

최 중
연구보고서

환경 보전형 정밀 농업을 위한 전자장 이용
비파괴 신속 염 분포도 작성 이용법 및
염류토 관리 지침서 개발

Development of Rapid Mapping of Soil Salinity
by Non-Destructive Electromagnetic Inductance
and Soil Management Technology in the
Reclaimed Lands

연구기관
강원대학교 농업생명과학대학

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “환경 보전형 정밀 농업을 위한 전자장 이용 비파괴 신속 염 분포도
작성 이용법 및 염류토 관리 지침서 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002 년 11월 18 일

주관연구기관명 : 강원대학교

총괄연구책임자 : 정 영 상

세부연구책임자 : 정 영 상

연 구 원 : 임 형 식

연 구 원 : 윤 세 영

연 구 원 : 주 진 호

연 구 원 : 박 철 수

연 구 원 : 김 은 규

연 구 원 : 신 중 두

요 약 문

I. 제 목

환경 보전형 정밀 농업을 위한 전자장 이용 비파괴 신속 염 분포도 작성 이용법 및 염류도 관리 지침서 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

환경 보전형 정밀 농업은 환경에 건전하며, 환경에 친화하며, 농촌경제에 활력을 불어 넣어줄 수 있는 농업을 위하여 정확한 장소에, 정확한 시간에, 정확한 방법을 투입할 수 있는 기술 체계를 수립하여 농업을 시행하는 것이다. 이를 위하여 무엇보다도 중요한 것은 관리 대상 경작지에 대한 정밀한 자료이다. 이 자료에는 토양, 기상, 생물, 농업 인구 기술 지표 등 농업에 필요한 모든 자료를 포함한다. 특히 토양과 지리 정보는 정밀 농업에 있어서 핵심적 부분이다. 토양과 지리 정보의 필요성은 토지가 광역일 경우 그 중요성이 강조된다.

그러한 예가 넓은 면적의 간척지이다. 과다한 염이 존재하는 간척지는 토양 관리가 대단히 어려운 조건에 있다. 농업분야에서 우리 나라의 간척지에 대한 연구는 그 동안 많이 이루어져 왔으나, 토양의 염류도 조사 방법이 토양 시료 채취에 의한 분석에 의존되어 왔다. 간척지와 같이 대규모 면적에서 토양 시료 채취 방법은 시간이 많이 걸리며, 어렵다. 대규모 면적에서 현장에서 직접 빠르게 염류도를 파악할 수 있으면, 토양 관리 계획에 유용한 자료로 활용할 수 있다. 그러한 방법 중 하나가 비파괴 전자장 유도법이다. 그러나, 우리 나라에서 아직 이에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 못하였고, 또한, 토양 관리 기술 지침역시 정리되어 있지 못하다. 최근에는 간척지에서 벼 재배 뿐 아니라, 고도 이용을 위한 발작물의 재배와 경관 조성을 위한 조경 식물의 식재 및 자연 식생 이용에 까지 많은 관심이 모아지고 있다. 그러나, 발작물 재배는 벼 재배에 비하여 어렵고, 토양 관리가 까다롭다. 그 이유는 토양의 염류도가 불균일하므로, 넓은 면적에서 그 공간적인 분포를 상세히 파악하지 못하기 때문이다.

본 연구의 목적은 염류도가 높은 넓은 면적의 간척지에서 염류도의 수평적, 수직적 공

간 분포를 신속 정확하게 파악할 수 있는 비파괴 전자장 유도법을 이용한 염지도 작성법을 개발하고, 염류토의 관리 지침서를 개발하는 데 있다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

1. 전자장 유도장치를 이용한 비파괴 염류도 측정 방법 확립
 - (1) 전자장 유도측정법에 의한 염류도 측정
염해지(대호간척지, 김포매립지) 토양에서의 EM38 수평, 수직 mode 측정
 - (2) EM_v, EM_h 값의 다중회귀관계식을 이용한 E_{Ce} 산정 방법
가. EM38 높이별 측정치(EM_v, EM_h)의 수직·수평적 E_{Ce} 산정 방법
나. EM38 높이별 측정치(EM_v, EM_h)의 토양 깊이별 E_{Ce} 산정 방법
다. 염류도 실측치와 EM_v와 EM_h 값의 다중회귀관계식에 따른 예측치의 비교
라. EM_v와 EM_h 값의 다중회귀관계식에 따른 E_{Ce} 분포도 작성 방법
2. 전자장 유도장치를 이용한 주요 간척지 염류도 측정
 - (1) 연구대상지의 토양 이화학적 특성조사
 - (2) 주요 간척지 염류도 측정
염류도 실측치와 EM_v, EM_h 값의 회귀관계식 도출
3. 전자장 유도장치에 의한 주요 간척지 염류도 공간변이성 해석
 - (1) 염류도의 공간변이성 해석을 위한 공간통계학 적용
 - (2) 주요 간척지 염류도의 공간변이성 해석
4. 주요 간척지 염지도 작성
 - (1) DGPS를 이용한 주요 간척지의 위치자료수집
 - (2) Kriging기법을 이용하는 Surfer를 통한 염지도 작성
5. 간척지의 식생 유형과 토양 염도 조사

6. 염류토 토양 관리 지침서 개발 및 이용

- (1) 염류토 토양 관리 기술 자료 data base 구축
토양 관리 기술 자료 data base 수집
- (2) 염류토 토양 관리 지침서 개발 및 발간

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구결과

(1) 전자장 유도장치를 이용한 주요 간척지 염류도 측정

대호 간척지와 김포 매립지에서 전자장 유도장치(EM38)에 의한 염류도 측정방법의 확립을 위해 EM38측정지점 높이와 수평mode EMh와 수직mode EMv 값의 다중회귀관계식을 이용한 E_{Ce} 실측치와의 관계를 분석하였으며, 대단위 간척지 8개소(해남, 학파, 유당, 태원, 계화, 대호, 석문, 김포)를 대상으로 전자장 유도장치(EM38)에 의해 측정된 EM_v, EM_h값의 다중회귀식을 이용하여 E_{Ce}값을 산정하였다.

