Changes in Soil Salinity and Upland Crop Productivity in Reclaimed Land as Affected by Groundwater Table

Su Hwan Lee^{1*}, Yang Yeol Oh¹, Jin Hee Ryu¹, Hak Sung Lee¹, Bang Hoon Kang², Hee Kyeong Ock¹, and Kang Ho Jung²

¹Researcher, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

²Senior Researcher, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: suhlee@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 2, 2020

Revised: November 15, 2020

Accepted: November 16, 2020

ORCID

Su Hwan Lee

<http://orcid.org/0000-0002-5354-3020>

Yang Yeol Oh

<http://orcid.org/0000-0002-7471-0406>

Jin Hee Ryu

<http://orcid.org/0000-0002-0836-9510>

Hak Sung Lee

<http://orcid.org/0000-0001-6006-3984>

Bang Hoon Kang

<http://orcid.org/0000-0001-5655-772X>

Hee Kyeong Ock

<http://orcid.org/0000-0000-9519-7023>

Kang Ho Jung

<http://orcid.org/0000-0001-8854-7278>

Soil salinization driven by groundwater distribution in the reclaimed land is one of the major limiting factors for crop cultivation and soil management. In this study, the effects of two different water table depth (G1 site with intermediate and deep vs. G2 site with shallow depth) of groundwater (on soil salinity, water and crop productivity) were investigated. The rainfall event greatly impacted the groundwater recharging rate and salt leaching. The falling groundwater table depth from 30 to 80 cm together with higher evaporation at G2 site caused soil salinization in the rhizosphere, whereas increases in soil salinity at G1 site was negligible. Overall, soil water content at G2 site was higher than that at G1 site. The positive correlation of soil salinity with soil water content ($r^2 = 0.69$) and negative with groundwater table ($r^2 = 0.89$) indicated hydraulic connection between groundwater table and soil surface. The deeply falling groundwater table with negative water balance (Evaporation > Rainfall) induced drought-combined salt stress to crop. Soybean was much more susceptible to soil salinity stress and excess-moisture injury than maize, suggesting that the crop selection and practices to reduce crop vulnerability to abiotic stresses (salt and water) should be considered for sustainable and stable agriculture in reclaimed land. Our results highlight that groundwater table depth would play a crucial role in founding cropland suitability and the optimum groundwater table to avoid salinization and excessive wetting might be 1.5 - 2.0 m.

Keywords: Reclaimed land, Groundwater table, Soil salinization, Crop productivity

Distribution of Soil EC in the soil profiles of two fields with different groundwater table variations after maize and soybean harvest in 2015 and 2016 at Saemangeum (G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table).

Introduction

우리나라의 135,000 ha의 간척지 (reclaimed land)는 서남해안과 중서부 해안지역 (costal)과 강 하구 유역 (Watershed)의 저지대 (Low-lying topography)에 주로 위치하고 있다 (MAFRA, 2019a). 1960년대부터 조성된 대다수의 간척지는 대규모 경지와 풍부한 용수자원 공급은 기계화 쌀 농업생산이 가능한 식량안정생산 전진기지로 활용되어 왔다. 정부는 간척지 기본구상과 간척지 이용 종합계획 발표 등으로 간척지에서 벼 농업 외에 밭농업, 원예, 축산 등 다양한 농업생태계 조성을 위한 정책과 연구를 추진하고 있다 (MAFRA, 2019b).

Jung and You (2007)은 우리나라 서남해안 간척지 토양 모재는 하해혼성충적토 (fluvio-marine deposit)와 해성 충적토 (marine deposit)이며, 5개 토양목 (soil order)과 45개의 토양통 (series)으로 분류되고, 지하수위는 20 - 80 cm 내외로 높게 분포하고 있고 국내 간척지 토양의 문제점은 토양염류, 높은 지하수위, 양질 농업용수 부족, 배수불량, 낮은 토양비옥도 등으로 일차적으로 토양염류집적과 토양 과습에 영향을 주는 높은 지하수위 대한 개선이 되어야 벼 외 타작물 도입이 가능하다고 보고하였다. 최근 기후변화 등으로 인해 지속가능한 식량생산을 위해서는 농지의 질적 저하 현상(토양침식, 탄소손실, 토양다짐, 알칼리화, 염류화)을 선제적으로 방지하기 위해 집약적인 관리가 필요하고, 강우, 지하수위 변동 등 수리학적 측면에서 영향을 받는 토양염류화 현상에 대한 이해와 대응방안 수립 중요성이 제기되고 있다 (McBratney et al., 2014).

토양염류화의 원인은 기후인자 (증발량 > 강수량), 지하수 특성 (수위, 화학성), 관개용수 오염 등이며 이중 지하수위 상승이 전세계에서 주로 발견되는 염류화 기작으로 꼽힌다 (Uri, 2018). 지하수위 (groudwater table)은 지하환경의 복합적인 변화를 알리는 기초자료이며, 지하수의 물리적 상태를 나타내는 값으로 지표하 대수층 (aquifer)으로 물의 유입 (percolation), 함양 (recharge)과 배출 (discharge)의 특성에 따라 변동한다. 지하수위는 기후, 토양특성 및 수리환경에 따라 효율의 가변성이 커 지하수위 변동은 기상 (강우, 온도, 습도, 풍속), 관개 (irrigation), 토지이용 특성 (논밭), 지형 (언덕 및 저지대), 지하지질 등의 기후 및 수리지질학 영향을 직간접적으로 받으며, 때로는 토양형성, 토양수분과 염류이동에 직간접적인 영향을 준다 (UNEP, 1996). Noretto et al. (2009)는 지하수위는 농업생산활동에서 상호호혜적인 (Reciprocal)기능이 있어, 용수자원이 부족한 건조기에 높은 지하수위는 모세관 현상 (capillary action)을 통해 작물 근권에 지속적인 수분 공급을 할 수 있지만, 강우기에는 침수 (Waterlogging)와 염해 (Salinization)의 위험인자로 작용할 수 있다고 하였다. 한편, Ayar et al. (2006)은 지하수위의 높이와 지하수의 수질에 따라 작물 생산에 부정적인 영향을 미칠 수 있어, 높은 지하수위 분포를 가진 농경지에서는 내염성작물, 임계지하수위, 관개방법에 대한 종합적 검토의 필요성을 제기하였다. 지하수위가 작물생산 환경에 미치는 영향을 구명하기 위한 다수의 연구가 수행되었다. 대부분의 연구는 정밀하게 지하수위를 조절할 수 있는 라이시미터 또는 토양컬럼 조건에서 수행되었고, 설정된 지하수위 깊이와 지하수 염농도에 의한 토양층위별 재염화 양상, 지하수 염농도에 따른 작물의 수분이용특성과 생산성 구명 연구를 수행하였다.

