2 m 길이의 관을 설치하고, 지하수위 센서 (Eijkelkamp, DI-701, Netherlands)를 삽입하여 실시간으로 모니터링 하였다.

옥수수 식물체는 건물중량 및 고사율을 조사하였으며, 옥수수 수량은 1 m²의 옥수수를 채취하여 ha당 생체중으로 환산하여 계산하였다. 채취한 식물체는 70°C 항온 건조기에 72 시간 동안 건조 후 분쇄된 시료를 습식분해 (H₂O₂-H₂SO₄)하고 분해액을 여지에 여과한 후 여액은 N, P, K, Ca, Mg, Na 등의 정량에 사용하였다 (RDA, 2000b). 식물체 생육 및 수량조사는 농업과학기술연구조사기준 (RDA, 2012)에 준하였다.

통계처리 실험 데이터는 JMP (SAS ver. 5.0)를 이용하

여 ANOVA (analysis of variance)를 분석하였으며, 지하배수 시설에 의한 토양의 이화학특성 및 작물생육의 유의성 검정은 Student's t-test를 이용하여 95% 수준에서 LSD (least significant difference) 값을 이용하여 평균을 비교하였다.

Results and Discussion

지하수위 변화 시험기간 동안의 재배지 평균 지하수위는 2013년과 2014년 각각 -112 cm와 -105 cm를 나타내 95% 수준에서 연차별 유의성을 나타냈으며, 강우시 급격히 증가하고 점진적으로 감소하는 패턴을 보였다 (Fig. 2). 특히, 강우가 잦은 2014년 8~9월 평균 지하수위가 높게 유지되는 것으로 나타나 지하수위는 강우에 의한 영향이 큰 것으로 판단되었다. 시험기간 동안의 평균 지하수위는 지하배수관의 구조에 따라 차이를 보여 지표에서 80 cm 깊이에 지하배수관을 매설한 DL 및 SL10처리구에서 80 cm 이상의 지하수위를 나타낸 기간이 전체 시험기간의 13.6과 13.8%로 지표에서 60 cm 깊이에 지하배수관을 설치한 SL5 및 대조구의 25.3과 28.5%에 비해 낮은 값을 보였다. 이와 같은 결과는 지하수위의 상승 시 지하배수의 구조가 지하수위에 영향을 미친다는 Hornbuckle et al. (2007)의 연구결과와도 일치한다. 작물생육 기간 동안의 지하수위는 지하배수 시설에 의한 유의성 (p -value < 0.0001, F-value=86.2)을 나타내 SL5 처리구에서 -122 cm로 가장 낮은 값을 보였으며, DL 처리구에서 -114 cm를 보여 무처리구 (-99 cm)보다 유의성 있게 낮은 값을 보이고 있어 지하배수 시설이 지하수위를 낮게 유지시켜 주는 것으로 나타났다. 하지만, SL10 처리구는 평균적으로 -100 cm를 보여 무처리구와 유의성 (p -value=0.5112)을 보이지 않았다. 지하배수 시설은 지하수위가 -50 cm 이상인 경우가 84%, -75 cm 이상인 경우가 67%, 그리고 -100 cm 이상인 경우가 41% 감소하는 효과를

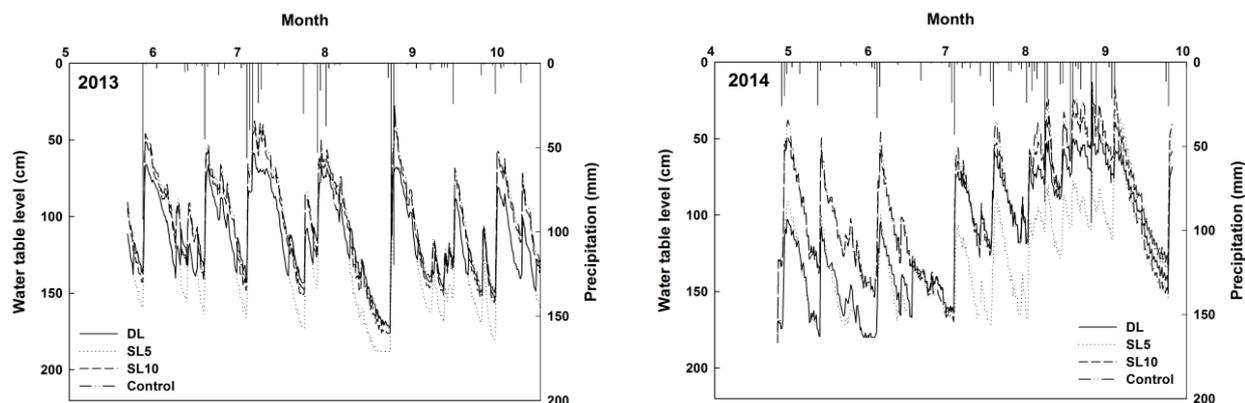


Fig. 2. Changes of water table level under the various subsurface drainage systems in 2013 and 2014. Vertical bars in each growing season indicate the precipitation. DL stands for double layer with drain spacing 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m.