(2) 전자장 유도장치에 의한 주요 간척지 염류도 공간변이성 해석

대호 간척지에서 EM38측정값을 공간통계학(variogram model)에 적용하여 그 지역에서 염의 공간변이를 효과적으로 나타내주고 있음을 확인하였으며, 대단위 간척지 8개소(해남, 남해, 유당, 태원, 계화, 대호, 석문, 김포)에서 염류도의 공간변이성 해석을 통하여 variogram model의 선정과 전자장 유도장치(EM38)의 유효측정거리를 산출하였다.

(3) 주요 간척지 염지도 작성

염류도의 공간적 분포를 GPS(Ground positioning system)에 의한 측정지점 위치 자료의 수집과 kriging기법을 이용한 염지도를 작성하여 현장의 염의 상태를 지역별로 쉽게 파악할 수 있었다.

(4) 식생 유형과 토양 염도

간척지의 토양 환경 변화에 따른 식생 분포 양상을 조사한 결과 간척지에 나타나는 식생들은 일정한 분포 유형을 갖고 있음을 알 수 있었고, 이러한 분포 유형은 토양 염도에 의존하는 것을 확인 할 수 있었다.

(5) 염해지 토양 관리 지침서 개발 및 이용

염해지 토양의 염류 문제를 정확히 파악하여 토양염류문제에 대한 정밀한 자료를 얻을 수 있는 기술과 토양 관리에 대한 기술지침서이다.

2. 활용계획

(1) 비파괴 전자장 유도장치 (EM38)에 의한 간척지 염 분포 조사

- 연구 결과는 국내외 학술 연구 논문으로 투고될 것임.
- 작성된 염분포도를 활용하여 간척지 토양 관리를 보다 정확하고 효율적으로 할 수 있음.
- 새만금 간척지와 같이 개발 중에 있는 대단위 면적 간척지에서 염 분포의 공간적 특성을 정확히 파악하여, 제염 및 영농 관리 대책 수립 적용에 활용
- 수직적, 수평적 염분포도를 작성하여 가뭄에 의해 염의 상승으로 피해를 볼 수 있는 지역과 우선 관개 용수 공급 지역을 설정하는 데 유용하게 활용할 수 있음.

(2) 염류토 관리 지침서는 간척지 등 염해지 토양에서 환경 보전형 정밀 농업을 수행하는 데 있어 기초 기술자료로 활용될 수 있으며, 농업 관련 기관에 배포되고, 간척지 관련 영농인에게 공개되어 영농에 직접 활용토록 할 예정이다.

SUMMARY

I . Subject

Development of Rapid Mapping of Soil Salinity by Non-Destructive Electromagnetic Inductance and Soil Management Technology in the Reclaimed Lands

II. Objectives and Importance of the Study

Precision farming is the way to practice farming by establishing technology for right place, right time, and right method. First priority to accomplish this needs a precise information on soil properties, weather, vegetation and agricultural indices. Especially, detailed data of soil properties and geological information of the lands are major components for practicing precision farming. These informations have become more important for larger farming land areas such as reclaimed tidal land.

The main constraints for crop production in the reclaimed tidal lands are soil salinity. Many researches have been conducted to develop techniques for land preparation and improve soil characteristics for crop cultivation. Soil salinity has been depended upon soil samples and laboratory analysis which are laborous and time consuming. Use of electromagnetic inductance is a non destructive technology for soil salinity. But, little researches have been conducted for mapping of soil salinity in the reclaimed tidal lands in Korea. And guideline for soil management techniques in reclaimed tidal land is not well established. Recently, much interest are focused in soil management practices for upland crops as well as gardening plants, but upland farming in reclaimed tidal area is typically much more difficult than paddy farming, thus needs more cares for soil management, due to spatial variability of soil salinity across reclaimed tidal land.

The objectives of this research are to investigate rapid mapping of soil salinity by a non destructive electromagnetic inductance and to develop guidebooks for soil management technology in the reclaimed tidal lands in Korea.

III. Contents and Scopes of the Study

1. Establishment of measurement of soil salinity by non-destructive electromagnetic inductance

- (1) Measurement of soil salinity by using the electromagnetic inductance technique in Daeho and Kimpo reclaimed land
- (2) Prediction of E_{Ce} by using multiple regression equations between EM_v and EM_h
- (3) Physical and chemical properties of soils in reclaimed land
- (4) Estimation of regression equations between EM_v, EM_h and E_{Ce}

2. Analysis of spatial variability of soil salinity by using the electromagnetic inductance technique in the surveyed reclaimed land

- (1) Application of geostatistics for analysis of spatial variability
- (2) Analysis of spatial variability in the surveyed reclaimed land

3. Mapping of soil salinity in the surveyed reclaimed land

- (1) Collection of position data by DGPS
- (2) Mapping of soil salinity by SURFER program with a kriging technique

4. Natural vegetation patterns and soil salinity

5. Development of soil management guidebook for reclaimed tidal land

- (1) Establishment of data base for soil management in salt-affected soil
- (2) Development of soil management, and publication guidebook for reclaimed land

IV. Results and Recommendations

1. Results

- (1) Measurement of soil salinity by using the electromagnetic inductance technique in the surveyed reclaimed land

The E_{Ce}, the electrical conductivity of the saturated extract of the soil samples taken through the soil profile down to 80cm depth, and the ground conductivity, EM_v and EM_h, vertical and horizontal mode, respectively, by EM38 were measured. The relationship between E_{Ce} and EM_v, EM_h showed positive correlation with high significance. Multiple regression equations between the E_{Ce} as dependent variable and EM_v and EM_h as independent variables showed highly significant correlation than a single regression in the surveyed reclaimed land. Electromagnetic inductance technique after careful calibration of salinity through the soil profile might be effective for mapping of salinity status in the reclaimed land.

- (2) Analysis of spatial variability of soil salinity by using the electromagnetic inductance technique in the surveyed reclaimed land

Geostatistical analysis was carried out to examine within surveyed reclaimed land spatial variability using semivariograms and it was employed to quantify the spatial continuity of EM38 to determine values appropriate distance for mapping of salinity distribution with a kriging technique.