토양염류화는 지하수의 염농도 보다 지하수위 위치가 지표면 염류집적에 직접인 영향을 끼친다고 하였다 (Rose et al., 2005; Liu et al., 2013; Xia et al., 2016). 라이시미터 실험을 통해서 작물별 적정 지하수위 높이는 밀 (Wheat)은 1.0 - 1.5 m이고, 옥수수 (Maize)는 1.5 - 2.0 m, 수수 (Sorghum)는 2.0 m이상, 해바라기 (Sunflower)는 1.5 m이하, 사탕수수 (Sugarcane)는 2.0 m이하로 작물별로 적정 지하수위는 유사하지만, 지하수위 상승에 따른 작물의 과습 민감성은 다양하다고 보고되고 있다 (Kahlown et al., 2005; Asad et al., 2013). 위에서 언급한 바와 같이 지하수위는 기상영향에 의한 가변성이 큰 인자이지만, 노지환경 특성을 반영한 연구결과는 많지 않다. Northey et al. (2006)는 라

이시미터에서는 목표 지하수위를 장기간 유지할 수 있는 장점이 있지만, 노지 환경에서는 지하수위 상승과 감소는 단기간에 발생할 정도로 역동성이 커, 라이시미터 연구 결과의 현장적용의 한계를 지적하였다. 최근 노지 환경 조건에서는 지형, 토지이용 또는 수리인자 (강우 및 관개)에 따른 지하수위 변동이 필지 및 지구 단위에서 토양염류화에 미치는 영향을 평가하고, 재염화 경감을 한 임계 지하수위 설정을 위한 일부 연구가 수행되었다 (Sugimori et al., 2008; Wang et al., 2008; Yang et al., 2011; Wang et al., 2011). Nosetto et al. (2009)는 최근 기후변화로 인한 장기간의 강수량 변동으로 아르헨티나 팜파스 평원의 지하수위가 상승추세이며, 이로 인한 작물재배 적지선정을 위해 지대별 (분지, 경사지) 지하수위 변동특성이 작물(밀, 콩, 옥수수)생산성과 토양EC에 미치는 영향을 조사 분석하여, 밀은 0.70 - 1.65 m, 콩은 1.20 - 2.20 m, 옥수수는 1.40 - 2.45 m에서 염해, 습해, 한해를 경감할 수 있다고 하였다. Ashraf et al. (2006)는 반건조 기후지대에서 계절별 토지이용방법 (경작, 휴경)에 따른 지하수위와 토양염류변동 특성을 보고하였고, Ibrakhimov et al. (2007)은 Aral해 인근 농경지에서 유역 (basin)에 근접한 저지대는 배수효율이 낮아, 강우발생시 지하수위가 높게 형성되고, 고온건조기 증발산 심화시 토양염농도 상승이 높아 토양재염화 (resalinization)의 위험성이 커지고 있음을 보고하였다. Bae et al. (2016)는 영산강간척지 밭작물 연구에서 식양질 토성의 높은 함수량과 형성 (60 cm)이 상시 과습 및 재염화를 유발하여 밭작물 (콩, 수수)생산성을 저하시켜, 이를 극복하기 위해서는 관개배수 기반조성이 필요함을 시사하였다. Sohn et al. (2010)은 새만금 노출부지 활용한 과수묘목의 적응성 연구에서 여름철 지하수위 상승에 따른 묘목의 습해 피해양상을 보고하였다.

이와 같이, 국내 선행연구에서는 간척지에서 지하수위 상승에 따른 작물의 과습피해해석을 언급하였고, 배수 개선의 필요성을 보고하였다. 그러나 노지 환경조건에서 기상환경 영향에 따른 계절별 지하수위 분포양상이 토양 염류, 수분 변동성 그리고 밭작물 생산성에 미치는 영향을 종합적으로 고찰한 현장연구 결과는 부족한 실정이다. 본 연구는 간척지에서 지하수위 변동에 따른 토양염류와 수분변동 특성을 바탕으로, 간척지 밭작물의 재해취약성을 구명하고, 실효적인 안정영농 기반 설계에 활용하기 위해 수행하였다.

Materials and Methods

시험장소 본 시험은 전북 부안군 계화면 인근 새만금간척지 공유수면에 위치한 농촌진흥청 간척지 시험포장 (35°46'N, 126°37'E)에서 2015 - 2016년 (2년)에 걸쳐서 수행되었다. 시험포장은 2010년 새만금방조제 물막이 공사 이전부터 노출된 공유수면 부지이며, 시험지 내부에 지하수위 변동이 상이한 두 개소의 시험포장을 선정하여 수행하였다 (Fig. 1). 시험장소의 10년 평균기온은 12.7°C (최저: 1월 - 1.1°C, 최고: 8월 26.0°C), 연평균 강우량은 1020.3 mm이고 6 - 8월에 연강우량의 50% 이상이 집중되었다. 시험장소의 토양특성은 분류법에 따르면 문포통 (a coarse loamy, mixed nonacid, mesic family of Typic Fluvaquents)이었고, 공유수면 매립 후 노출지로서 육지부와 해안방향으로 상이한 지하수위 분포를 갖고 있어, 시험지 내부에서 지하수위 변동이 상이한 두 개소의 시험포장을 선정하여 수행하였다. 지하수위가 낮은 포장은 2009년 유흥지로 관리되어온 곳이었으며, 지하수위가 높은 포장은 밭작물 재배 전까지 논으로 3년 (2011 - 2014년)까지 사용된 포장이었다.

조사분석 지하수위 분포가 다른 2개 포장의 지하수위 실시간 변동을 측정하기 위하여 포장 내부 관정 (직경 5 cm, 말단하부에서 100 cm까지 토사유입 방지망 부착)을 2.0 m 깊이까지 파고 수위측정기 (Diver, Eijenkomp)를 설치하고 1시간 단위로 수위변화를 조사하였다. 지하수위 측정기를 설치방법은 Northey이 제시한 Testwell 방법에 준하여

설치하였다 (Northey et al., 2006). 시험기간 기상자료는 시험지로부터 3 km 떨어진 곳에 위치한 농촌진흥청 계화시험지 AWS (Automated weather station)의 강우, 기온 정보를 활용하였다 (rda.weather.go.kr). 분석용 토양은 핸드오거로 표토 20 cm를 채취하였고, 풍건 후 2.0 mm 체질을 한 토양을 분석방법별로 정량하여 분석하였다. 토양이화학성은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법에 준하여 pH, EC, TN, SOM, 치환성양이온을 분석하였고 (RDA, 2012), 재배기간에는 생육시기별로 토양을 채취하여 토양수분과 토양EC를 분석하였다. 토양pH, EC는 시료:중류수를 1:5로 침출한 후 여과하여 pH-EC meter (Orion520, Thermo)로 분석하였다. 치환성양이온은 1-N NH_4OAC 침출후 ICP (Induced Coupled Plasma, VISTA-MPX Varian), 토양질소와 토양유기물은 Dumas 법에 의한 C/N분석기 (Vario Max CNS, Elementar)를 활용하여 분석 후 T-N과 T-C값을 구했고, T-C값에 1.724를 곱하여 토양유기물 (SOM)로 환산하였다. 토양EC와 수분함량 조사는 시험작물의 생육기에는 표토 (0 - 20 cm), 수확기에는 지면에서 지하100 cm 까지 7층위 (0 - 10, 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40, 40 - 60, 60 - 80, 80 - 100 cm)를 샘플링하였고, 수분손실이 발생하지 않도록 현장채취 후 비닐지퍼백에 담은 후 밀봉하여 보관 후, 수분증발 용기에 습토를 담아 105°C에서 건조시킨 후 건무게를 측정하고 수분함량 차이를 계산하여 중량수분함량을 구하였다.