나타났다. 시험 첫 해인 2013년에는 자연강우에 의한 지하수위 상승 시 지하배수 시설 처리구와 무처리구의 차이가 크지 않은 반면, 2014년에는 DL과 SL5 처리구에서 무처리구보다 낮은 지하수위를 보여 지하배수 처리구에서 지하수위를 낮게 유지하는데 더 효과적이었다.

본 시험포장의 지하수 평균 염농도는 3.4%로 매우 높았으며, 화학적 조성은 Cl가 15,700 mg kg⁻¹으로 가장 높은 값을 나타내고 있었다. 그 뒤를 Na, SO₄, Mg 함량 순으로 많이 존재하고 있어 바닷물과 비슷한 조성을 보였다. 이와 같은 결과는 새만금 간척지 지하수의 염농도가 매우 높아 작물 근권층에 가까이 지하수위가 유지될 경우 모세관 상승에 의한 재염화 현상이 일어나기 쉬어 작물의 생육에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. Kim (2013)의 연구결과에 의하면 새만금 간척지에서 토성 별 재염화 속도를 측정한 결과 새만금 간척지에서 가장 큰 면적을 차지하는 사양토의 4월에서 6월의 재염화 속도 (306.6 mm)는 미사질양토 (363.7 mm)와 차이가 크지 않은 것으로 보고 되어 있어 간척지에서 발작물 재배 시 토양 재염화에 의한 작물피해를 줄이기 위해서는 지하배수 시설을 통한 지하수위를 낮게 유지시켜주는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

토양 전기전도도 변화 Fig. 3은 암거관 사이의 거리가 5 m인 시험포장을 암거배수관이 묻혀있는 곳으로부터 50 cm 간격으로 깊이 별 토양 전기전도도 값을 나타낸 것이다. 토양의 전기전도도는 암거배수관으로부터의 거리 및 토양 깊이에 따라 유의성을 보였다 (Fig. 3). 지하배수 시설에 의한 거리 별 토양 전기전도도 값은 지표에서 가까울수록 큰 차이를 보였으며, 토양 깊이가 깊어질수록 암거배수관으로부터 거리에 의한 차이가 감소하는 것으로 나타나, 30~40 cm 깊이에서는 유의성을 보이지 않았다. 또한 토양 표토의 전기전도도 값이 높아질수록 암거배수 위의 토양 전기전도도가 급격히 증가하여 거리 별 토양 전기전도도의 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 이와 같은 시험 토양의 전기전도도는 간척지 토양의 토성과 구조에 의한 영향을 받은 것으로 시험토양은 사양질로 토양수의 수직이동이 상대적으로 쉬어 암거 배수관에서 가까운 위치에서 토양수분의 이동에 따른 제염이 표토에서 잘 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 지하배수관에서 가까운 곳에서 토양의 물리화학적 특성이 좋아져 제염률이 높아진다는 결과와도 일치한다. 예를 들어 Bao et al. (2013)는 지하배수 시설을 6 m와 8 m 간격으로 매설하고 토양 염농도와 작물생육을 조사한 결과 지하배수관 위의 토양 염농도와 용적밀도