- (3) Mapping of soil salinity in the surveyed reclaimed land

The map of soil salinity by collection of position data with DGPS and kriging described field salinity state so well.

(4) Vegetation appearance type and soil salinity

Natural vegetation patterns of the reclaimed tidal land were surveyed. The plant distribution pattern was depended upon soil salinity.

(5) Development and use of a salinity management guidebook covered detailed information about a soil salinity problem

2. Recommendations

(1) Use of electromagnetic inductance technology for salinity measurement is rapid and effective tool for salinity monitoring in the large area. The map of salinity distribution might be useful for rational soil and water management for better crop production in the reclaimed land.

(2) The salinity map may be useful to develop reclamation project and effective utilization tideland such as the Saemangeum reclamation project.

(3) Soil salinity management guidebook might be useful for practicing suggest environment friendly farming in reclaimed land.

CONTENTS

Chapter 1. General Description	13
Section 1. Necessity of the study	13
Section 2. Purpose and scopes of the study	19
Section 3. Implementation strategies	21
Section 4. Recommendations	22
Section 5. Research period and team	25
Chapter 2. Establishment of measurement of soil salinity by non-destructive electromagnetic inductance	26
Section 1. Introduction	26
Section 2. Materials and methods	29
Section 3. Measurement of soil salinity by using the electromagnetic inductance technique	35
Section 4. Estimation of regression equations between EM _v , EM _h and EC _e	39
Section 5. Classification of eluvial and illuvial horizon by EM38 value	61
Section 6. Comparison of EC _e and EC(1:5)	62
Chapter 3. Measurement of soil salinity by using the electromagnetic inductance technique in the surveyed reclaimed land	66
Section 1. Introduction	66
Section 2. Materials and methods	68
Section 3. Physical and chemical properties of reclaimed land soils	70
Section 4. Measurement of soil salinity by EM38 in the surveyed reclaimed land	79
Chapter 4. Analysis of spatial variability of soil salinity by using EM38 in the surveyed reclaimed land	89

Section 1. Introduction	89
Section 2. Materials and methods	94
Section 3. Application of geostatistics for analysis of spatial variability	95
Section 4. Analysis of spatial variability in the surveyed reclaimed land	101
Chapter 5. Mapping of soil salinity in the surveyed reclaimed land	108
Section 1. Introduction	108
Section 2. Materials and methods	109
Section 3. Mapping of soil salinity in the surveyed reclaimed land	110
Chapter 6. Natural vegetation patterns and soil salinity	126
Section 1. Introduction	126
Section 2. Materials and methods	126
Section 3. Results and discussion	127
Chapter 7. Development and use of a salinity management guide	146
Section 1. Introduction	146
Section 2. Soil properties in reclaimed tidal land	148
Section 3. soil salinity and sodicity	156
Section 4. Irrigation water quality and salinity	170
Section 5. Desalinization and leaching requirement	178
Section 6. Salinity Salinization by ground water table rise	192
Section 7. Salt tolerance of crops depending on salinity and cultivation management	201
References	217

목 차

제1장 총론	13
제1절 연구개발의 필요성	13
제2절 연구개발의 목표 및 내용	19
제3절 추진전략	21
제4절 기대효과 및 활용방안	22
제5절 연구기간 및 연구진의 구성	25
제2장 전자장 유도장치를 이용한 비파괴 염류도 측정방법 확립	26
제1절 서론	26
제2절 연구 수행 방법	29
제3절 전자장 유도 측정법(EM38)에 의한 염류도 측정	35
제4절 EM _v 와 EM _h 값의 다중회귀 관계식을 이용한 EC _e 산정	39
제5절 EM38측정치에 의한 용탈층 집적층의 구분	61
제6절 포화 침출액(EC _e)와 토양용액의 EC(1:5)와의 비교	62
제3장 전자장 유도 장치를 이용한 주요 간척지의 염류도 측정	66
제1절 서론	66
제2절 연구 수행 방법	68
제3절 간척지 토양의 이화학적 특성	70
제4절 전자장 유도 장치를 이용한 주요 간척지 토양의 염류도 측정	79
제4장 전자장 유도장치(EM38)에 의한 주요 간척지 염류도 공간변이성 해석 ..	89
제1절 서론	89
제2절 연구 수행 방법	94
제3절 염류도의 공간변이성 해석을 위한 공간통계학의 적용	95
제4절 주요 간척지 염류도의 공간변이성 해석	101

제5장 주요 간척지 염지도 작성	108
제1절 서론	108
제2절 연구 수행 방법	109
제3절 주요 간척지 염지도 작성	110
제6장 식생발생 유형과 토양 염도	126
제1절 서론	126
제2절 연구 수행 방법	126
제3절 결과 및 고찰	127
제7장 염류 토양과 관개수의 관리 지침서 개발	146
제1절 서론	146
제2절 우리 나라 간척지 토양의 특성	148
제3절 토양의 염류도와 나트륨 염성	156
제4절 관개수의 염류도와 수질	170
제5절 제염과 용탈요구량	178
제6절 지하수 상승에 따른 염류화	192
제7절 염류도에 대한 작물의 내염성과 재배관리	201
참고 문헌	217

제 1 장 총 론

제 1절 연구개발의 필요성

1. 연구개발의 필요성

환경보전형 정밀 농업은 환경에 건전하며 (ENVIRONMENTALLY SOUND), 환경에 친화하며 (ENVIRONMENTALLY FRIENDLY), 농촌경제에 활력을 불어 넣어 줄 수 있는 (ECONOMICALLY VIABLE) 농업을 위하여 정확한 장소에 (RIGHT PLACE), 정확한 시간에 (RIGHT TIME), 정확한 방법을 (RIGHT WAY)을 투입할 수 있는 기술 체계를 수립하여 농업을 시행하는 것이다. 이를 위하여 무엇보다도 중요한 것은 관리 대상 경작지에 대한 정밀한 자료이다. 이 자료에는 토양, 기상, 생물, 농업 인구 기술 지표 등 농업에 필요한 모든 자료를 포함한다. 특히 토양과 지리 정보는 정밀 농업에 있어서 핵심의 부분이다.

