

Investigation of Soil Physico-chemical Properties in Saemangeum Reclaimed Tidal Land in Korea

Byung-Koo Ahn*, Yeon-Yi Lim, Do-Young Ko, Chang-Kyu Lee, Jin-Ho Kim,
 Young-Ju Song, and Jin-Ho Lee¹

Jeollabuk-Do Agricultural Research and Extension Services, Iksan 54591, Korea

¹*Department of Bioenvironmental Chemistry, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea*

(Received: July 16 2016, Revised: August 25 2016, Accepted: August 26 2016)

This study was conducted to investigate the physical and chemical properties of soils in Saemangeum reclaimed lands. The investigated areas were total 5,020 ha which included 220 ha for Agricultural Life site, 2,450 ha for Tourism & Leisure site, 1,130 ha for Industrial & Research site, 820 ha for Bioenergy crop production site, and 400 ha for Rural City site. Soil samples consisting of the upper 20 cm from the surface were collected in every 200 m × 500 m of the each site in March and September, 2015. Particle size distribution of soils in the reclaimed land was 83.2% sand, 8.6% silt and 8.2% clay in average. Soil texture was distributed as 40.8% sandy soil, 35.5% loamy sand, and 19.7% sandy loam. Based on the investigation of soil chemical properties conducted in March, 2015, soil pH, electrical conductivity of a saturated soil paste extract (ECe), and exchangeable (Exch.) K⁺ and Mg²⁺ concentrations were higher than those of the optimum levels for upland soil, whereas soil organic matter content, available (Avail.) phosphate concentration, and Exch. Ca²⁺ concentration were lower than those of the optimum ranges. Depending on the results of the soil chemical properties measured in September, 2015, soil pH, ECe, and Exch. K⁺ concentration were higher than those of the optimum levels, but soil organic matter, Avail. phosphate, and Exch. Ca²⁺ concentration were lower than the optimum ranges. In addition, distribution of sodic soil ranged between 41.4% and 50.0%, and saline soils were from 16.4 to 31.8%. Soils with pH values above 7.0 increased from 15.3% in March to 35.2% in September. Soils with ECe values over 4.8 dS m⁻¹ increased from 45.6% to 50.7%, whereas soils with the values below 2.0 dS m⁻¹ decreased from 42.8% to 36.9%.

Key words: Soil physico-chemical property, Saemangeum reclaimed lands, ECe

Distribution of values for soil chemical properties in Saemangeum reclaimed tidal land (March, 2015).

Classification	pH	ECe	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cations			
					K	Ca	Mg	Na
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmol _c kg ⁻¹ -----			
Ave.	7.8	11.3	2.1	24.6	0.8	2.8	2.7	7.0
Max.	9.9	90.8	9.9	119.9	1.7	11.2	10.9	50.8
Min.	5.2	0.06	0.04	0.297	0.09	0.09	0.03	0.001
Med.	7.9	2.85	1.9	22.44	0.74	2.21	2.37	3.63
Optimal Range	6.0~7.0	2>	20~30	300~500	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	-

*Corresponding author: Phone: +82632906191, Fax: +82632906199, E-mail: ahnbk61@korea.kr

§Acknowledgement: This research was supported by Saemangeum Project Office, Korea Rural Community Corporation, Korea.

Introduction

새만금간척종합개발사업은 식량의 안정적 확보와 자급률을 높이는 목적으로 1971년 새만금사업예정지 조사를 실시하여, 2006년 4월 21일 전북 군산 비응항에서 시작해 고군산군도의 야미도와 신시도를 지나 부안 변산반도에 이르는 33.9 km의 세계 최장 방조제 공사가 완료 되었다. 2007년 4월 3일 농업용지 72%, 산업관광 등 기타용지 28%의 새만금 내부토지개발 기본구상이 수립된 후, 2008년 2월에는 사업효과를 극대화하기 위해 농업용지 30%, 산업 및 관광 용지 등 복합용지 70%를 개발 계획이 수정 발표되었고, 2010년 1월 새만금 내부개발 기본 구상 및 종합개발실천이 발표되었다. 이에 따라 2011년 3월에는 새만금종합개발계획 (Master Plan)이 확정되면서 국제업무, 산업, 관광, 생태용지 기능이 특화된 명품복합도시로 개발하는 구상안이 제시되었다.

새만금 방조제 및 내부 방수제 공사가 완료되어 감에 따라 노출지 활용을 극대화하기 위한 이용기술 개발이 필요한 실정이다. 새로운 간척지는 같은 지구 내에서도 염류농도가 다양하기 때문에 종합적인 제염 및 재염화 방지기술이 필요하다. 인위적인 방조제 건설로 형성된 간척지는 지하수위와 염류농도가 높고, 투수성이 불량하여 수직배수에 의해 제염이 어렵다. 간척지를 논으로 활용할 경우 통기성이 불량하고, 환원상태에서 황화수소의 발생과 인산, 칼리, 아연결핍이 많아 벼 생육이 매우 불량하다. 따라서 간척지를 농경지로 활용하기 위해서는 높은 염류농도와 높은 지하수위, 그리고 토양 물리화학적 악화 등을 고려하여야 한다 (Han et al., 2011; Jung and Yoo, 2007; Yang et al., 2010).