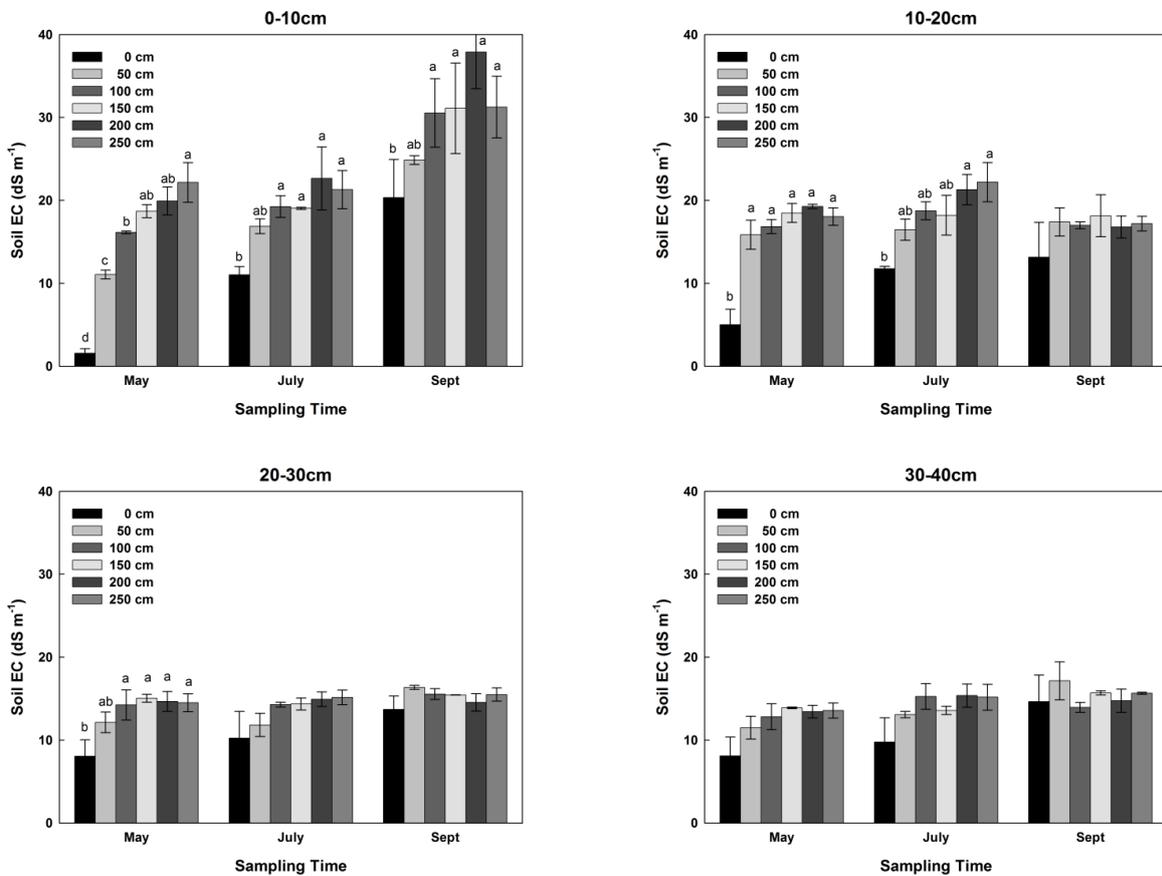


Fig. 3. Temporal and spatial dynamics of soil salinity at (A) 0-20 cm and (B) 20-40 cm layer in accordance with the installation of subsurface drainages. Columns labeled with the same letter are not significantly different at 0.05 probability.

Table 2. Changes in soil hardness and soil water content by the distance from the drain.

Depth (cm)	Distance from drain (cm)					
	0	50	100	150	200	250
----- Hardness (Mpa) -----						
0-5	0.31	0.33	0.36	0.40	0.33	0.36
5-10	0.32	0.32	0.37	0.31	0.39	0.30
10-15	0.41	0.40	0.70	0.71	0.97	0.64
15-20	1.90	2.02	2.28	2.47	2.54	2.25
20-25	2.68	2.50	2.61	2.65	2.64	2.66
25-30	2.69	2.68	2.49	2.60	2.65	2.65
Mean	1.39b	1.38b	1.47ab	1.52a	1.59a	1.48ab
----- Soil water content (%) -----						
0-10	24.5	23.0	23.3	27.2	25.0	26.2
10-20	23.8	24.1	23.1	24.8	24.9	25.4
20-30	23.7	24.4	24.2	24.7	25.1	25.9
30-40	24.2	23.7	23.6	25.1	26.6	25.2
Mean	24.0a	23.8a	23.6a	25.4b	25.4b	25.7b

Mean values with the same letter are not significantly different at the 95% level.

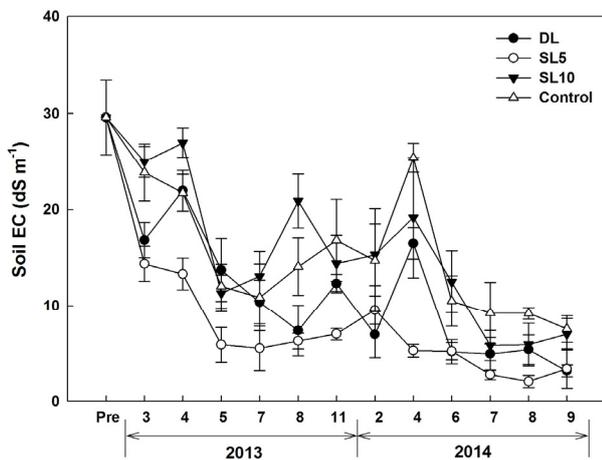


Fig. 4. Temporal changes of soil electrical conductivity (EC) at surface layer (0-20 cm) during the experimental period. DL stands for double layer with drain spacing 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m.

