Salt Removal from Soil by Winter and Spring Cultivation of Tall Fescue and Italian Ryegrass in Saemangeum Reclaimed Tidal Land

Seok-In Yun^{1*}, Jin-Hyeob Kwak², Bo Ram Choi³, and Gi-Yong Kim⁴

¹Associate Professor, Department of Bio-Environmental Chemistry and Institute of Life Science and Natural Resources, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

²Assistant Professor, Rural Construction Engineering Department, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

³Researcher, Grassland and Forages Division, National Institute of Animal Science, RDA, Cheonan 31000, Korea

⁴Senior Researcher, Grassland and Forages Division, National Institute of Animal Science, RDA, Cheonan 31000, Korea

*Corresponding author: siyun@wku.ac.kr

ABSTRACT

Received: October 17, 2021

Revised: November 1, 2021

Accepted: November 1, 2021

ORCID

Seok-In Yun

<https://orcid.org/0000-0002-0456-9216>

Jin-Hyeob Kwak

<https://orcid.org/0000-0001-7392-0287>

Creating grasslands and cultivating forage crops on reclaimed tidal land in winter and early spring can contribute to improving soil physicochemical properties, reducing fine dust, and increasing feed self-sufficiency. Ryegrasses that adapt well to reclaimed land include tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.), which are a cool-season perennial and a winter annual, respectively. To evaluate the salt uptake by winter crops and the soil desalinization, tall fescue and Italian ryegrass were grown twice for 3 years on Saemangeum reclaimed tidal land. The nutrient uptake and dry matter yield of crops were low in reclaimed tidal land compared to inland agricultural land, reflecting the nutrient-poor condition of the reclaimed tidal land. The crops removed 6.4 - 10.3 kg ha⁻¹, 9.8 - 12.5 kg ha⁻¹, and 4.1 - 12.2 kg ha⁻¹ for Ca, Mg, and Na per winter cultivation, respectively. Soil salinity significantly ($P < 0.05$) decreased in Italian ryegrass cultivation plot compared with control and tall fescue cultivation plots, reflecting salt removal by Italian ryegrass which was higher in salt uptake than tall fescue. These results suggest that creating grassland and cultivating forage crops on reclaimed tidal land in winter and early spring can contribute to soil desalinization along with the supply of forage containing high concentrations of minerals.

Keywords: Forage crop, Grassland, Soil desalinization, Soil salinity, Winter forage crop

Removal of Ca, Mg, K, and Na from soil by tall fescue and Italian ryegrass grown in Saemangeum reclaimed tidal land.

	Removal by tall fescue (kg ha ⁻¹)				Removal by Italian ryegrass (kg ha ⁻¹)			
	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na
First cultivation [†]	6.4 ± 1.1 [‡]	10.0 ± 1.5	106 ± 14	4.1 ± 0.9	10.3 ± 0.9	12.1 ± 1.4	89 ± 9	6.1 ± 0.7
Second cultivation	6.2 ± 0.7	9.8 ± 0.9	88 ± 7	6.6 ± 1.1	9.6 ± 1.7	12.5 ± 1.2	111 ± 6	12.2 ± 2.7

[†]The first and second cultivation was conducted between 2019 and 2020, and between 2020 and 2021.

[‡]Values are means ± standard deviation (n = 3).

Introduction

해안에 조성된 간척지 토양은 일반적으로 염농도와 나트륨 및 마그네슘 비율이 높고 유기물과 양분 함량이 낮음에도 불구하고 (Ahn et al., 2016), 부족한 식량안보 확보를 위해 벼 이외의 작물을 재배하기 위한 시도가 꾸준히 이루어지고 있다 (Lee et al., 2003, 2016, 2020). 유기물 공급을 위해 유기물질을 처리하거나 작물 재배 후 잔재물을 토양에 환원하기도 하고 (Yang et al., 2009; Bae et al., 2018; Kim et al., 2018), 염류 또는 나트륨성 토양 개량을 위해 다양한 물리적, 화학적 방법이 이루어지기도 한다 (Lee et al., 2015, 2016). 고려해야 할 또 다른 문제로 간척지의 비산먼지 발생이 있다. 간척지 토양은 일반적으로 실트 함량이 높고 유기물 함량이 낮아 해안가의 거센 바람으로 비산될 가능성이 높다 (Hyun et al., 2021). 특히 비산먼지는 건조한 봄에 작물 수확 후 나지상태의 농경지에서 발생하기 쉽다 (Hwang et al., 2009; Hyun et al., 2021). 이와 같이 해안 간척지에서 작물재배와 관련된 여러 문제가 있고, 이를 종합적으로 개선하기 위한 농경지관리가 필요하다.

가을에 작물을 수확한 후 동계작물을 재배하거나 토양 표면이 덮이도록 초지를 형성하는 것에는 여러 이점이 있다. 경제적으로는 나지상태로 방치하는 것에 비해 동계작물 재배로 농가 소득이 증가할 수 있고 그 외에도 여러 긍정적인 측면이 있다. 동계작물 재배는 토양에 유기물을 공급할 수 있고 질소 고정 식물은 다음 작물에 필요한 양분도 공급할 수 있으며 (Yang et al., 2009), 식물에 의한 토양 피복은 토양 침식을 줄일 수 있다 (Hyun et al., 2021). 특히 간척지의 경우 동계 및 봄철에 휴경 농경지를 식물로 피복하는 것은 부족한 유기물과 양분을 토양에 공급하고 간척지에서의 비산먼지 발생을 줄이고 미세먼지 저감에 기여할 것이다.