토양과 지리 정보의 필요성은 토지가 광역일 경우 그 중요성이 강조된다. 그러한 예가 넓은 면적의 염해지이다. 우리나라 농경지에서 과도한 염의 존재에 의한 염해는 그 원인으로 보아 토양 자체의 염이 많은 경우와 과잉으로 시용된 염의 집적에 의해 생기는 경우가 있다. 이들은 어느 경우든 토양 관리가 대단히 어려운 조건에 있다. 과도한 염의 존재로 형성된 경우는 간척지의 토양으로 대표되며, 시용된 염의 집적에 의한 경우는 비닐하우스 등과 같은 시설 원예지의 일부 특수 농업지에서 과도한 비료의 투입에 의해 토양에 집적되는 경우이다.

농업분야에서 우리나라의 염해지에 대한 연구는 그 동안 많이 이루어져 왔으나, 염해지의 토양 관리 기술 지침이 체계적으로 정리되어 있지 못하며, 단편적인 연구 결과의 보고들이 산적해 있을 뿐이다.

염류도가 높은 토양에서의 벼 재배는 정상적인 일반 논에서의 벼 재배에는 미치지 못하지만, 담수가 충분한 경우 성공적으로 이루어 질 수 있다. 논으로 사용되고 있는 곳에서도 벼 재배 후 호밀 등 겨울 작물의 재배가 일부 이루어지기 시작하고 있으며, 농림부에서는 환경 농업의 일환인 푸른들 가꾸기의 주요 사업의 하나로 권장하고 있다. 최근에는 이러한 토양에서 밭작물의 재배와 경관 조성을 위한 조경식물의 식재에 많은 관심이 모아지고 있다. 그러나, 밭작물 재배는 벼 재배에 비하여

어렵고, 토양 관리가 까다롭다. 여름에 벼를 성공적으로 재배하던 논에서도, 후작으로 겨울 작물을 재배하고자 하면, 토양의 염류도를 조사하여 이에 맞추어 파종하여도 발아에 실패하는 경우가 많다. 또한 임해 매립지에서 조경을 위하여 식재한 나무도 산토 등으로 마운딩을 조성하여 식재한 경우 조차도 피해가 나는 사례가 많다. 그 이유는 토양의 염류도가 불균일하므로, 넓은 면적에서 그 공간적인 분포를 상세히 파악하지 못하기 때문이다. 따라서, 염류도가 높은 간척지 등에서 성공적인 발작물 재배와 푸른 들 가꾸기를 위해서는 넓은 면적의 염류도를 정밀하게 파악해야 하며, 이에 알맞는 재배 방법과 토양 개량 방법을 강구해야 한다.

가. 기술적 측면

염류 문제가 작물의 생육에 가장 큰 제한 요인이 되는 간척지나 임해 매립지는 특성상 일반 농경지와 달리 면적이 넓고 지형적 조건에 따라서 지하수위의 높이가 다르고 염도의 상태가 다르며 염도는 시기적으로 변한다. 이러한 넓은 면적의 염도를 파악하는데 있어 토양의 시료를 채취하여 분석하는 것은 어렵다. 따라서 비파괴적으로 개략적인 정보를 얻어내는 것이 보다 효율적일 수 있다.

현재까지 이용되고 있는 토양 염도 조사 방법은 토양 시료를 채취하여 분석하거나, 현장에서 염도계인 EC-meter를 이용하는 방법이다. 분석방법은 토양 시료를 채취하여 풍긴 후 증류수로 포화시켜 침출한 포화 추출액에 대한 전기전도도를 EC-meter로 측정하는 것이 표준이다. 포화 침출액법이 힘들므로, 토양:증류수를 1:1 또는 1:5로하여 측정하는 방법도 사용되고 있다. 토양 시료 채취법은 시료 채취에 많은 노력과 시간이 걸릴 뿐 아니라, 채취된 시료의 분석에도 많은 시간과 경비가 소요된다. 현장에서 직접 염농도를 측정할 수 있는 방법으로는 논물이나 관개수의 경우 EC-meter를 직접 사용할 수 있다. 현장에서 토양의 염도측정은 토양염도계가 사용될 수 있는 데, 이는 4-way probe로 이루어진 탐침을 토양에 삽입하여 깊이별 염농도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 비교적 간편하며, 현장에서 직접 조사할 수 있는 장점이 있으나, 심토가 굳어져 단단하거나, 돌, 자갈 또는 조개껍질 등이 있을 때에는 토양 염도계의 삽입이 어려운 단점이 있다. 현장에서 직접 조사할 수 있는 또 다른 방법으로 비파괴적인 방법으로 전자장 유도법이다.

전자장 유도법 (Electromagnetic inductance;EMI)은 지중 탐사 레이더 (Ground-penetrating radar; GPR)법과 함께 토양의 특성을 알아낼 수 있는 지구물리학적 기

법을 이용한 최신 기술이다 (Lucius, 1990). GPR은 토양에 짧은 시간 동안에 넓은 주파수대의 파동을 연속적으로 내보내며, 10에서 1000MHz로 비교적 짧은 주기의 파장이 이용되며, EMI법은 10-20MHz의 단일 주파수에 의해 형성된 자장의 유도 전류를 감지하여 토층에서의 전도도 (ground conductivity) 또는 자장감응도 (ground susceptibility)를 측정하는 방법이다. 이 방법은 지면 위에서 비파괴적으로 측정하므로 매우 신속하며, 넓은 면적을 대상으로 조사하기에 알맞다. 특히, GPS (Global positioning system)에 의한 측정지점 위치 자료와 함께 조사하여 GIS(Geological Information System)를 응용하면 한 지역에서의 염의 분포와 변이를 정확히 파악해 낼 수 있는 이점이 있으며, 그 적용성이 커진다.