가 두 지하배수관 사이의 값보다 낮아져 작물수량이 증대되는 것으로 보고하였다. 본 실험의 토양 경도 및 수분함량 역시 지하배수관으로부터의 거리에 따라 유의성을 나타냈다 (Table 2). 토양 경도는 지하배수관에서 수직에 위치한 곳과 0.5 m 떨어져 있는 곳에서 각각 1.39와 1.38 MPa로 가장 낮았으며, 배수관으로부터의 거리가 멀어질수록 토양경도는 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 토양수분 함량도 비슷한 경향을 보여 지하배수관에서 1 m까지의 토양 수분함량이 더 낮은 것으로 나타나 지하배수 시설이 토양 수분을 제거하는데 효과적이지만 배수관으로부터의 거리에 의한 차이를 보여 지하배수 시설을 설치 시 배수관의 거리를 고려해야 할 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 지하배수관 매립 전부터 토양 전기전도도 값의 경시적 변화를 나타낸 그림이다. 초기 염농도 29 dS m⁻¹에

서 토양의 전기전도도 값은 감소하는 경향을 보였으며, 지하배수 처리구에서 무처리구에 비해 낮은 토양 전기전도도 값을 나타냈다. 2013년도에는 지하배수 시설 첫 해로서 DL과 SL5 처리구의 평균 염농도는 각각 10.9와 7.3 dS m⁻¹로 무처리구의 평균 토양 염농도 12.9 dS m⁻¹보다 유의성 (*p*-value < 0.0001, *F*-value=23.6) 있게 낮은 값을 보이고 있었다. 하지만, 지하배수 SL10은 14.2 dS m⁻¹로 무처리구보다 높은 토양 염농도를 나타냈다. 2014년도의 토양 염농도는 무처리구에서 7.9 dS m⁻¹로 2013년도에 비해 39% 낮은 염농도를 나타내고 있어 자연강우 및 작물재배에 따른 제염으로 염농도가 낮아진 것으로 판단된다. 2014년도 SL10처리구는 무처리구와 차이를 보이지 않은 반면, 지하배수 처리구 DL과 SL5처리구는 무처리구보다 낮은 토양 염농도를 보였다. 지하배수 처리구의 2014년 평균 염농도가 2013년에 비해 낮아졌으며, 지하배수 종류별로 보면 지하배수 DL, SL5, SL10 처리구에서 각각 50.8%, 42.9%, 47.8%의 염농도 감소율을 보여 무처리구의 감소율보다 높아 지하배수 처리가 토양 염농도 감소에 효과적인 것으로 나타났다 (Fig. 5). 본 실험의 결과는 지하배수 시설을 통해 표토의 토양 염농도가 50 dS m⁻¹에서 5 dS m⁻¹로 감소하여 지하배수 시설 설치가 염류집적 토양의 염농도 감소를 촉진한다는 결과 (Rao et al., 1991)와도 일치한다. 본 시험결과 암거관의 깊이가 깊을수록 지하수위의 상승은 감소하는 경향을 보이지만, 사양질 토양의 특성상 토양 중 염분의 이동은 수직 이동이 수평이동에 비해 크게 작용하여 암거배수관으로부터 거리가 멀어질수록 제염은 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과는 SL10의 경우 지표에서 매립된 암거 배수관이 지하수위의 상승을 억제하는 효과가 크지만, 암거배수관 사이의 거리가 멀어 제염속도가 DL이나 SL5처리구보다 낮았던 것으로 판단된다.