시험 전 토양 시험 전 토양의 이화학성은 Table 1과 같다. 지하수위가 낮게 분포하는 G1 포장의 토양 pH는 8.6, EC는 0.21 dS m^{-1} , 토양유기물함량은 2.09 g kg^{-1} , T-N은 0.40 g kg^{-1} , 치환성 K, Ca, Mg, Na는 각각 1.09, 0.7, 2.1, 2.3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이었고, 지하수위 높은 G2포장의 토양 pH는 7.1, EC는 0.40 dS m^{-1} 토양유기물함량은 1.79 g kg^{-1} , T-N 0.70 g kg^{-1} , 치환성 K, Ca, Mg, Na는 각각 0.44, 1.9, 2.7, 0.5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이었다. 내부개발 중인 새만금간척지 계획지

Fig. 1. Location of experimental site in Saemangeum reclaimed land near Gyeonmyon Buan county. G1 and G2 indicates the fields with different groundwater table depth in experimental station (G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table).

Table 1. Soil properties of study site before experiment in Saemangeum reclaimed land.

Site [†]	pH	EC [‡]	SOM	T-N	Ex.cations				Soil Texture
					K	Ca	Mg	Na	
	1:5	dS m^{-1}	g kg^{-1}	g kg^{-1}	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$				
G1	8.6	0.21	2.09	0.40	1.09	0.7	2.1	2.3	Sandy Loam
G2	7.1	0.40	1.79	0.70	0.44	1.9	2.7	0.5	

[†]G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table

[‡]EC (Electrical conductivity), SOM (Soil Organic Matter) T-N (Total Nitrogen), Ex.cations (Exchangeable cations)

구 표토 (0 - 20cm)의 pH는 7.3 - 9.2, EC는 0.2 - 45.6 dS m⁻¹, OM는 0.9 - 4.2 g kg⁻¹, Ex Ca는 0.42 - 2.66, Ex Na는 1.1 - 33.8 cmol_c kg⁻¹ 로 지구 내에서 토양이화학성 수치가 극한 값을 보이는 곳이 많다고 보고된 바 있다 (Kim et al., 2016). 본 시험에서 G1은 시험작물 재배 직전까지 다년간 벼 재배를 하여 토양pH는 선행연구 조사 수치보다 낮았고, G2는 시험 전 농지조성 직전까지 갈대가 자생하던 유희지 상태여서, 토양 pH는 선행조사 수치와 유사하였다.

작물재배 실험 시험작물은 콩과 옥수수, 시험품종은 콩은 대풍, 옥수수는 찰옥 4호를 선정하였다. 시험구 포장 규격은 25 × 20 m이었다. 옥수수는 5월 중순에 40 kg ha⁻¹, 콩은 6월 초순에 30 kg ha⁻¹, 1휴 2열 파종하였다. 시험포장 작목별 재배기간 (옥수수: 5월초-8월초, 콩: 5월 하순-10월 중순) 동안 기상변화에 직접적으로 노출되도록, 비닐멀칭을 하지 않고 재배관리 하였다. 재식밀도는 옥수수 60 × 25 cm, 콩 60 × 20 cm, 시비량 (질소-인산-가리-퇴비)은 콩 60-80-60-1,500 kg ha⁻¹, 옥수수는 200-150-150-1,500 kg ha⁻¹ 이었다. 콩은 파종 전 전량 기비 사용하였고, 옥수수는 질소는 파종 전 기비 50%, 7엽기에 50% 분시, 인산과 가리는 전량 기비하였다. 시험작물의 수확기 생육조사는 옥수수과 콩은 3반복 당 20주씩 수확하여 농촌진흥청 조사분석기준에 준하여 실시하였다 (RDA, 2000).

통계분석 작물생육 및 수량 데이터의 통계처리는 SAS 9.2를 이용한 ANOVA (analysis of Variance)으로 수행하였고, 95% 수준에서 Duncan's New Multiple Range Test로 유의성 정도를 분석하였다.

Results and Discussion

기상현황 Fig. 2는 2015 - 2016년 시험작물 옥수수와 콩 재배 기간 동안의 새만금간척지 인근 부안군 계화면의 강우 및 기온 분포를 나타낸 것이다. 지하수위 모니터링과 시험작물 재배기간 (5 - 10월) 2015년과 2016년의 평균 기온은 각각 21.4°C, 22.5°C, 누적강우량은 335 mm, 555 mm이었다. 시험작물 재배기간 5 - 10월의 10년 평균 기온은 21.5°C, 강수량은 744.7 mm로, 기온은 2015년은 평년과 유사하였고, 2016년은 1.0°C 가량 높았으며, 강수량은 평년 대비 2015년은 46%, 2016년은 76% 수준으로 상대적으로 건조하였다. 강우횟수는 2015년은 35회, 2016년은 43회 이었고, 일 5 mm이상 강우일수는 2015년은 19회, 2016년은 23회 이었다. 옥수수 재배 기간 강수량은 2015년은 231 mm, 2016년은 297.5 mm, 콩 재배 기간 강수량은 2015년은 316.5 mm, 2016년 486 mm이었다.

Fig. 2. Weather data during 2015 - 2016 growing season in Saemangeum reclaimed land (a) 2015, (b) 2016.

지하수위 변동 Fig. 3은 자동지하수위 측정기에 기록된 2015년과 2016년 작물재배 기간 동안 지하수위 분포 특성이 상이한 2개 포장 (G1, G2) 지하수위 변동을 나타낸 것이다. G1과 G2 포장의 지하수위 변동은 강우변동 (강우량과 연속강우일수) 등에 의하여 상이한 분포 양상을 나타냈다. 2015년 G1의 지하수위는 109 - 180 cm, G2는 30 - 186 cm, 2016년에 G1은 69 - 207 cm, G2는 24 - 193 cm 변동폭을 나타내었다. 지하수위가 높은 G2는 소량의 강우에서도 연속강우 발생 시 지하수위 상승폭이 매우 컸고, 2015년에 비해 강우량과 빈도가 많았던 2016년에는 지표면 아래 24 cm까지 지하수위가 상승하였고, 동일기간 강우발생에도 상대적으로 지하수위가 낮은 G1 보다 100 - 140 cm 이상 지하수위 차이가 큰 상황도 측정되었다. 지하수위 변동은 기후 (Climate), 지질 (Geology), 지형 (Topography) 과 같은 자연적 특성과 배수와 관수 등 인위적 활동에 의하여 영향을 받는다 (Sophocleous, 2002). 특히 농경지에서 지하수위는 자연강우 (Precipitation), 관개 (Irrigation), 수로 (Canal) 조성 등에 의해서 지표수의 침투 (Infiltration), 지하수의 함양 (recharge), 배출 (discharge) 및 침출 (Seepage)이 상호작용하여 지속적으로 변화한다.