간척지에서 동계 작물로 사료작물을 재배하는 데에는 또 다른 이점이 있다. 먼저 가축 사료는 국내 자급률이 낮은 상황으로 (Yang et al., 2016; MAFRA, 2020), 간척지에서 사료작물을 재배함으로써 수입 사료를 대체할 수 있다. 그리고 간척지에서 사료작물 재배는 가축에 필요한 영양소로서 무기물을 공급하는 데에 도움을 줄 수 있다. 가축이 사료로 일반 조사료를 주로 이용할 경우 무기물, 비타민 등이 부족할 수 있어 이들 영양소가 배합된 배합사료 또는 미네랄 블록을 같이 급여해 주기도 한다 (Na et al., 2013). 따라서 염농도가 높은 간척지에서 재배한 작물은 무기물 함량이 높기 때문에 (Shin et al., 2005), 추가로 공급해야 할 무기물의 양을 줄일 수 있다는 경제적 이점이 있다. 또한 동계 휴경 기간 동안 사료작물로 염류를 흡수 제거함으로써 토양 제염효과와 함께 다음 작물의 염류피해를 줄이는 데에 긍정적으로 작용할 수 있다.

간척지에서의 사료작물 재배에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 동계 사료 작물 중 이탈리아라이그라스는 봄과 가을에 수확할 수 있는 다년생 목초이고, 비교적 내염성이 좋아 타 사료작물에 비해 간척지에서의 건물 수확량이 높은 것으로 알려져 있다 (Yang et al., 2012). 또한 톨페스큐는 월동 후 5월에 수확할 수 있는 일년생 목초이고, 최근 간척지 적응력이 높다고 평가되고 있으며, 대규모 면적에서 시험재배를 성공하였다고 보고되기도 하였다 (NIAS, 2020). 지금까지의 연구는 주로 간척지에서 재배 가능한 사료작물 선발 및 재배기술에 중점을 두었고, 식물에 의한 토양염류 제거에 대해 소개한 사례는 있으나 (Son et al., 2016), 사료작물의 염류 흡수 및 토양 제염에 대한 현장 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 동계사료 작물 재배에 따른 토양의 제염 효과에 대해 평가하기 위해 톨페스큐 및 이탈리아라이그라스에 대한 간척지 현장 재배 시험을 진행하고, 작물의 염류 제거 및 토양 염농도 변화에 대해 분석하였다.

Materials and Methods

시험지역 및 토양특성 본 연구는 전북 김제시 광활면에 위치한 농촌진흥청 국립식량과학원의 새만금간척지 연구시험포장 내 초지조성시험을 진행하고 있는 포장 (1 ha)을 이용하였다. 시험포장은 2018년에 조성되었고, 본 시험연구 전에는 갈대가 자생하였다. 시험포장 주위로 배수로가 설치되어 있고, 강우 시 토양의 물 빠짐은 양호하였으며, 약 60 m 거리에 폭 30 - 60 m의 하천이 위치하고 있었다. 토양은 실트함량이 96%인 실트토 (silt soil)이고, 토양 pH는 7.3으로 약알칼리성이었다. 1:5 비율의 물 침출 용액으로 측정한 토양의 전기전도도 ($EC_{1:5}$)는 0.04 dS m^{-1} , 포화침출액의 전기전도도 (EC_e)는 0.32 dS m^{-1} 로 제염이 진행된 상태였고, $EC_e/EC_{1:5}$ 비율은 8.0이었다 (Table 1). 토양 유기물 함량은 4.8 g kg^{-1} 으로 낮은 수준이었고, 교환성 양이온은 마그네슘 이온 (Mg^{2+})이 $3.9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 가장 높았고, 나트륨 이온 (Na^+)은 $0.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 가장 낮았다.

Table 1. Physicochemical properties of the study site in Saemangeum reclaimed tidal land.

pH _{1:5}	$EC_{1:5}$ (dS m^{-1})	$EC_e^{\dagger}$ (dS m^{-1})	Organic matter (g kg^{-1})	Total N (g kg^{-1})	Exchangeable cations ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)				Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture
					Ca	Mg	K	Na				
7.3	0.04	0.32	4.8	0.30	1.2	3.9	0.8	0.4	0.5	96.0	3.5	Silt

[†]Electrical conductivity of a saturated soil paste extract.