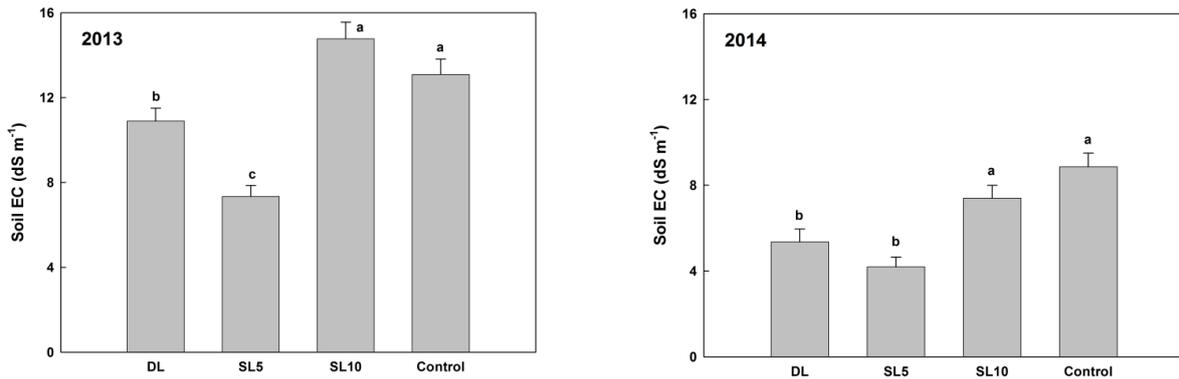


Fig. 5. Mean values of soil salinity at surface layer (0-20 cm) between April and September of 2013 and 2014. Columns labelled with the same letter are not significantly different at 0.05 probability. DL stands for double layer with drain spacing 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m.

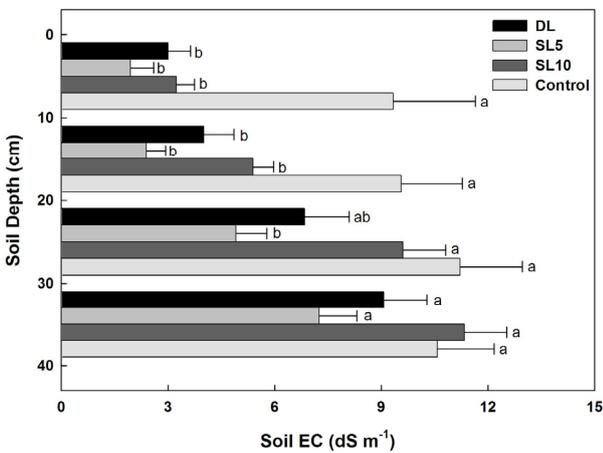


Fig. 6. Soil salinity distribution in soil profile in accordance with the installation of subsurface drainages. Levels not connected by same letter are significantly different at 0.05 probability. DL stands for double layer with drain spacing 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m. The same letters next to the error bar are not significantly different at the 95% level.

지하배수 시설을 설치한 후 2014년 옥수수 재배 후 깊이 별 토양 염농도는 Fig. 6과 같다. 지하배수 시설 처리구의 토양 염농도는 지표에서 가까운 곳에서 염농도가 가장 낮았으며 토양 깊이가 깊어질수록 토양 염농도가 높아지는 경향을 보였으나, 지하배수 무처리구의 토양 염농도는 깊이 별 유의성을 보이지 않았다. 토양 깊이가 0~10 cm와 10~20 cm에서는 무처리구와 지하배수 처리구의 차이가 있었지만, 토양 깊이가 깊어질수록 지하배수 처리구와 무처리구의 염농도 차이는 작아졌다. 또한 토양 깊이 20 cm 아래에서는 SL10처리구의 염농도가 무처리구와 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 지하배수 시설에 의한 토양 염농도가 지표에서 가까운 곳에서 그 효과가 현저하나 지표에서 깊어질수록 그 효과가 감소한다는 결과를 보여준다.

간척지 토양에 존재하는 양이온 중 가장 높은 함량을 보이는 Na와 Mg의 함량은 지하배수 시설에 의한 차이를 보여 2014년 토양에 존재하는 수용성과 치환성 함량은 Fig. 7과 같다. 토양 중 존재하는 형태별로는 수용성 Na의 함량이 치환성 Na보다 높은 함량을 보이고 있었지만, 수용성 Mg은 치환성 Mg 함량보다 낮은 값을 보였다. 본 실험의 결과는 Lee et al. (2014)는 간척지 토양에 존재하는 양이온 중 가장 높은 함량을 나타내는 이온은 Na으로 수용성 Na의 함량이 토양 염농도와 매우 높은 상관관계를 보인다는 결과와도 일치한다. 무처리구의 수용성 Na 함량은 0~20 cm 깊이에서 12 cmol_c kg⁻¹으로 20~40 cm 깊이보다 낮은 값을 보이고 있었다. 그러나, 지하배수 시설에 의한 토양의 수용성 Na 함량은 무처리구에 비해 낮은 함량을 보이고 있었으며, 특히 SL5 처리구에서 가장 낮은 수용성 Na 함량을 보였다. 20~40 cm의 수용성 Na 함량도 무처리구에 비해 낮은 함량을 보이고 있었지만, 토양 염농도는 0~20 cm의 감소율보다 낮았다. 이와 같은 결과는 지하배수 시설에 의한 토양 염농도가 지표에 가까운 표토에서 더 효과적이라는 결과와도 일치한다. 치환성 Na의 함량은 수용성 Na에 비해 낮은 함량을 보이고 있었지만, 지하배수 시설에 의한 함량이 무처리구에 비해 낮은 함량을 보이고 있었다.