근접거리에 위치한 2개의 포장에서 지하수위 분포 차이 발생은 간척매립 과정에서 지면을 평탄화하여 표고를 균일화할지라도 매립 전 원지반의 수리환경 변동이 매립 후에도 지대의 위치 따라 지속적으로 영향을 주고 있음을 의미하며, 특히 지표수의 흐름이 지하수로 유입되거나 지하수의 흐름이 지표에 영향을 미치는 상호작용 hyporehic 발생에 의한 것으로 사료되었다. 지하수위 형성은 일차적으로 지하수의 함양량 정도 (Degree of recharge rate)에 영향을 받는다. Kim et al. (2013)은 지하수 함양은 매질의 수리지질학적 영향을 받기 때문에 시공간적 가변성을 가지고, 인근 지역이라도 침투된 수분 토양층을 통해 이동하는 과정에 따라 함양과 배출의 형태가 달라질 수 있기 때문에 국지적으로 다양한 값을 가질 수 있다고 하였다. Ridder and Henk (2006)는 Delta plain에서 육지와 가까운 상부삼각주 (Upper delta)는 상대적으로 지하수위가 낮고, 해수역에 근접한 하부삼각주 (Lower Delta)는 지하수위가 높다고 하였고, 삼각주 지형상 지하수위 변동 영향이 나타나는 3개 zone [함양 (recharge), 변환 (transition), 배출 (discharge)]이 상부에서 하부삼각주 지형에 걸쳐 존재한다고 하였다. 강우 지표침투수가 지하층 (subsurface layer) 매질을 통해서 내륙에서 수역으로 이동하는데, 본 연구기간에도 내륙쪽 G1에서 해안쪽 G2 포장으로 지표침투수와 지하수의 이동이 발생하여 내륙쪽 G1의 지하수위가 G2보다 낮았던 것으로 판단된다.

Fig. 3. Variation of groundwater table depth in two experimental fields (G1, G2) for 2015-2016 growing seasons in Saemangeum reclaimed land. (G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table).

지하수위 변동에 따른 토양수분 변화 Fig. 4는 2015 - 2016년 옥수수과 콩 포장의 토양수분함량 변동을 나타낸 것이다. 옥수수 재배기간 2015년 G1과 G2 (a)에서 토양수분함량은 각각 15.0 - 27.2%과 17.4 - 31.5%이었고, 2016년에 G1과 G2 (b)은 10.0 - 31.1%, 25.0 - 32.8%이었다. 콩 재배기간 2015년 G1과 G2 (c)에서 토양수분함량은 각각 7.8 - 24.3% 과 15.9 - 25.7%이었고, 2016년 G1과 G2 (d)에서 각각 3.9 - 33.8% 11.8 - 35.3%이었다. 토양수분은 전반적으로 지하수위 변동 및 위치에 의해 영향을 받았고, 재배시기별 작물생육과 강우발생에 의해 증감하였다. 전반적으로 토양수분함량은 G2가 G1보다 높았고, 작물별 수분요구량이 많은 생육 중후기에 수분함량 차이가 뚜렷하게 발생하였다.

시험지 토성인 사양질의 토양수분특성 10, 33, 100 kPa의 토양수분함량 (v/v)은 각각 37.3%, 15.2%, 8.2%이고, 상대적으로 보수력이 낮아, 증발산에 의한 토양수분 감소가 컸고, 지하수위가 낮은 G1은 수분소모가 많았던 시기에 지하수위에 의한 수분공급은 미미하였고, 지하수위가 높은 G2는 증발산을 보충하기 위한 지속적인 모세관 상승 작용이 수분함량 증가에 영향을 준 것으로 판단되었다. 지하수위는 Vadose zone과 증산을 통해서 작물근권에 수분을 공급할 수 있기 때문에 지하수위와 토양수분은 매우 밀접한 수리적 연계성 (Hydraulic connection)을 갖고 있다 (An et al., 2015). 지하수위 깊이는 근권의 토양수분 함량과 부의 상관관계를 보이고, 지하수위가 높을 때, 지표와 근접한 지하수위면의 모세관수는 지표면 이동이 매우 용이하여, 대기습도가 낮은 건조기에 모세관수의 대기로 직접 이동이 활발하게 되어, 지표면의 토양수분은 높게 유지 된다고 하였다 (Kahlow et al., 2002; Xia et al., 2016).

Fig. 4. Variation of Soil water content in two fields with different groundwater table depth for 2015-2016 growing season in Saemangeum. (a) Maize-2015 (b)Maize-2016 (c) Soybean-2015 (d) Soybean-2016 (G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table).

지하수위 변동에 따른 토양EC변화 Fig. 5는 2015년과 2016년의 시험작물 옥수수와 콩 재배기간 동안의 작물근권의 EC 변동을 나타낸 것이다. 2015년 옥수수 재배기간 G1과 G2 (a)에서 토양 EC는 각각 $0.7 - 1.7 \text{ dS m}^{-1}$ 과 $0.7 - 2.6 \text{ dS m}^{-1}$ 이었고, 2016년에 G1과 G2 (b)은 $0.6 - 1.5 \text{ dS m}^{-1}$, G2는 $1.9 - 2.4 \text{ dS m}^{-1}$ 이었다. 2015년 콩 재배기간 G1과 G2 (c)에서 토양EC는 각각 $0.4 - 1.0 \text{ dS m}^{-1}$, $0.6 - 3.5 \text{ dS m}^{-1}$ 이었고 2016년에 G1과 G2 (d)는 각각 $0.4 - 1.2 \text{ dS m}^{-1}$, $1.4 - 3.3 \text{ dS m}^{-1}$ 이었다.

2015년 옥수수가 재배된 5월 - 6월 중순까지 무강우가 지속되어 지하수위가 각각 164 cm, 144 cm인 6월 9일 G1은 1.7 dS m^{-1} G2는 2.4 dS m^{-1} 까지 시험 전 토양EC보다 상승하였고, 6월 13일 - 25일까지 강우로 지하수위가 128 cm, 45 cm 상승한 후, 6월 29일 지하수위가 133 cm, 72 cm인 G1과 G2의 EC는 각각 0.7 dS m^{-1} , 0.9 dS m^{-1} 까지 감소하였다. 7월 6일 - 12일 연속강우로 G1, G2 지하수위가 108 cm, 31 cm까지 상승한 이후, 지하수위 190 cm, 106 cm까지 낮아진 8월 11일 수확기에는 G1과 G2 각각 1.2 dS m^{-1} 와 2.6 dS m^{-1} 까지 상승하였다.

2016년에는 2015년과 달리 5월 생육초기 부터 지속적인 강우가 발생하여 지하수위가 상승하여 G1은 94 cm, G2는 37 cm까지 상승한 후 5월 27일 지하수위가 119 cm, 86 cm인 G1은 1.5 dS m^{-1} G2는 2.2 dS m^{-1} , 감소하였고, 6월 24일 강우로 지하수위가 153 cm, 53 cm 상승한 후 6월 27일 지하수위가 150, 88 cm인 G1은 1.5 dS m^{-1} , G2는 2.4 dS m^{-1} 로 G2는 소폭 상승하였다. 7월 1일 - 7일까지 집중적인 연속강우로 인해 지하수위는 G1은 150 cm에서 69 cm까지, G2는 138에서 24 cm까지 상승한 직후, 7월 11일 지하수위가 116 cm, 52 cm 로 낮아진 G1은 0.6 dS m^{-1} G2는 2.2

Fig. 5. Variations of Soil EC in two fields with different groundwater table depth for 2015-2016 growing season in Saemangeum reclaimed land (a) Maize-2015 (b) Maize-2016 (c) Soybean-2015 (d) Soybean-2016 (G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table).

dS m^{-1} 낮아졌다. 집중강우 후 무강우가 장기간 지속되어 지하수위가 낮아지는 현상이 기록되었고, 8월 11일 수확기 지하수위가 189 cm, 153 cm로 낮아졌을 때 G1은 0.8 dS m^{-1} G2는 1.9 dS m^{-1} 이었다.