사료작물 재배시험 본 연구는 간척지에서 재배할 동계사료작물로 톨페스큐 품종인 그린마스터2호 (*Festuca arundinacea* Schreb.)와 이탈리아 라이그라스 품종인 그린콜 (*Lolium multiflorum* Lam.)을 선정하였고, 시험 처리구로 작물을 재배하지 않는 나지 (대조구), 톨페스큐 (TF) 재배구, 이탈리아라이그라스 (IRG) 재배구를 두었으며, 각 처리구의 면적은 0.5 ha 으로 총 면적은 1.5 ha 이었다. 처리구에서 작물재배는 2019년부터 2021년까지 2회 진행되었고, 대조구에서 작물은 재배하지 않고 나지 상태로 유지하였다. 1차 재배를 위해 TF 및 IRG 종자는 2019년 10월 16일에 60 kg ha^{-1} 의 양으로 줄뿌림하였다. 비료는 요소, 용성인비, 염화칼륨을 이용하여 N-P₂O₅-K₂O 기준으로 TF 재배구에 $153\text{-}275\text{-}160 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 시비하였고, 파종 일에 밀거름 ($80\text{-}200\text{-}70 \text{ kg ha}^{-1}$)과 월동 후 3월4일에 웃거름 ($73\text{-}75\text{-}90 \text{ kg ha}^{-1}$)으로 나누어 주었다. IRG 재배지는 $140\text{-}120\text{-}120 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 시비하였고, 파종 일에 밀거름 ($42\text{-}60\text{-}60 \text{ kg ha}^{-1}$)과 월동 후 3월4일에 웃거름 ($98\text{-}60\text{-}60 \text{ kg ha}^{-1}$)으로 나누어 주었다. 1차 재배 작물은 2020년 5월 21일에 수확하였다. 다음 재배 시작일인 2020년 10월 15일까지 TF 재배지는 휴경하였고, IRG 재배지는 질소질 비료를 $53, 42 \text{ kg ha}^{-1}$ 으로 2회 분시하면서 3회 더 예취하였다. 이때 수확한 양은 조사하지 않았다. 2차 재배는 2020년 10월 15일에 진행하였으며, IRG재배지는 종자를 60 kg ha^{-1} 의 양으로 줄뿌림하였고 IRG재배지는 10 - 15 cm 높이로 작물을 예취하였다. 비료는 요소, 용성인비, 염화칼륨을 이용하여 N-P₂O₅-K₂O 기준으로 TF 재배구에 $115\text{-}150\text{-}180 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 시비하였고, 파종 일에 밀거름 ($42\text{-}75\text{-}90 \text{ kg ha}^{-1}$)과 월동 후 3월4일에 웃거름 ($73\text{-}75\text{-}90 \text{ kg ha}^{-1}$)으로 나누어 주었다. IRG 재배지는 $140\text{-}120\text{-}120 \text{ kg ha}^{-1}$ 시비하였고, 예취 후 ($42\text{-}60\text{-}60 \text{ kg ha}^{-1}$)와 월동 후 3월 4일에 웃거름 ($98\text{-}60\text{-}60 \text{ kg ha}^{-1}$)로 나누어 시비하였다. 2차 재배 작물은 2021년 5월 10일에 수확하였다. 재배시험 기간 동안 자연 강우로 물을 공급하였다 (Table 2).

Table 2. Monthly mean precipitation and air temperature during the two growing seasons.

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May
First cultivation								
Precipitation (mm)	86.6	55.6	30.9	79.1	59.0	22.1	22.2	111.9
Air temperature (°C)	16.1	10.4	4.0	3.3	3.9	7.6	10.3	17.6
Second cultivation								
Precipitation (mm)	6.8	49.6	30.9	32.3	23.3	100.3	46.4	81.5
Air temperature (°C)	14.5	9.4	1.8	0.0	4.1	8.4	13.2	17.1

시료 채취 및 분석 1차 재배시험은 초지가 조성된 후에 진행하였다. 10 cm 내외 크기로 째이 돌아 있었던 2020년 3월 3일에 토양을 채취하였고 (1차 토양), 작물 수확기에 토양 (2차 토양)과 식물체를 채취하였다. 2차 재배시험의 경우 파종 및 비료시비 전에 토양 (3차 토양)을 채취하였고, 수확기에 토양 (4차 토양)과 식물체를 채취하였다. 시료 채취는 각 처리구를 세 구획으로 나누어 진행하였다. 토양시료는 0 - 0.2, 0.2 - 0.4, 0.4 - 0.6 m의 깊이에서 각각 채취하였고, 각 구획별로 3개 지점에서 채취하여 혼성하였으며, 이때 각 구획별로 식물체도 같이 채취하였다. 또한 수확기에 작물 수확량 (건물중) 조사를 위해 1 m × 1 m 면적에서 식물체를 채취한 후 65°C에서 72시간 건조하여 무게를 측정하였다. 간척지 재배와의 비교를 위해 완주군에 있는 일반 논에서 재배한 작물을 채취하였다. 1차 시험은 일반 농경지에서 채취한 작물에 대해 성분분석을 하였고, 2차 시험은 생육 및 성분분석을 진행하였다.

토양은 풍건 후 2 mm 체로 거른 후 분석에 이용하였고, 식물체는 65°C 건조기에서 향량으로 건조하여 무게를 잰 후 곱게 분쇄하여 분석에 이용하였다. 토양의 pH와 염농도 (전기전도도, EC_{1:5})는 토양시료를 1:5 비율의 증류수로 침출하여 각각 pH 측정기 (SevenCompact S220, Mettler Toledo, Switzerland)와 전도도측정기 (455C, Istek, Korea)로 측정하였다. 토양 염농도로서 E_{Ce}는 E_{Ce}/EC_{1:5} 비율 (8.0)을 이용하여 EC_{1:5}로부터 추정하였다. 토양의 교환성 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺)은 pH 7의 아세트산암모늄 용액으로 침출하여 유도결합플라즈마 분광광도계 (ICP-OES 730-ES, Varian, USA)로 분석하였다. 식물체의 금속 (Ca, Mg, K, Na) 함량은 식물체 시료를 H₂SO₄-HNO₃-HClO₄ 혼합산으로 분해하여 유도결합플라즈마 분광광도계로 분석하였고, 식물체의 수용성 음이온 (NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻) 함량은 식물체 시료를 97°C에서 1시간 중탕 및 1시간 진탕하고 시린지필터로 거른 후 이온크로마토그래피 (ICS-1100, Dionex, USA)로 분석하였으며, 식물체의 질소 함량은 원소분석기 (Flash 2000 Series, Thermo, USA)로 분석하였다.