새만금 간척지는 토양염류농도와 배수의 제약이 많고, 점성이 거의 없는 사토로 이루어져 있어 토양유실이 높은 곳이다 (Jung et al., 2004; Sohn et al., 2010b). 과거 간척지 조성은 주로 쌀 생산을 목적으로 이루어졌지만, 2000년부터 세계무역자유화 영향 때문에 전작, 특작, 원예작 등 다양한 용도로 활용되어야 한다는 주장이 설득력이 있으며, 특히 새만금 간척지의 범용화에 많은 관심을 가지고 있다 (Sohn et al., 2010a). 새만금 간척지에서 발작물이나 원예작물 재배와 관련된 연구가 추진되고 있지만, 간척지에서 발작물 재배조건은 작물의 내염성에 달려있다. 대부분의 식물은 발아기에는 내염성에 강하지만 출아기와 생육초기에는 약하다 (Lee et al., 2003). 토양 중 염분은 식물에 염스트레스 (salt stress)를 주는데, 3가지 형태로 식물체에 손상을 준다. 첫째, 높은 Na^+ 농도는 점토를 분산시켜 토양공극을 감소시키고, 토양공기와 수분 유통을 악화시킨다. 두 번째 토양의 높은 염은 토양의 삼투포텐셜을 낮게 하여 생리적 가뭄 (physiological drought)을 일으켜 양분과 수분 흡수를 어렵게 만든다. 세 번째 Na^+ 과 Cl^- 의 독성 효과이다 (Hopkins and Huner, 2004; Ryu et al., 2010).

새만금 간척지는 이전에 해수의 영향을 받던 조간대 및 조하대 지역으로 특성상 토양의 염분 및 염류화, 배수불량과 토양 유기물이 부족하다. 대체로 간척 초기에 제염화가 되지 않은 토양들로 배수가 불량하고 염을 포함하고 있는 지하수위 및 각 층위의 염분농도가 높아 수도작 이외에 고부가치 발작물 재배 등의 다각적 복합적 사용 등에는 태생적 제한점과 해결과제를 안고 있다. 그러나 지금까지 농업용지의 도입기능별 부분적 토양조사는 각 연구과제별로 수행되어 왔으나, 전체적인 토양의 물리 화학적 특성에 대한 광범위한 토양조사는 부족하였다 (Kim, 2012).

간척지를 농경지로 활용하기 위한 많은 연구를 진행하는 과정에서 가장 핵심이 되는 분야는 제염이었다. 이는 적절한 염류농도 수준이 된다면 농경지로 활용하기 용이하기 때문이다. 현재 새만금 노출지를 새만금종합개발계획에 따라 활용하기까지는 상당한 시간이 필요한 상황이다. 계획된 용도로 활용하기 전까지 제염을 촉진하고, 토지이용 효율을 높이기 위해 경관작물이나 사료작물 등을 재배할 예정이다. 장기간 노출되어 있는 동안 강우에 의해 제염이 될 수 있지만 새만금 간척지의 경우 지하수위가 높기 때문에 제염된 후에도 재염화될 수 있는 여건을 갖추고 있다.

따라서 본 연구에서는 재염화 억제, 토양침식 방지, 토지의 효율적인 이용 등을 감안하여 사료작물 재배 예정지를 선정하기 위한 토양조사 필요성에서 시작되었다. 현재까지 노출된 지역 가운데 임대부지와 공사가 진행 중인 곳을 제외하고 접근하기가 용이하고 활용 가능한 면적을 대상으로 작물재배 후보지를 선정하기 위해 두 차례에 걸쳐 토양의 물리화학적 특성을 조사하여 내부 개발지의 효율적 이용을 위한 토양자원의 기초자료로 활용하는데 목적이 있다.

Materials and Methods

조사지역 새만금 방조제 완공으로 노출 예정 면적 28,300 ha 중 55%에 해당하는 15,565 ha가 현재 노출되었고, 이 가운데 임대부지와 공사 시행중인 곳을 제외하고 접근하기가 용이하여 활용 가능한 면적을 대상으로 작물 재배 후보지를 선정하기 위해 Fig. 1과 같이 새만금 노출지를 용도별로 나누어 농생명용지 220 ha, 관광레저용지 2,450 ha, 산업연구용지 1,130 ha, 바이오에너지작물생산단지 820 ha, 농촌도시용지 400 ha의 표토 (0~20 cm)를 대상으로 2015년 3월과 9월 두 차례에 걸쳐 채취하여 조사하였다 (Table 1).