2015년 콩 재배기간 6월 생육초기 강우로 인해 G1과 G2의 토양EC는 0.5와 0.6 dS m^{-1} 까지 낮아졌으나, 지하수위가 높았던 G2포장의 EC는 생육 중간에 소량의 강우로 인해 제염이 일시 되었으나, 8월 20일 전후 강우로 지하수위가 43 cm까지 상승하였고 9월 9일 이후 강우에 의한 지하수위 상승 직후 무강우 기간 동안 증가하였고, 9월 말 이후 무강우가 지속된 10월 중순 수확기에는 3.5 dS m^{-1} 까지 상승하였다. 지하수위가 낮게 유지된 G1은 1.0 dS m^{-1} 를 유지하였다. 2015년 보다 강우량이 많았던 2016년은 연속강우로 지하수위가 높게 유지된 기간이 길었던 시기 이후 무강우 기간에 토양EC가 지속적으로 상승하는 양상이었다. 5월 10 - 24일 연속강우로 지하수위가 37 cm까지 상승한 이후 1개월 가량 무강우가 지속된 후 지하수위가 154 cm, 78 cm인 6월 23일에 G1은 1.2 dS m^{-1} , G2는 3.3 dS m^{-1} 까지 상승하였고, 6월 24일 - 7월 7일까지 연속강우 직후 조사한 지하수위가 70 cm, 24 cm까지 상승한 후 7월 8일 지하수위가 100 cm, 50 cm인 G1은 0.5 dS m^{-1} , G2는 1.4 dS m^{-1} 로 낮아졌다. 7월 16일 이후 무강우가 지속되어 지하수위가 154 cm, 117 cm인 7월 27일 G1은 0.7 dS m^{-1} G2는 2.0 dS m^{-1} 이었으나 무강우 장기화로 지하수위가 191 cm, 171 cm까지 낮아졌던 8월 26일 G1 0.7 dS m^{-1} G2 3.0 dS m^{-1} 으로 증가하였다. 9월 16 - 18일 연속강우로 지하수위가 151 cm (G1), 34 cm (G2) 상승한 직후 지하수위가 159 cm (G1), 77 cm (G2)인 9월 22일 토양EC는 G1 0.5 dS m^{-1} G2 3.3 dS m^{-1} 이었다. 10월 5일 - 8일까지 연속강우로 지하수위가 94 cm, 26 cm까지 상승한 후 지하수위가 133 cm, 76 cm이었던 10월 13일 조사한 EC는 G1 0.4 dS m^{-1} , G2 1.9 dS m^{-1} 이었다. 이는 강우에 의한 지하수위 변동과 함께 근권의 염류의 용탈과 재염화현상이 복합적으로 진행되고 있음을 나타나고 있음을 의미한다. 특히 지하수위가 30 cm 이었던 시기는 모세관 상승보다 토양염류의 용탈이 진행되는 상황이었고, 지하수위가 70 cm 내외이었던 시점에서는 모세관 상승이 진행되고 있음을 추측할 수 있다. 2016년 10월 13일 G2의 토양EC는 지하수위 70 cm 임에도 불구하고 EC상승이 2015년도 보다 낮았던 것은 강우로 인한 용탈 제염이 있었고, 증발산량이 당해년도 8, 9월과 비교하였을 때 낮았기 때문으로 사료된다.

토양EC는 토양염류화를 측정하는 직접적인 지표이다. 토양염류화를 유도하는 농업환경자원인자는 토성 (Soil texture), 수질 (Water quality), 지하수위 위치 (Water table position), 관개 (Irrigation), 토지이용 (Land use)으로 알려져 있다 (Rose et al., 2005; Yu et al., 2014). 특히 강우, 증발산량, 지하수위 특성 (화학적과 위치)의 상호작용이 토양염류화에 미치는 영향은 매우 크다 (Velmurugan et al., 2016; Uri, 2018; Li et al., 2018).

본 연구에서 토양염류화는 작목별 증발산량 변동 (물수지-증발산과 강우의 차이), 지하수위 위치, 토양공극 (pore)의 염,수분함량 등이 영향을 끼친 것으로 판단된다. 강우에 의한 지하수위 상승 후 무강우 지속시 중력수는 하강하고 토층에 잔재하는 염분 지하수의 모세관수는 모세관 현상으로 지표면으로 상승한다. 특히 증발량이 많은 고온건조 시기에 작물의 활발한 증산은 근권 수분 손실을 촉진하고, 이와 동시에 근권의 토양수에 용해되어 있던 용질 (solute)은 지표면 부근에서 염 (Salt)으로 집적 (precipitation)된다. 동시에 지표면 부근의 토양공극에서 손실된 수분을 재공급하기 위해서 지하층으로부터 염분함유 지하수가 토양표면으로 이동하는 모세관 상승이 지속되어 수분증가와 염분이 집적되는 재염화 현상이 심화된다. 담수에 의해 토양표면이 항상 포화상태 (saturated)로 유지되는 논 조건과 달리 밭 조건에서는 하부의 포화된 지하수층위에서부터 지표면까지 불포화층이 존재한다. 지하수층 인접한 포화된 토양층과 불포화층 사이에는 가변적인 모세관수대 (capillary fringe)가 위치하고, 이 경계면층 위에 대기와 인접한 토양표면의 습윤과 건조 현상에 의해서 지속적으로 수분 상태 변화 (액상-기상)가 일어나는 불연속체 evaporation

front가 존재한다. 즉 근권의 토양염분 상승 재염화를 유발하는 염분 모관수의 모세관상승 (capillary rise)강도는 Capillary fringe와 Evaporation front의 위치에 의해서 결정된다. 본 연구기간 동안 무강우가 2주 - 1개월 지속되어 마이너스 물수지 (증발량 > 강수량)현상이 발생한 시점에 토양EC 증가가 반복됨을 확인하였다.

본 연구와 유사한 결과로 Ashraf et al. (2006)은 염해지에서 옥수수, 밀 경작 및 휴경 조건에서 지하수위와 EC의 변동 특성을 조사한 결과 지하수위가 30 - 60 cm까지 상승하였을 때, 휴경지와 경작지에서 토양 EC는 각각 11.4 dS m^{-1} , 10.0 dS m^{-1} 이었고, 지하수위가 100cm 이하로 하강하였을 때 각각 6.9 dS m^{-1} , 4.7 dS m^{-1} 로 낮아졌다고 보고하였다. Velmurugan et al. (2016)은 년차별 강우발생에 따른 토양EC 장기 모니터링 결과 강우량이 적었던 건조한 (Dry)해에 토양EC가 증가하였고, 강우량이 많았던 습한 (Wet)해에 토양EC가 낮게 유지되었다고 보고하였다. Northey et al. (2006)는 빗물과 유사한 수준의 관개용수 (0.09 dS m^{-1})를 전면관개하면 지하수위가 20 - 40 cm 상승하고 지표의 EC는 용탈되어 감소하지만 하부로 용탈된 염류집적으로 EC가 증가하였고, 일정 시간 후 지하수위가 낮아지면 토양층위별 EC는 관개 전 EC보다 증가한다고 하여, 지하수위에 유도된 토양재염화를 제어하기 소량의 짚은 관수를 실시하거나, 지하수위를 임계높이 (3.0 m)까지 낮춰야 한다고 제안하였다.