분석 결과에 대한 통계 분석은 R 프로그램 (R i368 3.4.1)을 이용하였고, 간척지와 일반 농경지 사이의 비교는 t-검정을 실시하였고, 토양 화학성 비교는 유의수준 5%에서 던컨다중검정을 실시하였다.

Results and Discussion

작물 생육 및 성분 간척지에서 사료작물의 수확량은 TF에 비해 IRG가 더 높았고, 재배 차수 별 비슷한 양상을 보였다 (Table 3). 1차 재배에서 IRG의 건물중 (6.43 Mg ha⁻¹)은 TF (4.57 Mg ha⁻¹)에 비해 41% 더 높았고 ($P < 0.05$), 2차 재배에서도 IRG (7.32 Mg ha⁻¹)가 TF (4.92 Mg ha⁻¹)에 비해 51% 더 높았다 ($P < 0.05$). 일반 농경지에서 재배한 선행 연구에서 TF 건물중이 15.00 - 16.93 Mg ha⁻¹, IRG가 9.06 - 10.10 Mg ha⁻¹인 것에 비해 크게 낮았다 (Lee et al., 2014; Kim et al., 2016). 본 연구에서도 2차 재배시기에 비교를 위해 타지역 일반 농경지에서 재배한 작물의 생육을

조사하였으며, TF가 10.1 Mg ha^{-1} , IRG가 13.7 Mg ha^{-1} 으로 간척지에서 사료작물의 수확량이 낮음을 알 수 있다. 또한 간척지에서 재배한 선행 연구에서는, 염농도가 0.22% (3.4 dS m^{-1})인 토양에서 재배한 IRG의 건중량이 6.7 Mg ha^{-1} 였고 (Shin et al., 2005), 염농도가 $0.2 - 2.8 \text{ dS m}^{-1}$ 범위의 토양에서 재배한 IRG의 건중량이 9.4 Mg ha^{-1} 였다 (Yang et al., 2012). 본 연구에서 시험한 간척지는 토양 ECE가 0.5 dS m^{-1} 이하이고, 염류 토양으로 분류되는 4 dS m^{-1} 보다 크게 낮았음에도 (Table 1), IRG 건중량 ($6.43 - 7.32 \text{ Mg ha}^{-1}$)은 비슷하거나 낮았다. 따라서 토양 염농도 외에도 다른 요인들이 작물의 생육에 영향을 주었을 수 있다.

Table 3. Dry matter yield of tall fescue and Italian ryegrass grown in Saemangeum reclaimed tidal land and inland agricultural land.

	Dry matter yield (Mg ha^{-1})			
	First cultivation [†]		Second cultivation	
	Tall fescue	Italian ryegrass	Tall fescue	Italian ryegrass
Reclaimed tidal land	4.57	6.43	4.9	7.4
Inland agricultural land	NA [‡]	NA	10.1	13.4

[†]The first and second cultivation was conducted between 2019 and 2020, and between 2020 and 2021, respectively.

[‡]Not applicable.

본 연구에서 작물의 낮은 수확량은 재배기간 중 기상의 영향이 있을 수 있고, 간척지 토양의 화학성 및 물리성 불량, 토양 양분 부족 등이 원인일 수 있다 (Lee and Yun, 2014; Lee et al., 2016). 먼저 본 논문에서 작물 생육 변화에 대해 결과로 제시하지 않았지만, 1차 재배에서 TF는 월동 이후부터 4월까지 생육이 저조해졌고 IRG는 입모율이 100%에서 80%로 낮아졌으며, 이 시기 3월과 4월의 월강수량이 각각 22 mm 로 낮았던 것이 영향을 주었을 수도 있다 (Table 2). 간척지토양은 수분보유력이 낮아 강우가 적은 시기에 작물 생육은 더 크게 영향을 받았을 것이다 (Lee and Yun, 2014). 2차 재배에서는 파종한 IRG의 입모율이 월동 전부터 90%로 낮았고, 여기에도 마찬가지로 2차 재배 시험이 시작되기 전후인 9월13월-11월11일 사이의 강수량이 17 mm 로 낮았던 것이 영향을 주었다고 판단된다.

토양 조건을 살펴보면, 해안 간척지의 특징으로 토양의 점토와 유기물 함량이 낮을 뿐만 아니라 작물에 필요한 양분도 부족하거나 균형을 이루지 못하기도 한다 (Lee et al., 2016). 토양의 비옥도 문제는 식물체의 양분 상태로 확인할 수 있다. 먼저 1차 재배에서 작물의 질소 함량은 일반 농경지보다 간척지 재배에서 더 낮았다 (Table 4). TF의 질소 함량은 일반 농경지 재배에서 2.4% 였으나 간척지 재배에서 1.7% 로 크게 낮았고 ($P < 0.05$), IRG도 일반 농경지 (1.9%)에 비해 간척지 (1.1%)에서 크게 낮았다 ($P < 0.05$). 반면에 2차 재배에서는 일반 농경지 작물의 질소 함량이 1차에 비해 크게 낮아짐에 따라 오히려 일반 농경지에 비해 간척지의 작물 질소 함량이 더 높았다. 그럼에도 불구하고 간척지에서 수확량이 낮았기에 질소 외에도 다른 영양원소의 영향이 더해졌을 것이다.