토양채취 및 분석방법 조사용 토양 시료는 새만금 노출지를 200 m × 500 m 격자간격으로 Soil auger를 이용하여 해당지점 반경 50 m 이내 5곳에서 채취·혼합하였다. 채취한 시료는 음지에서 건조 후 2 mm 표준 체를 통과한 것을



Fig. 1. Location of each study area in Saemangeum reclaimed tidal land, Korea.

분석에 사용하였다. 토양 분석은 국립농업과학원의 토양화학 분석법 (NIAS, 2010b)에 따라 실시하였다. 또한 토성은 micro pipette법으로 분석하고, 판정은 미국 농무부 분류기준을 따랐다 (Gee and Bauder, 1986). 토양 pH는 풍건토양과 증류수를 1:5 (w/v)의 비율로 혼합하고 30분간 진탕 후 pH meter (Orion3 star, Thermo)로 측정하였다. 전기전도도는 풍건토양 200 g을 포화상태로 반죽시켜 24시간 방치 후 감압 여과하여 EC meter (TEMP Meter C75, Istek)로 측정하였다. 토양 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성 양이온 (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+)은 1 N CH_3COONH_4 (pH 7.0)으로 치환 추출하여 원자흡광분광광도계 (GBC Avanta PM, Australia)를 이용하여 분석하였다.

통계분석 조사한 자료는 SPSS (Statistical Package for the Social Science, 18.0 K, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하여 5% 수준에서 Duncan's multiple range test를 실시하였다.

Results and Discussion

노출지 토양의 물리적 특성 새만금 노출지 깊이 20 cm 이내의 토양을 2015년 3월에 채취하여 조사한 토양의 입자분포는 모래 84.23%, 미사 8.63%, 점토 8.14% 수준이었다. 그러나 입자별 분포비율에서 모래 14.02~97.41%, 미사 0.01~78.54%, 점토 0.04~29.52%로 분포 범위가 상당히 크게 나

Table 1. Study areas of Saemangeum reclaimed tidal land.

Complex site	Study area	Ratio
	ha	%
Industrial & Research	1,130	22.5
Tourism & Leisure	2,450	48.8
Agricultural Life	220	4.4
Rural City	400	8.0
Bioenergy Crop Production	820	16.3
Total	5,020	100.0

Table 2. Distribution of soil textures in Saemangeum reclaimed tidal land.

Soil Texture	Area	Ratio
	ha	%
Sand	2,126	40.8
Loamy sand	1,847	35.4
Sandy loam	1,028	19.8
Loam	109	2.1
Silt loam	43	0.8
Sandy clay loam	34	0.7
Silt	8	0.2
Clay loam	8	0.2

Table 3. Particle size distribution of soils in the different complex sites of Saemangeum reclaimed tidal land.

Complex site	Sand	Silt	Clay
	% -----		
Industrial & Research	75.1 c*	13.0 a	11.7 a
Tourism & Leisure	85.0 b	8.2 b	6.8 c
Agricultural Life	78.0 c	11.9 a	10.1 b
Rural City	87.3 ab	5.2 bc	7.5 c
Bioenergy Crop Production	89.4 a	4.3 c	6.3 c

*Numbers followed by the same letter within a column are not significantly different (Duncan test, $p < 0.05$).

타났다. 조사한 지역의 토성은 Table 2에 나타난 바와 같이 8가지가 분포하였다. 대체로 새만금 노출지 토성은 사질토양에 해당되며 전체 5,020 ha 중 사토 (Sand)가 2,051 ha로 조사지역의 40.8%를 차지하였고, 양질사토 (Loamy Sand)가 1,782 ha로 35.4%를 차지하였다.

노출지를 개발 용지별로 나누어 조사한 토양입자 분포비율을 Table 3에 나타냈다. 모래는 바이오에너지작물생산단지가 89.4%로 가장 많았고, 산업연구용지가 75.1%로 가장 낮은 수준을 보였다. 미사는 농생명용지와 산업연구용지가 11.9~13.0%로 가장 많았고, 바이오에너지작물생산단지가 4.3%로 가장 적었다. 점토는 산업연구용지가 11.7%로 가장 많았고, 관광레저용지, 농촌도시용지, 바이오에너지작물생산단지