Fig. 6은 토양수분과 EC의 상관관계를 나타낸 것이다. 평균 토양수분과 평균 토양EC는 정의 상관관계 ($R^2 = 0.69$, $p < 0.05$)를 나타내었다. Fig. 7은 평균 지하수위 분포와 평균 토양EC 상관관계를 나타낸 것이다. 지하수위 높이와 토양EC는 부의 상관관계 ($R^2 = 0.89$, $p < 0.05$)를 나타내었다. 토양EC는 평균 지하수위가 175 cm까지 낮아졌을 때,

Fig. 6. Correlation between Soil EC and Soil water content of surface soil.

Fig. 7. Correlation between groundwater table depth and EC of surface soil.

평균 EC는 0.5 dS m^{-1} 수준이었고, 지하수위가 110 cm 수준에서는 2.6 dS m^{-1} 까지 높아졌다. Noretto et al. (2009)는 지하수위 분포특성별 EC 비교시 지하수위가 3.0 m 이하로 낮아졌을 경우 (Deeper)에 모세관상승에 의한 토양염류화 영향이 거의 없었고, 지하수위가 1.0 m 내외인 필지 (Shallow)의 평균 EC는 4.9 dS m^{-1} 로 1.5 - 2.0 m 지하수위 (Intermediate) 0.9 dS m^{-1} 보다 7배 가장 높다고 하였으며, Xu et al. (2013)은 지하수위-수분-염 분포 simulation을 통해서 지하수위 1.25 m와 1.55 m에서 모세관수의 근권 (0 - 40 cm)공급량은 각각 150 mm, 70 mm이었고, 염 (Salt)공급량도 각각 $3,200 \text{ g m}^{-2}$, $2,600 \text{ g m}^{-2}$ 이라고 하여 본 연구에서 얻은 지하수위-토양수분-EC의 상관관계와 일치하였다.

지하수위 분포에 따른 작물생육 및 수량 Table 2와 3은 옥수수과 콩의 생육 및 수량성을 나타낸 것이다. 작물생산성은 연차간 기상에 의한 지하수위와 염·수분 변동에 의하여 영향을 받았다. 상대적으로 옥수수보다 콩이 환경 변동에 민감하게 반응하였다.

옥수수 이삭수량은 2년 재배기간 동안 지하수위가 높은 G2에서 G1보다 양호하였다. 옥수수의 초장, 착수고, 엽수 등은 유사하였고, 이삭의 길이와 직경은 G2가 G1보다 유의적으로 컸다. 이삭수량은 2015년 G1은 $797 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, G2는 $911 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, 2016년 G1은 $762 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, G2는 $788 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 이었다. 콩의 100립중, 헥타립수, 종실수량은 2015년이

Table 2. Growth characteristics and yield of maize in the field with different groundwater variations during 2015 and 2016 growth season in Saemangeum reclaimed land.

Site/Year [†]	Plant height (cm)	Ear height (cm)	No. of Leaf	Stem diameter (mm)	Ear length (cm)	Ear diameter (cm)	Ear yield (kg 10a^{-1})
G1 2015	197.0b [‡]	70.0b	12.0a	30.4a	17.0a	4.4a	797.0a
G1 2016	231.0a	110.0a	13.6a	27.0b	16.5a	4.0a	762.0a
Mean	214.0A	90.0A	12.8A	28.7B	16.8B	4.2B	779.5B
G2 2015	207.0b	78.0b	12.0a	32.2a	16.9a	4.5a	911.0a
G2 2016	233.0a	88.0a	13.1a	27.0b	17.8a	4.4a	788.0b
Mean	220.0A	83.0A	12.6A	29.6A	17.4A	4.5A	849.5A

[†]G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table.

[‡]Values within column for each parameter followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

Table 3. Growth characteristics and yield of soybean in the field with different groundwater variation during 2015 and 2016 growth season in Saemangeum.

Site/Year [†]	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	100 seed weight (g)	No of Pod	No. of grain per pod	Grain yield (kg 10a^{-1})
G1 2015	38b [‡]	11.8b	18.5a	62a	2.3a	176a
G1 2016	30b	14.2a	15.1b	60a	2.0a	123b
Mean	34B	13.0A	16.8A	61B	2.2A	150A
G2 2015	43a	9.9b	18.6a	76a	2.2a	205a
G2 2016	40a	12.9a	14.4b	68b	1.6a	102b
Mean	42A	11.4B	16.5A	72A	1.9A	154A

[†]G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table.

[‡]Values within column for each parameter followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

가장 양호하였다. 2016년에는 급격하게 감소하였다. 종실 수량은 2015년 G1은 $176 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, G2는 $205 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 이었고, 2016년 G1은 $123 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, G2는 $102 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 이었다.

작물은 재배토양의 염농도가 한계 수준 이상이 되면, 염해를 받아, 수분흡수저해가 발생하고, 성장량 감소로 이어져 수확량이 감소하게 되므로, 간척지에서는 작물별 생육가능 염농도를 바탕으로 적합한 작물을 선택하고 재배하여야 한다 (Rngasamy, 2010). Kim et al. (2014)는 식용옥수수 4품종의 염적응성 평가를 위한 포트시험을 통해서 3개 품종의 옥수수의 종실무게 감소 시작 임계 토양염농도는 $1.73 - 2.18 \text{ dS m}^{-1}$ 이고, 본 시험에 사용된 찰옥4호는 3.2 dS m^{-1} 로 다른 3개 품종 대비 성장 및 수량감소율이 가장 낮아, 염해적응력이 높은 품종이라고 보고하였다. Bae et al. (2016) 등은 연산강간척지에서 콩 재배시 토양EC 1.7 dS m^{-1} 수준에서 과습과 염해의 영향으로 종실 수량이 $113 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 으로 매우 낮아, 콩 재배를 위해서는 관배수 기반이 조성되어야 한다고 하였다. 옥수수 재배기간 동안 G1과 G2에서 토양EC는 재배안전 염농도 이하 수준에서 변동하였다 (Fig. 5). 토양수분함량 (Fig. 4) 또한 포장용수량 범위에 있기에, 옥수수는 염해와 습해의 영향 없이 성장하였다. 한편 콩은 연차간 기상변이 (무강우, 폭우)에 따른 스트레스 영향이 잦았다. 특히 2016년에는 기상 및 지하수위 변동이 주요 생육시기인 영양생장기 (6월), 개화기 (7월), 결실기 (9 - 10월)에 영향을 준 것으로 판단된다. 강우량이 적었던 2015년 수량은 입모 후 가뭄이 지속되어 신장기에 영향을 받았으나, 생육중기 강우로 생육이 회복되었고, 결실기에는 과습, 한발 및 염해의 영향이 적어 종실비대에 유리하였기 때문에 생각된다. 재배기간 동안 EC는 1.7 dS m^{-1} 보다 다소 높았지만, 개화기 (8월) 이후 일일 20 - 30 mm의 드문 강우가 염분제거와 수분공급에 유효하였고 (Fig. 3), 개화기 이후 100 - 150 cm 미만으로 유지된 G2의 지하수위는 무강우기에 작물수분 공급에 일정부분 기여한 것으로 판단된다. 2016년에는 전년 대비 G1과 G2 수량이 각각 31, 51% 감소하였는데 G2는 파종 후 높은 EC로 인한 입모불량, 생육중후기에 장마-무강우-강우로 인한 과습과 염분의 지속상승 등이 생육에 영향을 끼쳤고, G1은 낮은 EC로 입모는 양호하였으나, 8월 개화기 이후 무강우 시기에 토양수분함량이 위조점 수준인 3% 수준까지 감소하여 한해가 발생하였고, 결실기에는 연속강우로 종실비대가 원활하지 못한 것으로 사료된다.