식물체의 수용성 음이온 중에서 인산 (PO_4^{3-})은 1차 및 2차 재배 모두 일반 농경지보다 간척지에서 낮았다 (Table 5). 간척지에서 1차 재배한 식물체의 수용성 인산 함량은 일반 농경지의 $45 - 47\%$ 수준이었고, 2차 재배에서는 $50 - 73\%$ 수준으로 낮았다. 식물체의 수용성 질산 (NO_3^-)은 1차 재배에서 일반 농경지보다 간척지에서 $2 - 3\%$ 수준으로 매우 낮았지만, 2차 재배에서는 일반 농경지에서 재배한 작물의 농도 감소가 있었고 그 결과 간척지에서 더 높은 함량을 보였다. 식물체의 수용성 황산 (SO_4^{2-})은 간척지 재배에 따른 일관된 경향은 없었고, 단지 간척지 재배는 1차 재배에서 TF, 2차 재배에서 IRG가 일반 농경지 재배보다 더 낮았다.

Table 4. Nitrogen content of tall fescue and Italian ryegrass grown in Saemangeum reclaimed tidal land and inland agricultural land.

	N content (%)			
	First cultivation [†]		Second cultivation	
	Tall fescue	Italian ryegrass	Tall fescue	Italian ryegrass
Reclaimed tidal land	1.7 ± 0.3 [‡]	1.1 ± 0.2	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.3
Inland agricultural land	2.4 ± 0.2	1.9 ± 0.2	0.90 ± 0.03	0.73 ± 0.02
<i>P</i>	<0.05	NS [§]	<0.01	<0.01

[†] The first and second cultivation was conducted between 2019 and 2020, and between 2020 and 2021, respectively.

[‡] Values are means ± standard deviation (n = 3) and compared using student's paired t-test.

[§]Not significant.

Table 5. Water soluble nitrate, phosphate, and sulfate content of tall fescue and Italian ryegrass grown in Saemangeum reclaimed tidal land and inland agricultural land.

	Tall fescue (%)			Italian ryegrass (%)		
	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
First cultivation [†]						
Reclaimed tidal land	0.001 ± 0.001 [‡]	0.37 ± 0.07	0.50 ± 0.05	0.003 ± 0.003	0.35 ± 0.08	0.25 ± 0.02
Inland agricultural land	0.060 ± 0.023	0.81 ± 0.08	0.50 ± 0.04	0.081 ± 0.006	0.76 ± 0.01	0.59 ± 0.01
<i>P</i>	<0.05	<0.01	NS [§]	<0.001	<0.001	<0.001
Second cultivation						
Reclaimed tidal land	0.007 ± 0.001	0.24 ± 0.02	0.58 ± 0.08	0.008 ± 0.003	0.26 ± 0.01	0.69 ± 0.02
Inland agricultural land	0.005 ± 0.0002	0.48 ± 0.01	1.05 ± 0.01	0.004 ± 0.001	0.36 ± 0.01	0.64 ± 0.01
<i>P</i>	<0.01	<0.001	<0.001	NS [§]	<0.001	<0.05

[†] The first and second cultivation was conducted between 2019 and 2020, and between 2020 and 2021, respectively.

[‡] Values are means ± standard deviation (n = 3) and compared using student's paired t-test.

[§]Not significant.

작물의 다량원소 중 Ca 함량이 간척지가 일반 농경지에 비해 더 낮았다 (Table 6). 1차 재배에서 TF의 Ca 함량은 간척지가 일반 농경지의 47% 수준이었고, IRG는 35% 수준이었다. 2차 재배에서는 두 작물 모두 더 낮은 수준을 보였다. 작물의 K 함량은 1차 재배에서 간척지가 더 낮았지만, 2차 재배에서는 간척지와 일반 농경지 사이에 유의적인 차이가 없었다. 반면에 식물체 Na 함량은 1차 재배에서 TF의 경우 간척지가 일반 농경지의 445% 수준으로 높았고, 2차 재배에서 TF와 IRG 모두 간척지가 일반 농경지에 비해 각각 459%, 469% 수준으로 높았다. 또한 식물체 Mg 함량은 1차 재배에서 TF의 경우 간척지가 일반 농경지의 130% 수준으로 높았고, 2차 재배에서 TF와 IRG 모두 간척지가 일반 농경지에 비해 각각 171%, 2,225% 수준으로 높았다. Na가 다른 양이온과 비교하여 차지하는 비율[Na/(Ca+Mg+K)]을 비교하였을 때 TF와 IRG 모두 간척지 재배가 일반 농경지 재배보다 높았다. 따라서 작물의 질소, 인산, 칼슘 함량을 고려하였을 때 간척지에서 재배한 TF와 IRG는 필수영양원소가 부족함을 알 수 있고, 이것이 작물의 생육을 부진하게 만드는 요소로 작용했을 것이다. 1차와 2차 재배를 비교하였을 때 작물과 토양 표토의 Ca 함량이 감소하는 경향을 보였고 (Table 6, Fig. 2), 특히 일반 농경지에 비해 작물의 Ca 함량이 낮다는 것을 고려할 때, 간척지에서 고갈되기 쉬운 양분에 대한 시비 관리도 필요하다고 판단된다.

Table 6. Content of Ca, Mg, K, and Na in tall fescue and Italian ryegrass grown in Saemangeum reclaimed tidal land and inland agricultural land.