6.3~7.5% 범위로 매우 낮은 수준을 보여, 이들 지역은 90% 이상이 사질토로 이루어졌음을 알 수 있다. 토양의 산화환원 상태는 토양통기성과 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 호기성 상태에서 산화환원전위차는 +400~+700 mV 범위이고, 담수상태는 -250~-300 mV 정도의 나타낸다 (Bohn, 1971). 지하수위가 높은 간척지 토양은 모세관상승에 의해 지표면으로 염류가 상승한다. 모세관상승은 토양입경이 작을수록 상승 높이가 증가한다. 따라서 점토함량이 높은 토양에서 지속적인 모세관 상승으로 염류가 상승하면 뿌리 근처에 집적되어 saline-sodic 토양으로 변하며, 토양 pH도 8 이상으로 증가하는 경향을 보인다 (Han et al., 2011). 이러한 토양은 제염을 실시한 후에도 다시 지하수위 상승 등으로 재염화현상이 발생할 수 있다. 새만금 토양은 투수계수가 121 cm day^{-1} 로 모래가 많아 정체수 발생 개연성이 낮은 데도 불구하고 여름 장마기에 지하수위 상승과 수분포화도가 높아짐에 따라 토양의 강우 수용능력이 10~24 mm 정도로 급격히 줄어들기 때문에 적은 강우량에도 정체수가 많이 발생하는 특성이 있다 (Sohn et al., 2010a).

노출지 토양의 화학적 특성 노출지 표토를 채취하여 1차 조사한 평균 화학성분포를 볼 때 농촌진흥청 (NIAS, 2010a)에서 제시한 밭 토양 적정범위에 속하는 성분은 나타나지 않았다 (Table 4). 토양 pH는 평균 7.8이었고, 분포범위는 5.2~9.9이었다. 대부분 오래된 간척지의 토양 pH는 7 이하이지만, 새만금과 같은 신 간척지는 pH 7 이상을 보인다. 이렇게 pH가 높은 토양을 담수하면 산화환원전위는 -200 mV 이하인 환원상태로 존재하여 요소와 같은 질소원을 공급하면 가용화율은 감소하고, 가수분해되어 암모니아와 이산화탄소가 만들어지면서 가스 등으로 손실되는 양이 많기 때문에 질소시비량을 증가시켜야 한다고 하였다 (Han et al., 2011). 따라서 새만금 간척지에 작물을 재배하기 위해서는 제염과 더불어 토양 pH를 낮추기 위한 관리도 병행해야 할 것이다.

전기전도도는 토양에 존재하는 수용성 이온의 총 농도를 간접적으로 측정하여 토양염류농도를 평가하는 지표이다. 보통 토양과 물의 비율을 1:1, 1:2, 1:5로 희석하여 측정하지만, 미국 USDA salinity lab (1954)에서는 포화반죽으로 추출한 토양용액의 전기전도도 값으로 토양염류도를 평가 기준으로 하고 있다. 물론 물 비율이 클수록 토양용액의 추출량이 많아 전기전도도 측정은 용이하나, 토양 중에서 식물 뿌리가 노출되어 있는 토양용액 상태와 차이가 있다 (Lee et al., 2010). 그러므로 농업에서는 토양염류가 작물생육과 밀접한 관련이 있으므로 실제 작물이 이용할 수 있는 수분조건에서 평가하는 것이 이상적인 방법이다 (Dyer et al., 2008). 따라서 포화반죽법으로 염류농도 (ECe)를 측정한 결과, 평균값은 11.3 dS m^{-1} 였고 분포범위는 0.06~90.8 dS

Table 4. Distribution of values for soil chemical properties in Saemangeum reclaimed tidal land (March, 2015).

Classification	pH	ECe	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cations			
					K	Ca	Mg	Na
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			
Ave.	7.8	11.3	2.1	24.6	0.8	2.8	2.7	7.0
Max	9.9	90.8	9.9	119.9	1.7	11.2	10.9	50.8
Min.	5.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
Med.	7.9	2.9	1.9	22.4	0.7	2.2	2.4	3.6
Optimal Range	6.0~7.0	2 >	20~30	300~500	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	-

Table 5. Soil chemical properties in different complexes of Saemangeum reclaimed tidal land (March, 2015).

Complex site	pH	ECe	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cations			
					K	Ca	Mg	Na
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			
Industrial & Research	8.1 a*	14.0 a	2.7 b	33.2 a	0.8 a	4.3 b	3.1 a	8.6 a
Tourism & Leisure	7.8 b	11.2 ab	1.6 d	21.3 c	0.8 a	1.7 d	2.7 b	6.6 bc
Agricultural Life	8.0 ab	12.8 a	3.2 a	27.5 b	0.8 a	5.1 a	3.4 a	7.6 ab
Rural City	7.0 c	8.8 b	2.0 c	16.0 d	0.6 b	1.4 e	1.6 c	5.1 c
Bioenergy Crop Production	7.8 b	7.9 b	1.9 c	23.7 c	0.6 b	3.3 c	2.5 b	6.6 bc

*Numbers followed by the same letter within a column are not significantly different (Duncan test, $p < 0.05$).

m⁻¹로 조사지점에 따라 염류농도 차이가 높게 나타났다. 조사대상지의 염류농도를 적용하여 농촌진흥청에서 제시하고 있는 기준에 따라 밭으로 활용할 수 있는 면적 (ECe 2.0 dS m⁻¹ 이하)은 2,016 ha (전체의 40.2%)이고, 논으로 활용할 수 있는 염분농도 0.3% 이하 (ECe 4.7 dS m⁻¹ 이하)는 2,484 ha (전체의 49.5%)로 나타났고, 논이나 밭으로 활용하기 위해서 염류농도를 낮춰야 할 대상은 2,536 ha (전체의 50.5%)로 나타났다.