지하수의 화학성과 수위는 토양염류화에 직접적으로 영향을 주며, 높은 지하수위라고 할지라도 지하수의 염농도 수준에 따라 작물 생육에 활용될 수 있는 토양수분을 제공할 수 있다. Soppe and Ayars (2003)은 지하수 염농도가 1.0% ($\text{EC } 13 \text{ dS m}^{-1}$) 이상인 곳에서 지하수위는 1.5 m 이상 깊이로 낮춰야 재염화에 의한 작물 염해를 경감할 수 있다고 하였고, Kahlown et al. (2005)는 지하수위 깊이에 따른 지중관개 기여도를 산정한 결과, 지하수위 0.5 m 수준에서 40 - 60%, 1.0 - 1.5 m에서는 10 - 30%, 2.0 m 이하에서는 5% 미만이라고 보고하였고, Nosetto et al. (2009)는 연차간 기상변이에 따라 지하수위가 염류화와 작물수분 공급에 기여하는 효과는 차이가 있으나, 옥수수와 콩의 적정지하수위는 1.0 - 2.0 m이고, 2.0 m 이하 지하수위에서는 모세관상승의 근권영향이 미미하여 한발에 의하여 수량이 감소할 수 있다고 하였다.

Fig. 8은 2015년과 2016년 옥수수와 콩의 수확기 토양EC의 층위별 분포를 나타낸 것이다. 지하수위가 낮은 G1은 토양층위가 깊어질수록 EC가 높아졌으며, 지하수위가 높은 G2는 10 - 30 cm 층위까지는 토양EC가 높았고, 그 아래 층위에서는 낮아지는 역전현상이 관찰되었다. Fig. 9는 옥수수와 콩의 수확기 토양수분의 층위별 분포를 나타낸 것이다. 토양수분함량은 토양층위가 깊어질수록 높아져서, 40 cm 아래 층위에서는 포화상태에 근접하는 수분함량이 있었다. 옥수수 재배시 2015년과 2016년은 7월 출사기 이후 8월 수확 전까지 강우량이 매우 적었고, 작물의 수분흡수가 왕성하여 토양층위 30 cm의 근권부위까지 수분함량이 낮아졌다. 콩은 2015년에는 수확기에는 무강우 지속으로

건조하였고, 2016년 수확기에는 잦은 강우로 토양층위별 수분함량 분포가 상이하였다. 건조했던 2015년에 G1은 60 cm, G2는 30 cm까지 토양수분이 20% 미만으로 낮아졌고, 수확직전까지 다소 강우가 잦았던 2016년에는 G1과 G2 모두 층위별로 포장용수량 이상의 수분함량 분포를 나타내었다. 2015년에는 8월 동안 G1과 G2의 지하수위가 유사한 수준 (170 - 200 cm)까지 낮아졌지만, 평균적으로 지하수위가 높았던 G2에서 모세관 상승에 의한 근권으로 토양 수분 이동이 활발하게 진행된 것으로 판단된다. 20 - 30 cm 층위에서 토양EC가 높아졌는데 이는 옥수수과 콩의 뿌리가 주로 분포하는 위치로서 해당 깊이에서 활발하게 토양수분이 흡수되어 염류가 집적된 것으로 판단된다.

Fig. 8. Distribution of Soil EC in the soil profiles of two fields with different groundwater table variations after maize and soybean harvest in 2015 and 2016 at Saemangeum (G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table).

Fig. 9. Distribution of Soil water content in the soil profiles of two fields with different groundwater table after maize and soybean harvest in 2015 and 2016 at Saemangeum (G1: Site with intermediate and deep groundwater table, G2: Site with shallow groundwater table).

Conclusions

본 연구는 간척지에서 지하수위 변동 및 분포에 따른 토양 염수분 변동특성과 작물생산성에 미치는 영향을 구명하고자 하였다. 저지대에 위치한 간척지에서 지하수위 상승 (함양, Recharge)과 하강 (Discharge)은 강우발생 (강우량과 연속강우)에 따른 영향이 컸으며, 지하수위가 높은 포장 (G2)은 소량의 강우에도 함양이 매우 빨랐으며, 하강은 느렸다. 토양수분 및 EC 변화는 생육기간 동안 기상, 지하수위변동, 작물별 수분흡수 양상에 따라 차이를 나타내었다. 지하수위가 높은 포장 (G2)의 토양 EC와 수분함량은 지하수위가 낮은 포장 (G1)보다 토양EC는 전반적으로 높았으며, 작물생육기에 음의 물수지 (증발 > 강수)시기에 G1보다 G2의 토양 염류화는 가속화 되었다. 특히 재염화 (Soil resalinization)현상은 강우발생 후 지하수위가 30 - 70 cm까지 상승한 후 하강하였던 G2에서 주로 관찰되었으며, 지하수위가 100 - 190 cm 유지되는 G1에서 EC 증가는 경미하였다. 작기별 평균 지하수위 높이와 평균 토양EC는 부의 상관관계 ($R^2 = 0.89$), 평균 토양수분과 평균 토양EC는 정의 상관관계 ($R^2 = 0.69$)를 나타내어 지하수위의 근권부 토양 재염화 및 수분공급의 수리학적 연계성이 구명되었다. 작물별 토양 염·수분 민감성은 옥수수보다 콩이 예민하였다. 강우와 무강우 시기의 교차반복으로 지하수위 변동의 역동성은 토양 염수분 변동에 직접적으로 반영되었다. 본 연구기간 동안 단기적 급변성이 큰 지하수위 변동이 토양염수분과 작물생산성에 미치는 영향평가를 통해서 간척지에서 밭작물 재배기 재염화, 습해 및 한해 발생 등의 주기성을 예측할 수 있었고, 영농안정성 증진을 위해서 지하수위 분포는 1.5 - 2.0 m를 유지할 수 있는 배수 기반 조성과 함께, 적시에 한해와 염해를 경감할 수 있는 관계시설 등 복합적 생산기반을 도입한다면, 보다 안정적인 작물생산 활동이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ013884012020)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- An, L.S., B.H. Zhou, Q.S. Zhao, and L. Zhu. 2015. Spatial Variability of Soil chloride content and its driving factors in the Huanghe River Delta. *Scientia Georg. Sinica*. 35(3):358-364.
- Asad, S.Q., A. Waqas, and A.F. Ahmad. 2013. Optimum Groundwater table depth and Irrigation Schedules for Controlling Soil Salinity in Central Iraq. *Irrig. and Drain*. 62:414-424.
- Ashraf, M., Rahmatullah, T. Maqsood, and M.A. Tahir. 2006. Contribution of Shallow water table to salinity/sodicity Development under Fallow and Cropped conditions. *Pak. J. Agri. Sci*. 43:7-12.
- Ayar, J.E., E.W. Christen, R.W. Soppe, and W.S. Meyer. 2006. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: a review. *Irrigation Sci*. 24:147-160.
- Bae, H.S., S.H. Lee, J.B. Hwang, H.-K. Park, G.H. Lee, G.B. Lee, K.S. Lee, D.S. Lee, B.D. Hong, J.H. Lee, and D.Y. Chung. 2016. Drainage Effect on Desalinization and Crop Growth on a Poorly Drained Soil in the Reclaimed Tidal Flat Land. *J. Korean Soc. Int. Agric*. 28(4):512-519.
- Ibrakhimov, M., A. Khazoma, I. Forkutsa, G. Paluasheva, J.P.A. Lamers, B. Tischbein, P.L.G. Vlek, and C. Martius. 2007. Groundwater table and salinity: Spatial and Temporal Distribution and Influence on Soil Salinization in