따라서 전자장 유도법에 의한 염지도 작성법의 개발은 염류토의 토양 특성 자료를 정보화하여 환경 보전형 정밀 농업을 수행하는 데 있어 매우 유용한 자료로 이용될 수 있어 그 개발의 필요성이 크며, 첨단기술을 농업 이용에 접목시킬 수 있는 계기가 될 수 있다.

나. 경제·산업적 측면

이제까지의 토양의 염농도 측정 방법은 대부분 현지에서 토양을 깊이별로 토양 시료를 채취하여 실험실로 운반한 다음 풍건·조제하여 분석하는 방법에 의존해 왔다. 이러한 기존의 분석 방법은 토양 시료 채취와 분석에 시간과 경비가 많이 든다. 따라서 넓은 면적에서 많은 시료를 채취할 수 없으므로 시료 채취 및 분석 결과의 해석에 문제점이 많고, 넓은 면적에서의 염류의 상태를 제대로 파악하기 어렵다. 한 지역에서도 그 변이성이 큰 관계로 토양 및 작물 관리에 어려움이 많다. 그러나, 전자장을 이용한 비파괴 토양 전기전도도 측정 방법과 GPS/GIS를 응용한 염지도 작성법은 넓은 면적에서의 염분포를 쉽고 경제적으로 작성하여 정밀농업에 이용할 수 있으므로, 그 경제적 효과는 클 것이다.

다. 사회·문화적 측면

전자장을 이용한 염류도 조사 결과를 염지도를 작성하고, 그 이용법을 확립하면 간척지와 같이 염류 문제가 영농에 제한 요인이 되는 곳에서 토양의 친환경적인 이용이 가능하며, 지역 사회의 발전을 앞당길 수 있다. 이를 통하여 첨단 과학 기술을 농업 기술에 접목시킴으로써 농업 문화의 발전도 이바지 할 수 있게 된다.

2. 국내·외 관련기술의 현황과 문제점

가. 국외 관련기술 현황

염해지 토양의 특성을 파악하여 농업과 그 밖의 식생을 위한 토양 관리법에 대한 연구는 1897년 Whitney등에 의하여 토양의 염농도를 전기전도도로 측정할 수 있게 되면서부터이며, 체계적인 간척지 토양의 개량에 대한 연구는 1940년대에 들어서 염류토와 알칼리토에 대한 진단과 개량 방법이 제시되면서부터이다 (USDA salinity Staff, 1956). 최근에 Tanji(1990)는 “Agricultural Salinity Assessment and Management”에서 농업에서 발생하는 염류 문제와 관리 기술에 대하여 상술하였다.

염해지의 토양 관리에 있어서 가장 중요한 것은 토양의 염도를 정확히 파악하는 일이다. 토양의 염류도를 평가하는 방법으로 가장 고전적인 방법이 토양 시료에 대한 염농도 측정이다.

토양 염류도를 비파괴적으로 직접 측정할 수 있는 방법은 다음과 같은 방법이 있다. 즉, 다공질 전기전도 센서를 묻는 방법, 4-probe 전극법, 전자기 유도 센서법, time-domain electrode system법 등이다. 이들 방법은 개개 이온의 농도를 측정하는 것이 아니라 전 용질 농도를 측정하는 것이다. 첫 단계로 넓은 면적의 염에 대한 개략적인 정보를 얻거나 시간에 따른 전체 용질 농도의 변화를 감시하고자 할 때, 이들 방법은 전통적인 방법에 비하여 노동력이 덜 들고 빠르다. 이들 방법은 자세한 시료 채취 장소와 지점 수를 결정하는 데에도 아주 유용하다. 특정 이온의 구성비와 농도를 정확히 알아 내기 위해서는 자세한 토양 조사가 이루어져야 한다.

전기전도도 센서는 고온 세라믹 또는 유리로 보호되어 있는 두개의 작은 내부식성 전극쌍으로 만들어져 있다. 전극은 계속적으로 기록될 수 있는 모니터에 연결될 수 있고, 수동적으로 조작 될 수 있다. 신형 센서는 온도 센서가 달려 있어 온도 차이에 대한 보정을 할 수 있도록 되어 있다. 세라믹의 모세관력이 세라믹 내로 토양 용액을 빨아올리게 되어 있다. 센서는 묻힌 장소 부근의 비교적 적은 용적의 토양에 대한 염농도를 감지해 준다. 센서에 대한 주기적인 보정이 필요하다. 센서의 반응은 토양이 건조할수록 많은 시간이 걸린다. 그 이유는 센서 내부로 확산하는 데 걸리는 시간 때문이다(Wood, 1978).

4쌍 전극법은 미리 정해진 간격으로 일렬로 배치된 4개의 probe 또는 전극으로 구성되어 있다. 일정하며 변환될 수 있는 전류가 외측 전극간에 흐르게 되어 있고,

내측 전극간의 전압차를 측정하도록 되어 있다. 이 측정방법은 여러 가지 전극 배열로 검토되었는데, 그 중 하나가 표토에 4개의 전극막대를 삽입하는 방법 (Rhodes와 Ingvalson, 1971), 플라스틱 막대 표면에 4개의 전극 링을 부처 토양의 auger hole에 삽입할 수 있도록 하는 방법, 비교적 값이싼 4쌍 전극을 포장에 설치하여 영구적으로 토양의 염류도 변화를 감시하는 방법, 실험실과 라이시미터 측정용 등 (Gupta와 Hanks, 1972)이다. 건조하거나 자갈이 있는 토양에서는 전극의 균일한 접촉이 문제될 때가 있다.

Time domain reflectometry(TDR)가 용적 토양 수분 함량과 겉보기 토양 전기전도도를 동시에 측정할 수 있도록 개발되었다. TDR은 이 두 요소를 주어진 시간에 주어진 용적에 대한 측정이 가능하도록 되어 있다. 이 장치에서 토양의 비유전항수는 토양수분에 비례하며, 토양의 전기전도도와 비례하여 전기 전도선을 따라서 일어나는 전압차 확산이 일어난다고 하는 원리를 이용한 것이다. 토양 공극에 의하여 오차가 발생한다.