토양유기물함량과 유효인산 함량은 밭 토양 적정범위의 10% 이하 수준을 보여 매우 척박한 상태였다. 작물을 재배하기 위해서는 적정 권장량 이상의 퇴비를 사용하여 양분용탈을 방지할 필요가 있다. 또한 인산은 농촌진흥청에서 제시하는 것처럼 전량 밑거름으로 사용하는 것보다 질소와 칼리처럼 분시하여 사용할 필요가 있다. 한편 Son and Cho (2009)는 간척지 토양의 물리성 및 토양구조 개선을 위해 유기물을 처리할 경우 신선한 유기물 처리가 바람직하며, 불가피할 경우 일반 유기질이나 부산물비료의 단독처리보다 신선한 유기물과 혼합 처리하는 것이 타당하다고 보고하였다. 교환성 K⁺과 Mg²⁺은 밭 토양 적정범위보다 높은 수준을 보였고, 교환성 Ca²⁺은 낮은 수준을 보여 양분불균형을 초래할 수 있는 조건이므로 작물 재배 전 토양양분을 고려한 시비가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

노출지를 개발 예정 용도에 따라 표토 화학성을 조사한 결과 Table 5에서 보는 바와 같이 용지별로 차이가 있었다. 토양 pH는 농촌도시용지를 제외하고 차이가 없었고, ECe는

관광레저용지, 농생명용지, 산업연구용지는 11.2~14.0 dS m⁻¹ 수준이었고, 농촌도시용지와 바이오에너지작물생산단지 7.9~8.8 dS m⁻¹로 다소 낮았지만, 작물재배를 위해서는 제염이 필요한 수준이었다. 유기물함량과 유효인산함량도 단지별로 차이가 있었지만, 차이를 논하기에 매우 낮은 수준이었다. 교환성 K⁺은 ECe의 경우와 같은 경향을 보였고, 교환성 Ca²⁺은 농업용지가 5.1 cmol_c kg⁻¹으로 가장 높았고, 농촌도시용지와 관광레저용지가 1.4~1.8 cmol_c kg⁻¹으로 가장 낮은 수준을 보였다. 교환성 Mg²⁺은 농생명용지가 가장 높았고, 농촌도시용지가 가장 낮았다.

자연 강우상태에서 노출지 토양 특성 변화를 조사하기 위해 1차 조사대상 지역에서 접근성이 떨어지는 농생명용지 80 ha, 산업연구용지 130 ha, 바이오에너지작물생산단지 282 ha를 제외한 4,528 ha를 대상으로 1차와 같은 방법으로 2015년 9월에 2차 토양 조사를 하였다. Table 6에서 보는 바와 같이 1차 조사 (Table 5)에 비해 전체적으로 크게 달라지는 않았지만, 대체로 유기물함량은 변화가 없었고, ECe, 교환성 K⁺은 약간 증가하였다. ECe 분포도 0.1~46.6 dS m⁻¹로 1차 조사 때보다 분포범위가 많이 좁혀졌는데, 여름철 강우량이 적어 토양 내 수분 이동이 적어 수용성 음이온들이 표면으로 상승하지 않은 것으로 판단된다. 현재 새만금 간척지에서 밭작물을 재배하면 수량성이 매우 낮다. Sohn et al. (2010b)은 새만금 간척지는 양질사토로 제염이 많이 진행된 곳은 양호한 생육상황을 보이지만, 일부는 염류농도가 16 dS m⁻¹ 이상으로 높아져 생육불량 정도가 심하

Table 6. Distribution of values for soil chemical properties in Saemangeum reclaimed tidal land (September, 2015).

Classification	pH	ECe	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cation			
					K	Ca	Mg	Na
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			
Ave.	7.3	19.3	22.0	21.4	1.1	1.8	3.0	8.7
Max.	9.8	46.6	11.1	101.4	4.9	10.2	23.9	68.4
Min.	5.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.4	0.1
Med.	7.3	5.9	2.0	19.2	0.9	1.5	1.3	3.8
Optimal Range	6.0~7.0	2 >	20~30	300~500	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	-

Table 7. Soil chemical properties in different complexes of Saemangeum reclaimed tidal land (September, 2015).