옥수수 생육 시험기간 동안 옥수수 생육은 지하배수 시설에 의한 유의성을 보였다 (Table 3). 2013년도의 평균 옥수수 고사율은 54%로 매우 높은 값을 보이고 있었으며, 지하배수 시설에 의한 차이는 보이지 않았다 (*p-value*= 0.1909). 2014년도의 옥수수 고사율은 평균 33%로 2013년도에 비해 약 40% 정도 유의성 있게 감소하였다. 지하배수 DL과 SL5 처리구에서 무처리구에 비해 낮은 고사율을 보였으나, SL10 처리구는 무처리구와 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 지하배수 시설에 의한 토양 염농도의 감소에 의한 것으로 판단된다. 옥수수 수확량 역시 2013년도에

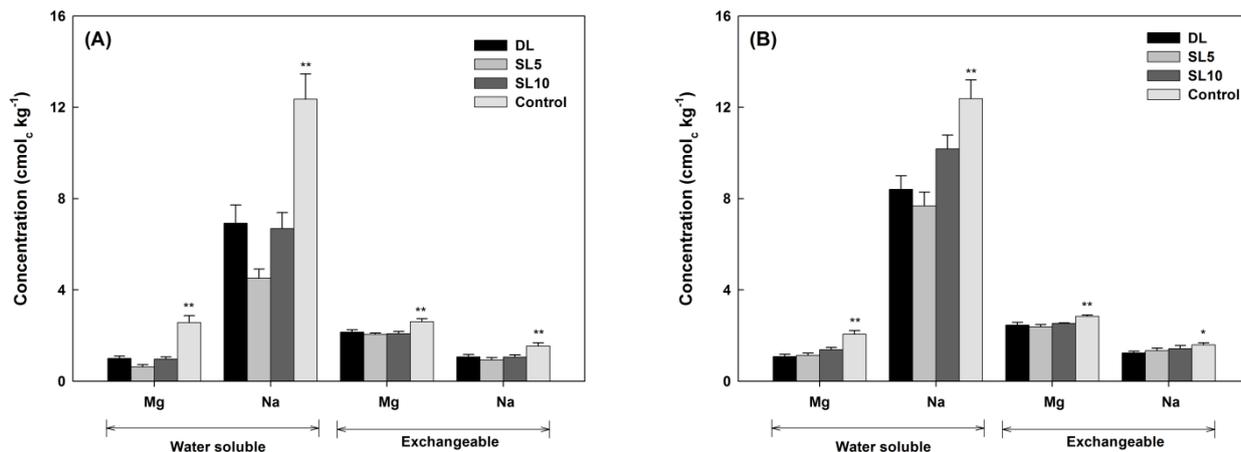


Fig. 7. The contents of water soluble and exchangeable cations in accordance with the installation of subsurface drainages. *,** levels above treatment error bars are significantly different by the treatment of subsurface drainages at 0.05 and 0.01 probabilities, respectively. DL stands for double layer with drain spacing 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m.

Table 3. Withering rate and grain yield of corn in accordance with the installation of subsurface drainages.

Subsurface drainage	Withering rate (%)		Grain yield (dw, ton ha ⁻¹)	
	2013	2014	2013	2014
DL	49.5	27.2b	0.74ab	3.04ab
SL5	42.0	19.6b	1.17a	3.86a
SL10	61.6	39.0a	0.58ab	2.05b
Control	64.8	45.9a	0.41b	2.15b
<i>p-value</i>	0.1909	<0.0001	0.0238	0.0151

DL stands for double layer with drain spacing 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m. Mean values with the same letter are not significantly different at the 95% level.

Table 4. Biomass weight (per plant) of shoot and root at two different growth timing in accordance with the installation of subsurface drainages.