현장에서 토양의 전기 전도도를 비파괴적으로 측정하는 방법으로 전자파 유도 전류법의 사용에 대한 관심이 커지고 있다. 이 방법은 저항법 보다 몇 가지 이점이 있는데, 그 대표적인 것이 토양에 직접 접촉하지 않고 빠르게 측정할 수 있다는 점이다. 주파수 영역과 시간 영역법이 모두 이용될 수 있지만 (Cook et al., 1992), 주파수 영역 장치에 더 많은 관심이 집중되어 있다. 주파수 영역 전자파 유도 (Electromagnetic induction; EMI) 장치가 그 중 하나이다. 이는 송신 코일을 통하여 토양 내부로 사인 주기 변화 전자장을 발생하기 위해 특정 주파수 영역을 사용한다. 이 1차코일에 의해 형성된 전자장은 토양에 미세한 유도전류를 형성하게 되고, 일정 거리에 있는 수신기에 의해 감지될 수 있는 2차 전자장을 형성하게 된다. EMI는 1차 전자장과 2차 유도 전자장을 모두 감지한다. 이 전자장의 비는 토양의 전기전도도에 비례하게 된다. 지표면으로부터의 깊이에 따라서 사용될 수 있는 상용 기종이 여러 가지 나와 있으며, 이들은 사용하기에 편하며, 손으로 들고 다니며 측정할 수 있게 설계되어 있다. 현장에서 자동차에 매달아 사용할 수 있도록 비전도성 겉개에 부착하여 사용할 수도 있다 (Jaynes et al., 1995).

전자장 유도 (EMI) 방식은 이동하면서 비파괴적으로 토양의 전기전도도를 측정할 수 있는 유일한 방법이다. 수동식 1차 전자기에 의한 유도 전류를 이용한 전자기 유도 염류 측정 장치의 측정원리는 다음과 같다. 토양에서 유도전류는 2차 전자기장

을 형성한다. 2차 전자기 강도는 2차 conductor인 토양 내에서의 전류량에 비례한다. 전류량은 토양의 전기전도도의 함수이므로 토양의 전기전도도를 측정하여 조사된 전자기 강도로부터 보정해 낼 수 있다. 이 이론을 이용하여 Rhoades와 Cowin(1981)은 토양의 염류도를 신속히 측정할 수 있는 유도전자기 토양 전기전도계를 개발하였다. 이 장치는 토양 표면 또는 토양 위에서 측정되기 때문에 토양의 시료채취 없이 비파괴적으로 측정할 수 있다. 이 장치는 염류토양의 토양조사, 염류침출수의 유출, 토양의 깊이 따른 염류도의 변화 예측 등에 이용될 수 있다 (Corwin과 Rhoades, 1984; Rhodes et al., 1989a).

염류도와 같은 토양의 특성은 전기전도도에 직접 관여하는 단일 기본 성질이다. 그러므로, 전기전도도와 이 특성에 대한 상관관계가 만들어지면 EMI 조사가 쉽게 이용될 수 있다. 예를 들어 EMI 측정기는 토양의 염류도 (Rhoades and Corwin, 1981; Cameron 등, 1981; Lesch et al., 1992), 토양 수분 함량 (Kachanoski 등, 1988) 측정에 이용되었으며, 염소, 황산 및 질산염 수준의 증가에 의한 지하수 오염 확산 (Greenhouse and Slaine, 1983; Drommerhausen 등, 1995), 그리고 점토함량의 측정(Williams and Hoey, 1987)등에 이용되었다.

전자장 유도 방식의 비파괴 염류도 측정 기술은 선진 외국에서도 최근 들어 현장에서 적용성이 높은 첨단 기술로 인식되고 있다.

나. 국내 관련기술 현황

농업분야에서 우리 나라의 염해지에 대한 연구는 그 동안 많이 이루어져 왔으나, 염해지의 토양 관리 기술 지침이 체계적으로 정리되어 있지 못하며, 단편적인 연구 결과의 보고들이 산적해 있을 뿐이다.

우리나라에서 이루어진 최근의 염류 토양 문제는 유 등 (1998)에 의해 이루어진 간척지 제염방법 개선에 의한 발작물 재배 기술 개발에 관한 연구와 구 등(1998)의 간척지 제염 예측 기법 개발에 관한 연구, 안 (1991)의 서남해안의 간척지 연구 등이 대표적이다. 이들 연구에서 토양의 염류 농도 조사는 USDA 염류토 분석 방법을 표준법으로 하고 있다. 이 방법은 현장에서 채취된 토양을 건조한 후 풍건 쇄토하여 조제한 다음 증류수로 포화시켜 침출액을 추출한다. 염농도는 포화 침출액에 대한 전기전도도를 측정한다. 이 방법은 염류토 분석에 표준이 되고 있고, 우리나라에서도 표준으로 삼고 있다.

다. 문제점

아직 우리나라에서 광역의 염해지에 대한 상세한 염분 분포도가 만들어진 바 없으며, 제한된 채취된 시료의 분석에 의해 염농도가 대표되어 왔다. 특히 염류 토양의 염류도 조사에 비파괴 방법이 활용되고 있지 않으며, 유 등 (1998)의 연구에서 전자장 유도를 이용한 염분 분포 조사 가능성이 제기된 것이 전부이다. 또한, 우리나라에서 염해지에 대한 토양 조사 연구가 많이 이루어져 왔으나, 자료로 산재하여 있을 뿐, 염류도 관리를 위한 토양 관리 지침서가 제시된 바 없어, 간척지의 체계적인 이용 계획 수립이 어려운 실정에 있다.