	Tall fescue (%)				Italian ryegrass (%)			
	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na
First cultivation [†]								
Reclaimed tidal land	0.14 ± 0.02 [‡]	0.22 ± 0.03	2.32 ± 0.32	0.09 ± 0.02	0.16 ± 0.01	0.19 ± 0.02	1.39 ± 0.14	0.10 ± 0.01
Inland agricultural land	0.30 ± 0.01	0.17 ± 0.002	3.29 ± 0.12	0.02 ± 0.002	0.45 ± 0.01	0.19 ± 0.003	2.71 ± 0.02	0.13 ± 0.004
<i>P</i>	<0.001	NS [§]	<0.01	<0.01	<0.001	NS	<0.001	<0.05
Second cultivation								
Reclaimed tidal land	0.13 ± 0.01	0.20 ± 0.02	1.80 ± 0.15	0.08 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.02	1.49 ± 0.08	0.12 ± 0.04
Inland agricultural land	0.25 ± 0.01	0.12 ± 0.003	1.81 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.33 ± 0.01	0.07 ± 0.002	1.38 ± 0.01	0.02 ± 0.002
<i>P</i>	<0.001	<0.01	NS	<0.01	<0.001	<0.001	NS	<0.05

[†] The first and second cultivation was conducted between 2019 and 2020, and between 2020 and 2021, respectively.

[‡] Values are means ± standard deviation (n = 3) and compared using student's paired t-test.

[§] Not significant.

간척지에서 재배한 동계 사료 작물의 염류 제거량은 원소에 따라 다르게 나타났다. 먼저 비료로 공급한 K의 경우 1차와 2차 재배에서 각각 89 - 106 kg ha⁻¹와 88 - 111 kg ha⁻¹ 만큼 제거되었다 (Table 7). Ca, Mg, Na 등은 비료로 공급하지 않았지만 상당량이 제거되었다. Ca는 1차와 2차 재배에서 각각 6.4 - 10.3 kg ha⁻¹와 6.2 - 9.6 kg ha⁻¹ 만큼 제거되었고, Mg는 10.0 - 12.1 kg ha⁻¹와 9.8 - 12.5 kg ha⁻¹ 만큼 제거되었으며, Na는 4.1 - 6.1 kg ha⁻¹와 6.6 - 12.2 kg ha⁻¹ 만큼 제거되었다. 특히 본 연구 토양에서 Mg는 다른 양이온에 비해 토양에 높은 비율로 존재하였고 (Table 1), 2차 재배에서 식물체 Mg 함량은 일반 간척지에서 재배한 것에 비해 더 높았으며 (Table 5), 일반 조사료에 대해 조사한 선행 연구에서 TF의 Mg 함량이 0.15%인 것에 비해 높았다 (Na et al., 2013). 따라서 동계 사료 작물을 재배함으로써 간척지 토양에서 높은 농도로 존재하는 염, 특히 마그네슘을 제거하는 데에 기여할 수 있음을 보여준다. 다른 한편으로 봄철 목초를 가축 사료로 이용할 경우 마그네슘 결핍이 나타날 수 있는데 (Yang et al., 2016), 간척지에서 재배한 TF와 IRG은 마그네슘 함량이 높아 양질의 사료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7. The amount of Ca, Mg, K, and Na removed from soil by tall fescue and Italian ryegrass grown in Saemangeum reclaimed tidal land.

	Removal by tall fescue (kg ha ⁻¹)				Removal by Italian ryegrass (kg ha ⁻¹)			
	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na
First cultivation [†]	6.4 ± 1.1 [‡]	10.0 ± 1.5	106 ± 14	4.1 ± 0.9	10.3 ± 0.9	12.1 ± 1.4	89 ± 9	6.1 ± 0.7
Second cultivation	6.2 ± 0.7	9.8 ± 0.9	88 ± 7	6.6 ± 1.1	9.6 ± 1.7	12.5 ± 1.2	111 ± 6	12.2 ± 2.7

[†] The first and second cultivation was conducted between 2019 and 2020, and between 2020 and 2021, respectively.

[‡] Values are means ± standard deviation (n = 3).

토양 화학성 변화 초지 및 사료작물을 재배함에 따라 간척지의 토양 pH는 낮아지는 경향을 보였고, 특히 0 - 0.2 m의 표토에서 그 경향이 뚜렷했다 (Fig. 1). 대조구의 경우 1차 재배 시기인 2020년 3월에 채취했을 때 pH는 7.5였고 그 후 증가 및 감소하다가 2차 재배 수확기인 2021년 5월에 채취하였을 때 pH는 7.1로 0.4만큼 낮아졌다. TF와 IRG를 재배할 경우 시기별 0 - 0.2 m 깊이의 토양 pH 변화는 대조구와 비슷하였지만, 최종 pH 변화 폭은 더 컸다. TF 재배의

경우 pH는 7.4에서 6.4로 1.0만큼 낮아졌고, IRG 재배의 경우 6.8에서 5.6으로 1.2만큼 낮아졌다.

토양 염농도 (ECe)는 모든 처리구에 대해 0.5 dS m^{-1} 이하였고, IRG를 제외하고 시기별 뚜렷한 변화는 없었다 (Fig. 1). 또한 토양 깊이별로 염농도는 유의적인 차이 없이 비슷한 값을 보였다. 토양 염농도는 일반적으로 해안 간척지에서 관찰되는 염농도 수준에 비해 낮았고 (Ryu et al., 2020), 우리나라 밭토양의 염농도가 $0.6 - 1.0 \text{ dS m}^{-1}$ (평균 0.75 dS m^{-1}) 수준인 것과 비교해도 낮았다 (Kim et al., 2019). 사료작물 재배지역을 포함하여 대조구까지 낮은 염농도를 보인 것은 사료작물 재배 전에 이미 상당한 양의 염이 제거되었기 때문이라고 판단된다. IRG 재배의 경우 1차 재배 후에 ECe가 0.07 dS m^{-1} 이하로 크게 낮아졌다가 그 후 초기와 비슷한 수준으로 점차 증가하였다. IRG 재배 토양에서 염농도가 낮아진 원인은 본 연구로 확인할 수 없었고, 생육이 좋은 IRG의 염류 흡수에 의한 제염 효과가 있거나 토양 물리성 개선에 따른 염의 용탈 효과가 있을 수 있다. 또한 IRG 재배 토양의 염농도가 다시 본래 수준으로 증가한 것도 본 연구로 확인할 수 없었지만, 선행 연구에 의하면 간척지 자생식물을 토양에 환원할 경우 토양의 염농도가 증가할 수