Subsurface drainage	21 DAP			84 DAP		
	Shoot (g)	Root (g)	R/S ratio	Shoot (g)	Root (g)	R/S ratio
DL	12.4	3.3	0.29	71.2ab	20.7a	0.29a
SL5	15.5	3.3	0.23	91.6a	20.2a	0.22b
SL10	9.1	3.4	0.41	69.0b	15.8b	0.21b
Control	7.1	2.6	0.38	66.0b	4.5c	0.09c
<i>p-value</i>	0.1492	0.5885	0.1288	0.0245	0.0248	0.0071

DAP stands for days after planting, DL stands for double layer with drain spacing 5 m and 10 m, SL5 drain spacing of 5 m, SL10 drain spacing of 10 m. Mean values with the same letter are not significantly different at the 95% level.

비해 2014년도에서 높은 수확량을 보였다. 2013년도의 평균 옥수수 수확량은 0.73 ton ha⁻¹를 나타냈으며, 지하배수 시설에 의한 차이를 보였다. SL5 처리구에서 가장 높은 1.17 ton ha⁻¹로 유의성이 있었지만, DL과 SL10 처리구에서 0.74와 0.58 ton ha⁻¹를 보여 무처리구 0.41 ton ha⁻¹와는 차이를 보이지 않았다. 2014년도 평균 옥수수 수확량은 2.78 ton ha⁻¹로 2013년도에 비해 유의성이 있었으며, 지하배수 시설에 의한 차이도 나타났다. SL5 처리구에서 3.86 ton

ha⁻¹로서 무처리구에 비해 가장 높은 수량을 나타내고 있었으며, 그 뒤로 DL>SL10>무처리구 순으로 많은 옥수수 수량을 보였다.

토양 염농도가 높은 곳에서 작물 재배 시 뿌리와 줄기는 염해로 인해 건물수량이 감소하게 된다. 일반적으로 토양 염농도 증가에 따른 뿌리/줄기 비율은 감소하는 경향을 나타낸다. 본 시험에서는 파종 후 21일째 되는 식물의 건물수량은 지하배수에 의한 차이를 보이지 않았으며, 뿌리/줄기

비율도 95% 수준에서 유의성을 나타내지 않았다. 그러나, 파종 후 84일째 작물의 바이오매스는 지하배수 시설에 의한 차이를 보여 지상부는 무처리구에서 66 g으로 가장 작았으며, SL5 처리구에서 가장 커서 무처리구와 유의성을 나타냈다 (Table 4). 지하부도 무처리구에서 가장 적은 건물중을 보였으며, 지하배수 처리구에서 높은 건물수량을 보였다. DL과 SL5 처리구에서 가장 높은 건물중량을 보였고, SL10 처리구도 무처리구에 비해 높은 함량을 보였다. 옥수수 지상부와 지하부는 모두 무처리구에서 가장 낮은 건물중량을 보였으며, 뿌리/줄기 비율은 지하배수 처리구에서 무처리구보다 높은 비율을 나타냈다. 이와 같은 결과는 작물이 스트레스 조건하에서 뿌리/줄기 비율이 감소한다는 많은 결과와도 일치한다 (Akram et al., 2007; Kondo et al., 2000). 이와 같은 결과는 뿌리가 줄기보다 염에 대한 저항성이 크고 (Huck and Schroeder, 1995), 토양 염농도에 의한 옥수수 줄기의 성장이 뿌리의 성장보다 더 크게 영향을 받는다는 결과 (Turan et al., 2010)와도 일치하며, 새만금 간척지에서 지하배수 시설의 구조가 옥수수 생육에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Conclusion

본 연구는 새만금 간척지에 지하배수 시설을 통한 지하수위 저감효과 및 제염 특성을 구명하고 지하배수 시설의 설치기준을 제시하고자 수행되었다. 지하배수 시설은 지하수의 평균 수위가 무처리구보다 최대 23 cm 감소하는 것으로 나타나 지하수위 저감효과가 나타났다. 또한 토양 염농도는 지하배수관에서 가까운 위치에서 수분 및 염농도가 낮아지는 효과를 나타냈다. 본 시험의 결과 지하배수에 의해 작물생육기간중 표토에서 토양수분의 이동과 밀접한 관련이 있는 수용성 양이온중 Na의 함량이 크게 감소하였으며, 그에 따른 옥수수의 생육 증대 및 고사율이 감소하여 작물의 수량이 증대됨을 확인하였다. 지하배수 시설에 의한 옥수수의 뿌리/줄기 비율도 무처리구에 비해 높아 옥수수의 생육에도 도움을 주는 것으로 나타났다. 하지만, 본 시험에서는 지하배수관의 이중구조 설치는 5 m 단일 처리와 유의성을 보이지 않았다. 이상의 결과를 종합해 보면, 사양질 간척지에서는 5 m 간격으로 지하배수관을 설치하는 것이 경제적이며 간척지 토양의 염농도를 낮게 유지시켜 주어 발작물 재배시 수량 증대 효과가 있는 것으로 확인되었다.