3. 앞으로 전망

염해지의 환경보전형 정밀 농업을 위한 토지 이용 관리에 무엇 보다 필요한 것이 염농도의 수직적 수평적 공간적 분포도이다. 이 분포도에 의해 식생의 변화를 예측할 수 있고, 작물의 배치가 고려될 수 있으며, 토양 관리의 원칙이 정해질 수 있다. 특히 이 연구에서 개발하고자하는 비파괴 신속 염농도 측정 기법은 우리나라의 염류토 연구를 선진화하는 데 획기적인 기여를 할 수 있을 것으로 전망하며, 이 연구의 성과로 얻어질 염류토 관리 지침서는 염해지에서의 환경 보전형 정밀 농업을 위한 토양 관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

4. 기술도입의 타당성

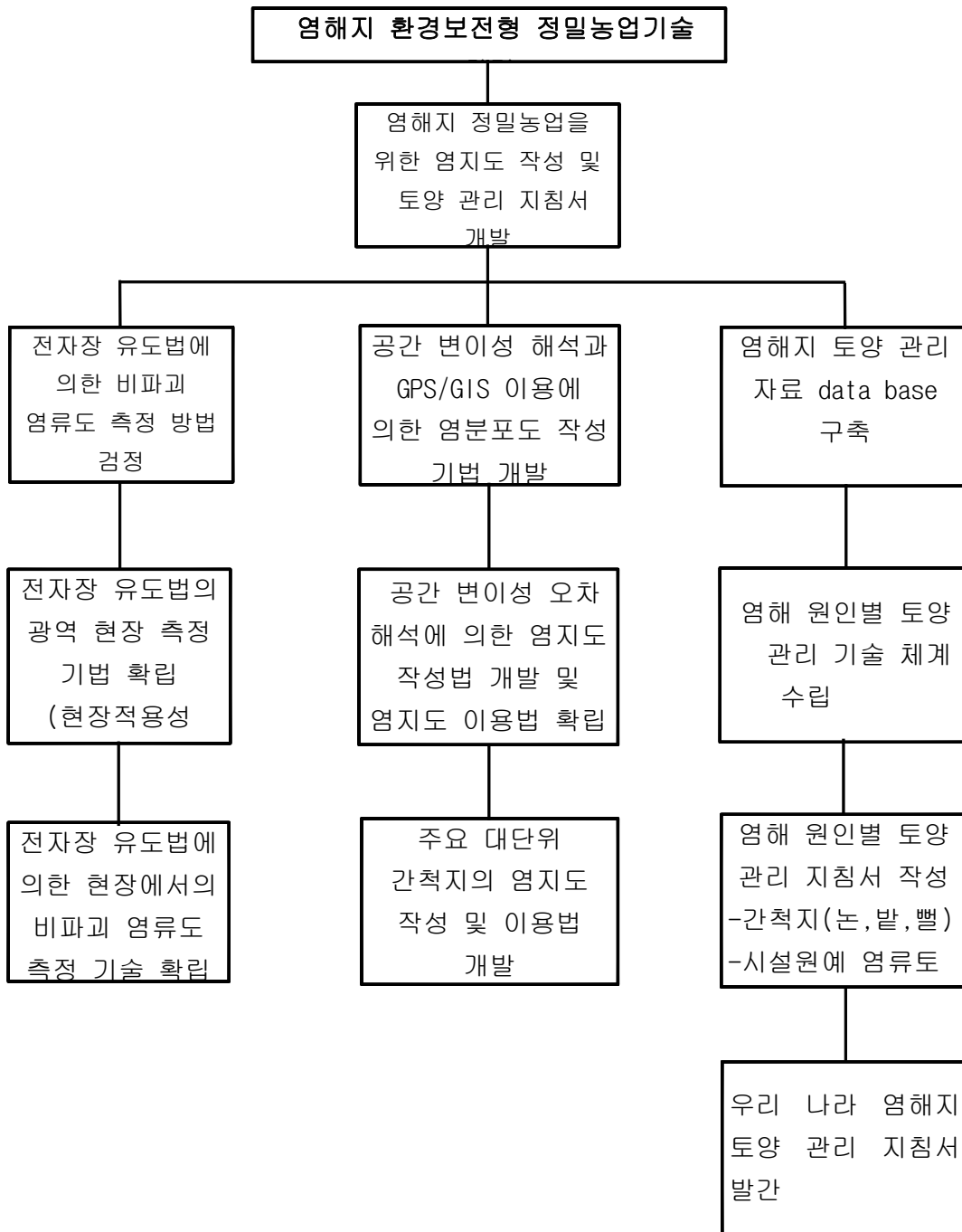
이 연구는 선진국에서 사용되고 있는 토양 전기전도도 측정 기술과 GPS/GIS 기법을 접목시켜 우리 나라의 염해지 토양 관리에 응용할 수 있는 기법의 개발이므로 직접적인 기술 도입은 없다.

제 2절 연구개발의 목표 및 내용

염해지에서 환경 보전형 정밀 농업을 위한 토양 염류도의 수평적, 수직적 공간 분포와 변이를 파악할 수 있는 염지도 작성법의 개발 및 염류토양 관리 지침서 개발을 최종 목표로 하는 바 그 세부 목표와 내용은 다음과 같다.

구 분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (1999)	염해지에서의 비파괴 염류 도 측정 기술 및 GPS연계 염지도 작성법 개발	<ul style="list-style-type: none"> - EM-38에 의한 염해지 토양의 전기전도도의 수직 및 수평 분포 측정 기법 확립 - 염 분포의 공간 변이성 해석 및 GPS 연계법 확립 - 염해지 토양 관리 기술 자료 data base 구축 <ul style="list-style-type: none"> o 연구 대상지 대호간척지, 김포매립지.
2차년도 (2000)	염해지 염지도 및 토양 관 리 기술 자료 data base 구 축	<ul style="list-style-type: none"> - EM-38/GPS/GIS 연계에 의한 토양 염지도 작성 기법 개발 - 주요 염해지 토양 특성의 공간 변이성 해석 - 염해지 토양 data base 구축 및 염지도 작성법 확립 <ul style="list-style-type: none"> o 연구 대상지 대호간척지, 김포매립지 기존 주요 간척지(계화도 등 8개소)
3차년도	주요 염해지 염지도 및 토 양 관리 지침서 작성	<ul style="list-style-type: none"> - 염해지 토양 염지도 작성법 <ul style="list-style-type: none"> o 연구 대상지 대호간척지, 김포매립지 기존 주요 간척지(계화도 등 8개소) - 염해지 토양 관리 기술 자료 data base 구축 - 염해지 토양 관리 지침서 작성