Complex site	pH	ECe	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cation			
					K	Ca	Mg	Na
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			
Industrial & Research	7.5 a	32.2 a	3.4 a	30.0 b	1.4 a	3.1 a	4.4 a	11.2 a
Tourism & Leisure	7.4 b	17.4 bc	1.8 bc	17.3 d	1.2 b	1.5 c	2.5 c	8.8 ab
Agricultural Life	7.4 ab	22.5 b	3.2 a	35.6 a	0.9 c	2.7 b	4.6 a	9.3 ab
Rural City	7.1 c	12.5 cd	2.1 b	19.3 d	0.5 e	1.3 c	3.2 b	6.7 bc
Bioenergy Crop Production	7.1 c	12.3 d	1.6 c	24.0 c	0.7 d	1.2 c	2.2 c	4.5 c
Optimal Range	6.0~7.0	2 >	20~30	300~500	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	-

고, 토양 전지성이 약하여 이랑침식으로 인한 뿌리노출로 고사피해가 나타나며, 투수력은 빠르지만 지하수 상승으로 토양의 강우수용능력이 감소되어 과습과 침수피해가 발생하고, 토양이 척박하고, 보비력이 낮아 세탈이 심하여 양분 장애가 심하게 나타난다고 하였다. 따라서 유기물시용과 비닐피복 등으로 침식을 감소시켜 이랑유지능력을 증가시키고 토양 치밀화를 완화시켜야 된다고 보고하였다.

노출지를 활용 용도별로 조사한 표토의 화학성은 Table 7과 같이 용지별로 차이가 있었다. 토양 pH는 산업연구용지, 관광레저용지, 농생명용지가 7.4~7.5로 같은 수준을 보였고, 농촌도시용지와 바이오에너지작물생산단지 7.1~7.2로 차이가 있었다. ECe는 산업연구용지 32.2 dS m⁻¹로 가장 높았고, 바이오에너지작물생산단지는 12.3 dS m⁻¹로 가장 낮은 수준을 보였다. 산업연구용지를 제외하고 1차 조사와 차이가 없었다. Lee et al. (2013)에 따르면 새만금간척지와 같은 신간척지에서 안정적인 청보리 생육을 유지하기 위해서 토양염류농도를 3.5 dS m⁻¹ 이하로 조절할 필요가 있다고 하였다. 간척지에서 밭작물을 재배하는 동안 토양염류농도 (ECe) 8.40 dS m⁻¹ 이하, SAR은 20.99 이하에서 양호한 생육을 보였지만, 작물에 따라 생육저해가 시작되는 염류농도 수준은 열무와 케일 1 dS m⁻¹ 미만, 썩갓 4 dS m⁻¹ 이상, 총각무, 양상추, 적상추는 6 dS m⁻¹ 이상이라고 하였다 (Lee et al., 2003).

Shon et al. (2009)은 새로운 간척지에서 동계 맥류사료 작물 재배시 출현개체수 감소 및 건물수량 감수를 막기 위

해서는 염류농도가 6 dS m⁻¹ 이하로 관리되어야 한다고 하였고, 재배한 작물의 가장 큰 초장 대비 50% 이상 생육저해를 나타내는 표토의 염류농도는 콩 5 dS m⁻¹, 옥수수 6 dS m⁻¹, 수단그라스, 피 및 세스바니아는 7 dS m⁻¹ 정도로 추정하였다. 한편 사탕무는 내염성이 강한 작물로 EC 12 dS m⁻¹에서 10% 정도의 수량 감소가 나타났다고 하였다 (Brady and Weil, 2002).

한편 유기물함량과 유효인산은 1차 조사와 같은 수준을 보였고, 교환성 K⁺은 농촌도시용지를 제외하고 1차와 같은 수준을 보였다. 교환성 Ca²⁺과 Mg²⁺은 1차와 비슷한 수준을 보였다.

Table 8에서 보는 바와 같이 2회에 걸쳐 토양을 조사하여 비교한 결과 pH 7.0 이하의 면적은 769 ha에서 1,593 ha로 약 21.6% 증가하였으며 밭작물을 재배할 수 있는 (ECe 2 dS/m 이하) 면적은 2,148 ha에서 1,673 ha로 약 5.8% 감소하였다. 교환성 K⁺, Ca²⁺는 밭토양 적정범위에 해당하는 면적은 각각 24.0%, 14.8% 감소하였으며, 교환성 Mg²⁺은 적정범위에 해당하는 토양의 면적은 거의 변화가 없었다.

미국 NRCS (Natural Resources Conservation Service)에서 제시한 염류토양 분류기준 (Horneck et al., 2007)에 따라 분류한 결과 새만금간척지 토양은 saline 토양 0.7~2.0%, sodic 토양 41.4~50.1%, saline-sodic 토양 16.4~31.8%로 나타났다 (Table 9). 9월 조사의 경우 3월 조사에 비해 saline 과 sodic 토양비율이 증가하였다. 일반적으로 간척초기에는 가용성 염류와 교환성 Na⁺이 과다하게 함유되어 있어 염분

Table 8. Changes of soil chemical properties in Saemangeum reclaimed tidal land studied.