Fig. 1. pH and ECe of soil at non-vegetated (Control), tall fescue (TF), and Italian ryegrass (IRG) plot in Saemangeum reclaimed tidal land in (a, b) March 2020, (c, d) May 2020, (e, f) October 2020, and (g, h) May 2021. Horizontal bars represent standard deviations of the mean values ($n = 3$). ns, not significant; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

있다고 보고되었고 (Kim et al., 2018), 본 연구에서도 지하부 뿌리를 포함한 유기물의 분해가 염농도 증가에 영향을 주었을 가능성도 있다. IRG 재배 결과에 의하면 사료 작물 재배에 의한 제염 효과가 있을 수 있지만, 간척지 환경에 따라 다시 재염화 (re-salinization)될 수 있음을 보여준다.

간척지 토양의 교환성 양이온 함량은 시기에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 2). 전체 처리구 및 전체 깊이를 평균하였을 때, 1차 재배 초기인 2020년 3월 토양 (1차 토양)은 4가지 양이온의 합이 $6.3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 였다. 그러나 1차 재배 수확기인 2020년 5월 채취 토양 (2차)은 Na^+ 이온 농도가 증가함에 따라 전체 양이온의 합이 $6.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 로 증가하였고, 2차 재배기에 채취한 3차 및 4차 토양은 각각 $5.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 와 $5.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 감소하였다. 교환성

Fig. 2. Concentration of exchangeable Ca, Mg, K, and Na of soil at non-vegetated (Control), tall fescue (TF), and Italian ryegrass (IRG) plot in Saemangeum reclaimed tidal land in (a) March 2020, (b) May 2020, (c) October 2020, and (d) May 2021. Horizontal bars represent standard deviations of the mean values ($n = 3$). ns, not significant; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

Mg²⁺ 이온은 1차 토양에 비해 4차 토양에서 농도가 크게 감소하였고, Ca²⁺와 K⁺ 이온도 감소하는 경향을 보였다. 그러나 교환성 Na⁺ 이온은 2차 토양에서 증가하였다고 그후 다시 본래 수준으로 낮아졌다. 조사한 4가지 양이온에 대해 대조구에서도 비슷한 경향으로 낮아지고 있어, 이는 작물 재배에 의한 제염 외에 자연적 제염에 의한 변동 효과가 있음을 보여준다. 대조구에서도 자생식물에 의해 제염효과가 나타날 수 있지만, 경운하여 식물을 토양에 환원하였기에 대조구에서 식물에 의한 제염효과는 적었을 것으로 판단된다. 작물의 지상부 바이오매스의 1회 수확에 따른 염 제거를 토양 중 교환성 양이온 변화량 (토양 깊이 0.6 m 기준)으로 변환하였을 때, 토양 중 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ 이온은 각각 0.06, 0.13, 0.35, 0.04 cmol_c kg⁻¹ 만큼 감소할 수 있고 지하부 뿌리까지 고려한다면 감소폭은 더 커질 수 있을 것이다. 또한 토양 중 농도가 높은 Mg의 작물 흡수량이 높다는 것을 고려할 경우 염류토양에서는 작물에 의한 제염 효과가 더욱 크게 나타날 것으로 판단된다.

Conclusions

본 연구는 간척지에서 겨울 및 초봄 사이에 초지 조성 및 사료작물 재배에 따른 작물의 염류 흡수 및 토양 제염 효과를 평가하기 위해 수행되었고, 새만금 간척지에 톨페스큐 (TF)와 이탈리아라이그라스 (IRG)를 3년동안 2회 재배하였다. 양분이 부족한 간척지 토양 환경이 반영되어 일반 농경지에 비해 간척지 재배에서 작물의 양분 흡수량 및 건물 수확량이 낮았다. 그럼에도 불구하고 작물은 간척지 토양으로부터 상당한 양의 염류를 흡수 제거하였고, 1회 재배당 제거된 양은 Ca, Mg, Na가 각각 6.4 - 10.3 kg ha⁻¹, 9.8 - 12.5 kg ha⁻¹, 4.1 - 12.2 kg ha⁻¹였다. 작물의 생육량 및 염류 제거량이 높았던 IRG 재배구에서 토양 염농도가 크게 감소하였다. 본 연구 결과는 간척지에 동계 초지조성 및 사료작물 재배로 무기질을 함유한 조사료 수확과 함께 토양 염농도를 줄일 수 있음을 보여주었다. 본 연구는 제염이 이루어진 간척지 토양에서 진행되었고, 간척지의 일반적 염농도 조건을 반영하기 위해서는 염류 토양에서의 추가적인 재배 시험이 필요하다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01503701)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ahn, B.K., Y.Y. Lim, D.Y. Ko, C.K. Lee, J.H. Kim, Y.J. Song, and J.H. Lee. 2016. Investigation of soil physico-chemical properties in Saemangeum reclaimed tidal land in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:347-354.
- Bae, H.S., H. Jang, J.B. Hwang, T.S. Park, K.S. Lee, D.S. Lee, and D.Y. Chung. 2018. Managing soil organic matter and salinity by crop cultivation in Saemangeum reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51:50-60.
- Hwang, H.S., I.B. Lee, M.H. Shin, S.W. Hong, I.H. Seo, J.I. Ryu, J.P. Bitog, K.S. Kwon, and Y.H. Kim. 2009. Monitoring of the fugitive and suspended dust dispersion at the reclaimed land and neighboring farms: Monitoring in Gimje. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 51:59-67.
- Hyun, B.K., C.H. Ryu, S.B. Lee, C.W. Lee, Y.S. Song, and D.B. Lee. 2021. Reduction of fugitive dust by soil management