- Khorezm region(Uzbekistan, Aral Sea Basin). *Irrig. Drainage Syst.* 21:219-236.
- Jung, Y.S. and C.H. Yoo. 2007. Soil problems and Agricultural water management of the Reclaimed Land In Korea. *Korea J. Soil Sci. Fert.* 40(4):330-348.
- Kahlown, M.A. and A. Muhammad. 2002. Individual and Combined Effect of Waterlogging and Salinity on Crop Yield in the Indus Basin. *Irrig. and Drain.* 51:329-338.
- Kahlown, M.A., Z.-U.-H. M.Ashraf. 2005. Effect of Shallow groundwater table on Crop Water Requirement and Crop Yield. *Agricultural Water Management.* 76:24-35.
- Kim, N.W., Y.J. Kim, and I.M. Chung. 2013. Development of Analyzing Model of Groundwater Table Fluctuation (Ⅱ): Characteristics of Recharge. *Journal of the Korean Society of Civil Engineerings*, 33(6):2285-2291.
- Kim, S., W.Y. Choi, J.H. Jeong, and K.B. Lee. 2014. Physiological Response of Four Corn Cultivars to Soil Salinity. *Korean J. Crop Sci.* 59(3):293-298.
- Kim, Y.J., J.H. Ryu, S.H. Lee, Y.Y. Oh, S. Kim, J. Jung, H.C. Hong, Y.D. Kim, and S.L. Kim. 2016. Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Soil Salinity in Saemangeum Gye-hwa Newly Reclaimed Land. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 28(1):113-117.
- Li, S., W. Luo, Z. Jia, S.C. Tang, and C. Chen. 2018. The Effect of natural rainfall on salt leaching under watertable management. *Land Degradation Development.* 29:1953-1961.
- Liu, G.M., J.S. Yang, L.D. He, Z.Z. Lv, H.B. Shao, and S.P. Yu. 2013. Salt dynamics in soil profiles during long-term evaporation under different groundwater condition *Plant Biosystems*, 147:1211-1218.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affair). 2019a. Yearbook of Agricultural Statistics in Korea.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affair). 2019b. Master plan of State-run reclaimed land of Korea.
- McBratney, A., D.J. Field, and A. Koch. 2014. The Dimension of Soil Security. *Geoderma.* 213:203-213.
- Northey, J.E., E.W. Christen, J.E. Ayars, and J. Jankowski. 2006. Occurrence and Measurement of salinity stratification in shallow groundwater in the Murrumbidgee Irrigation Area, south-eastern Australia. *Agricultural Water Management.* 81:23-40.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobbagy, R.B. Jackson, and G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow groundwater in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Research.* 113:138-148.
- RDA (Rural Development Administration). 2000. Standard agricultural manuals for Corn and Soybean cultivation. 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.
- Ridder, N.A. and R. Henk. 2006. Drainage Principle and Applications: Chapter 2. Groundwater investigation page 33-75. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands.
- Rngasamy Pichu. 2010. Soil Processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology.* 37:613-620.
- Rose, D.A., F. Konukcu, and J.W. Gowing. 2005. Effect of Watertable Depth on Evaporation and Salt Accumulation from Saline Groudwater. *Australian Journal of Soil Research*, 43:565-573.
- Sohn, Y.M., G.Y. Jeon, J.D. Song, J.H. Lee, D.H. Kim, and M.E. Park. 2010. Effect of Soil Salinity and Soil-wetting by Summer-Rising of Water Table on the Growth of Fruit Trees Transplanted at the Saemangeum Reclaimed Tidal Land in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(1):8-15.
- Sophocleous, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal.* 10:52-67.
- Soppe, R.W.O. and J.E. Ayars. 2003. Characterizing groundwater use by safflower using lysimeter. *Agri. water management.* 60:59-71.

- Sugimori, Y., S. Funakawa, K.M. Pachikin, and N. Ishida. 2008. Soil Salinity Dynamics in Irrigated Fields and Its Effects on Paddy-based Rotation Systems in Southern Kazakhstan. *Land Degrad. Develop.* 19:305-320.
- UNEP. 1996. Groundwater: a threatened resources, UNEP Environ Libr. (15):3-29.
- Uri Nachshon. 2018. Cropland Soil Salinization and Associated Hydrology: Trends, Processes and Examples. *Water*. 10, 1030: doi:10.3390/w10081030.
- Velmurugan, A., T.P. Swarnam, S.K. Ambast, and N. Kumar. 2016. Managing Waterlogging and Soil Salinity with a Permanent Raised Bed and Furrow Sytem in Costal Lowlands of Humid Tropics. *Agricultural Water Management* 168:56-67.
- Wang, S., X.F. Song, Q. Wang, G.Q. Xiao, Z.M. Wang, X. Liu, and P. Wang. 2011. Shallow groundwater dynamics and origin of salinity at two sites in salinted and water-deficient region of North China Plain, China. *Environmental Earth Science*. DOI: 10.1007/S12655-011-1208-9.
- Wang, Y.G., D. Xian, Y. Li, and X. Li. 2008. Soil Salinity evolution and its relationship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins: case study from the Fubei region of Xinjiang Province, China. *Environ Monit Assess.* 140:291-302.
- Xia, J.B., X. Zhao, Y.P. Chen, Y. Fang, and Z. Zhao. 2016. Responses of Water and Salt Parameters to Groundwater Levels for Soil Columns Planted with *Tamarix Chinensis*. *Plos One* DOI:10/1371/Journal.pone.0145828.
- Xu, X., G.H. Huang, C. Sun, L.S. Pereira, T.B. Ramos, Q.Z. Hwang, and Y.Y. Hao. 2013. Assessing the Effects of Water Table Depth on Water Use, Soil Salinity and Wheat Yield: Searching for a Target Depth for Irrigated Areas in the Upper Yellow River basin. *Agricultural Water Management* 125:46-60.
- Yang, F., G.X. Zhang, X.R. Yin, Z.J. Liu, and Z.G. Huang. 2011. Study on Capillary rise from Shallow Groundwater and Critical Water Table Depth of a Saline-Sodic in Western Songnen Plain of China. *Environ Earth Sci.* 64:2119-2126.
- Yu, J., Y. Li, G. Han, D. Zhou, Y. Fu, B. Guan, G. Wang, K. Ning, H. Wu, and J. Wang. 2014. The Spatial distribution characteristics of Soil Salinity in Coastal Zone of the Yellow River Delta. *Environ Earth Sci.* 72:589-599.