Classification		March		September	
		Area	Ratio	Area	Ratio
		ha	%	ha	%
pH (1:5)	7.0 >	769	15.32	1,593	35.18
	7.1 <	4,251	84.68	2,935	64.82
ECe (dS m ⁻¹)	2.0 >	2,148	42.79	1,673	36.95
	2.1~4.7	581	11.57	561	12.39
	4.8 <	2,291	45.64	2,294	50.66
Exch. K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.0~0.4	248	4.94	492	10.78
	0.5~0.8	2,709	53.96	1,356	29.95
	0.9 <	2,063	41.40	2,680	59.19
Exch. Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.0~0.49	3,600	71.71	4,088	90.28
	5.0~6.0	829	16.51	77	1.70
	6.1 <	591	11.77	363	8.02
Exch. Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.0~1.4	1,092	21.75	1,112	24.56
	1.5~2.0	977	19.46	881	19.46
	2.1 <	2,951	58.78	2,535	55.98

Table 9. Results of different salt-affected soils in Saemangeum reclaimed tidal land, Korea.

Classification	March		September	
	Area	Ratio	Area	Ratio
	ha	%	ha	%
None	1,308	26.1	1,424	31.4
Saline	36	0.7	92	2.0
Sodic	2,079	41.4	2,270	50.2
Saline-sodic	1,597	31.8	742	16.4
Total	5,020	100.0	4,528	100.0

농도가 대단히 높다. 교환성 Na⁺은 토양의 알칼리성을 증가시키는 주된 원인으로 작물생육에 큰 저해요인이 되는 토양을 염해토양 (salt-affected soil)이라 한다 (Koo et al., 1998). 염류토양은 높은 염류농도로 초기에는 염생식물이 출현하고 시간이 경과하면서 탈염이 진행되어 우점종이 바뀌게 된다. 간척지에서 식생분포는 해안으로부터 거리에 따른 NaCl 함량 (Park, 1969) 또는 Cl⁻ 농도 (Kim, 1971) 차이 라고 볼 수 있다.

Saline 토양과 saline-sodic 토양 개량을 위해서는 우선 교환성 Na⁺과 가용성 염류의 수준을 낮추어야 한다. Exchangeable complex에서 Na⁺의 제거는 Ca²⁺이나 H⁺에 의한 치환으로 효과적으로 이루어질 수 있다. 이러한 치환제로 석고형태의 Ca²⁺를 공급하는 것이 실질적인 방법일 수 있다 (Brady and Weil, 2002). Baek et al. (2010)은 간척지 세사양토의 입단형성을 위해 이수석고 1,550 kg 10a⁻¹ 이하 사용을 권하였고, 평화양겨를 1,000 kg 10a⁻¹ 처리할 경우 무처리에 비해 토양입단화가 증가하였다고 보고하였다.

이상의 결과로부터 새만금 간척지에서 농작물 재배를 위

해서는 토양의 염도를 줄이는 제염방법과 재염화 방지, 수직배수 개선방안, 토양 비옥도를 증진할 수 있는 토양관리 방법의 적용기술이 필요하며, 간척지 제염을 위한 연구도 지속적으로 필요할 것으로 사료된다.

Conclusion

새만금 방조제 및 방수제 축조 등으로 노출된 토양의 침식을 방지하고, 비옥도를 개선하며, 토지이용 효율을 증진하기 위해 경관작물이나 사료작물 재배 후보지 선정에 필요한 토양 조사를 실시하였다. 조사대상은 농업생명용지 220 ha, 관광레저용지 2,450 ha, 산업연구용지 1,130 ha, 바이오에너지작물생산단지 820 ha, 농촌도시용지 400 ha 등 총 5,020 ha을 3월과 9월에 표토 (0~20 cm)를 조사하였다.

간척지 토양의 입자분포는 평균 모래 83.2%, 미사 8.6%, 점토 8.2%이고, 토성은 사토 40.8%, 양질사토 35.5%, 사양토 19.7%로 구성되어 있었다. 2015년 3월에 토양화학적 조사를 한 결과 일반 농경지 (밭) 적정범위에 초과한 성분은

pH, E_{Ce}, 교환성 K⁺, Mg²⁺이었고, 적정범위보다 낮은 성분은 유기물 함량, 유효인산, 교환성 Ca²⁺이었다. 2015년 9월에 조사한 토양 화학성분 가운데 pH, E_{Ce}, 교환성 K⁺이 적정범위보다 초과하였고, 유기물 함량, 유효인산, 교환성 Ca²⁺이 적정범위보다 낮았다. 염류토양 분류기준에 따르면 Sodic 토양 41.4~50.0%, Saline-sodic 토양이 16.4~31.8%로 나타났다. 2차 조사한 토양 pH는 7.0 이상의 비율이 1차 조사 15.3%에서 35.2%로 증가하였고, E_{Ce}의 경우 제염이 필요한 4.8 dS m⁻¹ 이상 비율이 45.6%에서 50.7%로 증가하였으며, 2 dS m⁻¹ 이하 비율은 42.8%에서 36.9%로 감소하였다. 교환성 K⁺과 Ca²⁺은 1차 조사결과보다 적정범위 비율이 감소하였고, 교환성 Mg²⁺의 적정범위 비율은 변화가 없었다.