References

Akram, M., M.A., Malik, M.Y. Ashraf, M.F. Saleem, and M. Hussain. 2007. Competitive seedling growth and K/Na ratio in different maize hybrids under salinity stress. *Pak. J. Bot.*

- 39:2553-2563.
- Bao, T., W. Huang, X.Chen, M. Xu, and M. Hou. 2013. The effects of subsurface drainage system on soil condition and tomato quality. *J. Food Agric. Environ.* 11:331-335.
- Cazenave, A., H.B., Dieng, B. Meyssignac, K.V. Schuckmann, B. Decharme, and E. Berthier. 2014. The rate of sea-level rise. *Nature Clim. Change.* 4:358-361.
- Cox, M.S. 2001. The Lancaster soil test method as an alternative to the Mehlich 3 soil test method. *Plant Soil.* 166:484-489.
- Hornbuckle, J.W., E.W. Christen, and R.D. Faulkner. 2007. Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality. *Agri. Water Manage.* 89: 208-216.
- Huck, M.G., and B.P. Schroeder. 1995. Root and shoot growth responses to salinity in maize and soybean. *Agron. J.* 87: 512-516.
- Jung, T.S. 2014. Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean Peninsula. *J. Korean Soc. Coastal Ocean Eng.* 26: 120-130.
- Kim, H.W. 2013. Analysis of soil characteristics of farming sites in Saemangeum reclaimed land. Master thesis. Chonbuk National University. Jeonju, Korea.
- Kim, D.S., J.E. Yang, Y.S. Ok, and K.Y. Yoo. 2006. Effects of perforated PVC underdrainage pipe on desalting of plastic film house soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39:65-72.
- Kim, S.S., S.Y. Lee, G.H. Han, and I.S. Eo. 1997. Underdrainage effects on soil salinity and growth of rice in Gyewha reclaimed saline land. *Korean J. Crop Sci.* 42:61-67.
- KMA (Korean Meteorological Administration). 2015. Weather information. Available at <http://web.kma.go.kr>.
- Kondo, M., M.V.R., Murty, and D.V. Aragonos. 2000. Characteristics of root growth and water uptake from soil in upland rice and maize under water stress. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46:721-732.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2015. National agricultural area. Available at <http://kosis.kr>. Daejeon. Korea.
- Lee, K.B., S.W. Hwang, and S.H. Lee. 2012. Management plan for diverse utilization of reclaimed tidal land. *Soc. Agric. Res. Reclaimed Land.* 10:18-28.
- Lee, S., H.S. Bae, H.K. Kim, T.H. Noh, and G.H. Lee. 2014. Temporal variations on soil salinity and cation displacement at Saemangeum and Yeongsangang reclaimed tidal lands. *J. Agric. Chem. Environ.* 3:121-129.
- RDA (Rural Development Administration). 2000a. Standard agricultural manuals for corn cultivation. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- RDA (Rural Development Administration). 2000b. Method of soil and plant analysis. Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Analysis

- standards for the research investigation of Agricultural Science and Technology. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Seo, D.W. 2011. Desalinization and resalinization management plan on reclaimed land. *Rural Environ. Engr. J.* 112:73-87.
- Shao, X.H., T.T. Chang, F. Cai, Z.Y. Wang, and M.Y. Huang. 2012. Effects of subsurface drainage design on soil desalination in coastal resort of China. *J. Food Agric. Environ.* 10:935-938.
- Shin, J.S., J.G. Jeon, S.B. Lee, W.H. Kim, S.H. Yoon, J.K. Lee, J.G. Kim, M.W. Jung, S. Seo, and Y.C. Lim. 2008. Effect of drainage culvert spacing on forage crops production in poorly drained paddy field converted to upland crop production. *J. Korean Grassl. Forage Sci.* 28:301-306.
- Shin, M.S. 2011. Floating architecture project and inner development in reclamation area of saemangeum. *Korean J. Arc. Ins.* 55(9):32-36.
- Turan, M.A., A.H.A. Elkarim, N. Taban, and S. Taban. 2010. Effect of salt stress on growth and ion distribution and accumulation in shoot and root of maize plant. *Afr. J. Agric. Res.* 5:584-588.