- practices for barley and reed in Saemangeum reclaimed land. Korean J. Soil Sci. Fert. 54:58-67.
- Kim, K.Y., G.J. Choi, S.H. Lee, T.Y. Hwang, G.W. Lee, H.C. Ji, and S.M. Park. 2016. Effect of harvest time of rice after seeding of Italian ryegrass on growth characteristics and dry matter yield of IRG in paddy field. J. Korean Soc. Grassl. Forage Sci. 36:287-292.
- Kim, S., Y.Y. Oh, J.H. Ryu, S.H. Lee, and J.T. Lee. 2018. Studies on potential supply of soil organic matter using *Phragmites australis* in reclaimed land. Korean J. Soil Sci. Fert. 51:412-419.
- Kim, Y.H., M.S. Kong, E.J. Lee, T.G. Lee, and G.B. Jung. 2019. Status and changes in chemical properties of upland soil from 2001 to 2017 in Korea. Korean J. Environ. Agric. 38:213-218.
- 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, J.E., D.H. Seo, H.M. Ro, and S.I. Yun. 2016. Yield response of Chinese cabbage to compost, gypsum, and phosphate treatments under the saline-sodic conditions of reclaimed tidal land. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 34:587-595.
- Lee, K.W., G.J. Choi, K.Y. Kim, H.J. Ji, H.S. Park, D.G. Lee, and S.H. Lee. 2014. Effects of seeding time on growth characteristics and seed production of tall fescue. J. Korean Soc. Grassl. Forage Sci. 34:103-107.
- Lee, S., H.S. Bae, S.H. Lee, Y.Y. Oh, J.H. Ryu, J.C. Ko, H.C. Hong, Y.D. Kim, and S.L. Kim. 2015. Effect of subsurface drainage systems on soil salinity at Saemangeum reclaimed tidal land. Korean J. Soil Sci. Fert. 48:618-627.
- 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.
- Lee, S.H., Y.Y. Oh, J.H. Ryu, H.S. Lee, B.H. Kang, H.K. Ock, and K.H. Jung. 2020. Changes in soil salinity and upland crop productivity in reclaimed land as affected by groundwater table. Korean J. Soil Sci. Fert. 53:415-430.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2020. Major statistics of agriculture, food and rural affairs.
- Na, Y.J., K.W. Lee, K.H. Hong, J.S. Lim, M.H. Kim, K.H. Kim, and S.R. Lee. 2013. Evaluations of nutrient compositions and *in situ* ruminal disappearance rates of roughage sources commonly used in Korea. J. Korean Soc. Grassl. Forage Sci. 33:269-274.
- NIAS (National Institute of Animal Science). 2020. Press release on the successful creation of grassland in reclaimed land using the Korean pasture 'Greenmaster2ho'. <https://nias.go.kr/front/prboardList.do?cmCode=M090814150850297> (posed on 20 May 2020)
- Ryu, J.H., Y.Y. Oh, S.H. Lee, K.D. Lee, and Y.J. Kim. 2020. Annual changes of soil salinity of the Saemangeum reclaimed tide land during last 10 years. Korean J. Environ. Agric. 39:327-333.
- Shin, J.S., S.H. Lee, W.H. Kim, S.H. Yoon, J.G. Kim, and J.W. Nam. 2005. Comparison of dry matter and feed value of major winter forage crops in the reclaimed tidal land. J. Korean Grassl. Sci. 25:113-118.
- Son, J.W., J.D. Song, W.T. Shin, S.H. Lee, J.H. Ryu, and J.Y. Cho. 2016. Desalinization of salt-affected soil by phytoremediation. Korean J. Org. Agric. 24:583-598.
- Yang, C.H., J.H. Lee, S. Kim, J.H. Jeong, N.H. Baek, W.Y. Choi, S.B. Lee, Y.D. Kim, S.J. Kim, and G.B. Lee. 2012. Study on forage cropping system adapted to soil characteristics in reclaimed tidal land. Korean J. Soil Sci. Fert. 45:385-392.
- Yang, C.H., J.H. Ryu, T.K. Kim, S.B. Lee, J.D. Kim, N.H. Baek, S. Kim, W.Y. Choi, and S.J. Kim. 2009. Effect of green manure crops incorporation with rice cultivation on soil fertility improvement in paddy field. Korean J. Soil Sci. Fert. 42:371-378.
- Yang, S.H., B.C. Yang, K.Y. Chung, S.S. Jang, E.M. Lee, S.R. Cho, S.D. Lee, H.S. Park, and E.G. Kwon. 2016. Effects of supplementation of trace nutrients on Hanwoo heifers (*Bos taurus coreanae*) under hilly pasture grazing system. J. Korean Soc. Grassl. Forage Sci. 36:387-392.