References

- Baek, S.H., J.Y. Kim, S.U. Lee, and S.J. Kim. 2010. Influence of continuous application of gypsum, popped rice hull, and zeolite on soil aggregation of reclaimed sandy loam soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):642-647.
- Bohn, H.L. 1971. Redox potentials. *Soil Sci.* 112:39-45.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2002. *The nature and properties of soils.* Prentice Hall, New Jersey.
- Dyer, C., P. Kopittke, A. Sheldon, and N. Menzies. 2008. Influence of soil moisture content on soil solution composition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:355
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. In *Methods of soil analysis, Part In A.* Klute(2nd Ed.). pp. 383-411. American Society of Agronomy, Madison, USA.
- Han, S., H.J. Kim, J.A. Song, and D.Y. Chung. 2011. Fate of nitrogen influenced by circumstances of a reclaimed tidal soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):745-751.
- Hopkins, W.G. and N.P.A. Huner. 2004. *Introduction to plant physiology.* 3rd ed. John & Sons, Inc.
- Horneck, D.A., J.W. Ellsworth, B.G. Hopkins, D.M. Aullivan, and R.G. Stevens. 2007. *Managing salt-affected soils for crop production.* A Pacific Northwest Extension publication. 601-E, November.
- Jung, Y.S. and C.H. Yoo. 2007. Soil problems and agricultural water management of the reclaimed land in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:330-348.
- Jung, Y.S., J.H. Joo, S.C. Kwon, J.N. Im, M.H. Shin, and K.W. Choi. 2004. Wind erodibility of the Saemangeum tideland reclamation project area. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:207-211.
- Kim, C.S. 1971. An ecological study on the process of plant community formation in tidal land. *Korean J. Botany.* 14(4):27-33.
- Kim, H.W. 2012. *Analysis of soil characteristics of farming sites in Saemangeum reclaimed Land.* Master's Thesis, Chonbuk National University, Korea.
- Koo, J.W., J.K. Choi, and J.G. Son. 1998. Soil properties of reclaimed tidal lands and tidelands of western sea coast in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(2):120-127.
- Lee, S.B., K.M. Cho, P. Shin, C.H. Yang, N.H. Back, K.B. Lee, S.H. Baek, and D.Y. Chung. 2013. Effect of soil salinity on growth, yield and nutrients of whole crop barley in newly reclaimed land. *Korean J. Environ. Agri.* 32(4):332-337.
- 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, Y.J., J.S. Lee, and J.E. Yang. 2010. The comparison of electrical conductivity for soil solutions extracted in field capacity and saturation-paste. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):776-781.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science). 2010a. *Fertilization standard of crop plants.* NAAS, Rural Development Administration, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science). 2010b. *Method of soil and plant analysis.* NIAS, Rural Development Administration, Korea.
- Park, I.K. 1969. *A study of continuum of the salt plant communities in the Juan coastal area.* Graduate School of Education, Seoul National University, Master thesis.
- Ryu, J.H., D.Y. Chung, S.W. Hwang, K.D. Lee, S.B. Lee, W.Y. Choi, S.K. Ha, and S.J. Kim. 2010. Patterns of leaching and distribution of cations in reclaimed soil according to gypsum incorporation rate. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):474-479.
- Sohn, Y.M., G.Y. Jeon, J.D. Song, J.H. Lee, and M.E. Park. 2009. Effect of soil salinity variation on the growth of barley, rye and oat seeded at the newly reclaimed tidal lands in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42:415-422.
- Sohn, Y.M., G.Y. Jeon, J.D. Song, J.H. Lee, D.H. Kim, and M.E. Park. 2010.a 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.*
- Sohn, Y.M., J.D. Song, G.Y. Jeon, D.H. Kim, and M.E. Park. 2010.b Effect of soil salinity and culturing conditions on the maintenance of ridge and the growth of upland crops in the Saemangeum reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):407-417.
- Son, J.G. and J.Y. Cho. 2009. Effect of organic material treatments on soil aggregate formation in reclaimed tidelands. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(3):201-206.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* USDA Agric. Handb. 60. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Yang, C.H., T.K. Kim, J.H. Ryu, S.B. Lee, S. Kim, N.H. Baek, W.Y. Choi, D.Y. Chung, and S.J. Kim. 2010. Effects of rice straw incorporation by cutting methods on soil properties and rice yield in a paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:1047-1050.