제 3절 추진전략



제 4절 기대효과 및 활용방안

1. 기대효과

가. 기술적 측면

1) 전자장 유도법과 GPS/GIS 기법 연계에 의한 토양 염류 분포도 작성 기법개발
염해지의 환경 보전형 정밀 농업을 위한 토지 이용 관리에 무엇보다 필요한 것이 염농도의 수직적 수평적 공간적 분포도이다. 이 분포도에 의해 식생의 변화를 예측할 수 있고, 작물의 배치가 고려될 수 있으며, 토양 관리의 원칙이 정해질 수 있다. 특히 이 연구에서 개발하고자 하는 비파괴 신속 염농도 측정 기법은 우리나라의 염류토 연구를 선진화하는 데 획기적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대됨

2) 염해지 토양 관리 지침서 개발 및 이용

이 연구의 성과로 얻어질 염류토 관리 지침서는 염해지에서 환경 보전형 정밀 농업을 위한 토양 관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대됨

나. 경제 · 산업적 측면

이 연구는 우리나라의 염해지 토양 관리에 있어 독자적인 기술 체계를 확립하여 기술도입에 따른 막대한 경제적 손실을 줄여 줄 수 있고, 연구 결과 개발되는 기술은 현장에 적용이 직접 가능하므로 경제 산업적 실익성이 크다.

이제까지의 토양의 염농도 측정 방법은 대부분 현지에서 토양을 깊이별로 분리하여 토양 시료를 채취하여 실험실로 운반한 다음 풍건 조제하여 분석하는 방법에 의존해 왔다. 토양 시료 채취와 분석에 시간과 경비가 많이 든다. 따라서 넓은 면적에서 많은 시료를 채취할 수 없으므로 시료 채취 및 분석 결과의 해석에 문제점이 많고, 넓은 면적에서의 염류의 상태를 제대로 파악하기 어렵다. 한 지역에서도 그 변이성이 큰 관계로 토양 및 작물 관리에 어려움이 많다. 그러나, 전자장을 이용한 비파괴 토양 전기전도도 측정 방법과 GPS/GIS를 응용한 염지도 작성법은 넓은 면적에서의 염분포를 쉽고 경제적으로 작성하여 정밀농업에 이용할 수 있으므로, 그 경제적 효과는 클 것이다.

전자장을 이용한 염류도 조사 결과를 GPS/GIS 연계하여 염지도를 작성하고, 그

이용법을 확립하면, 친환경 관리와 지역 사회의 발전을 앞당길 수 있으며, 정보 기술을 농업 기술에 접목시킴으로써 농촌 문화의 현대화에 기여할 수 있을 것이다.

2. 활용방안

1) 비파괴 전자장 유도장치 (EM38)에 의한 간척지 염 분포 조사

- 기 개발된 간척지의 토양 관리에 활용
- 새만금 간척지와 같이 개발 중에 있는 대단위 면적 간척지에서 염 분포의 공간적 특성을 정확히 파악하여, 제염 및 영농 관리 대책 수립 적용에 활용
- 작성된 염분포도를 활용하여 간척지 토양 관리를 보다 정확하고 효율적으로 할 수 있음.
- 간척지 개간 후 넓은 간척지에 대해 쉽고 간편하게 염 분포도를 작성하고, 이용 목적에 맞도록 제염지역 설정과 제염 정도를 결정하는 데 활용.
- EM38을 광범위한 간척지 포장에 활용하여 토양 염분도를 쉽고 간편하게 측정하고 관리함으로써 염해에 취약한 지역을 관리하는 데 활용.
- 이 기술은 비파괴적으로 측정이 매우 쉽고 간편하여 현장 적용성이 높으므로 농업기술원 등에서 기술을 활용하여 농가 포장 관리에 활용할 수 있음.
- EM38 측정치를 kringing 기법에 의해 해석하고, 이를 surfer로 분포도를 작성한 후, GPS/GIS와 연계하면 넓은 지역의 염분포를 정확히 알 수 있으며, 광범위한 간척지를 관리하는 데 매우 편리함.
- 수직적, 수평적 염분포도를 작성하여 가뭄에 의해 염의 상승으로 피해를 볼 수 있는 지역과 우선 관개용수 공급 지역을 설정하는 데 유용하게 활용할 수 있음.

2) 토양 수리 전도도와 토양 경도 조사

- 간척지 농업은 대부분 벼재배에 이용되고 있으므로 재배 기간의 대부분이 담수상태로 있게 된다. 따라서 수리전도도를 활용하여 관개수량을 결정하여 부족한 농업용수의 합리적인 공급에 대한 기초자료로 활용
- 토양 경도는 작물의 뿌리발육과 밀접한 관계가 있으며, 토양의 다져진 정도를 깊이별로 조사하는 것으로 작물의 뿌리상태를 예측하고, 경운에 의한 경반층의 형성 유무를 파악하는 데 활용됨.

- 3) 이 연구의 수행 결과는 최종적으로 점차 증가하고 있는 광범위한 간척지의 정밀 농업을 구현하기 위한 기초 자료일 뿐만 아니라, 실제 현장에 대한 적용성이 대단히 높은 기술로 간척지와 같은 토양의 물리적 균일성이 상대적으로 높고, 염에 대한 영향이 큰 지역특이성을 갖는 곳에서의 활용에 반드시 필요한 기술임.
- 4) 염해지 토양 관리 지침서는 염해지 토양의 염류 문제를 정확히 파악하여 환경에 건전하며, 환경에 친화하며, 농촌경제에 활력을 불어 넣어줄 수 있는 농업을 위하여, 정확한 장소에, 정확한 시간에, 정확한 방법을 투입할 수 있는 정밀 농업 기술 체계를 수립하기 위해 토양 염류 문제에 대한 정밀한 자료를 얻을 수 있는 기술과 토양 관리에 대한 기술지침서이다. 이는 염해지의 환경 보전형 정밀 농업을 수행하는 데 있어 기초 기술자료로 활용될 수 있음.
- 5) 이 연구 결과 얻어질 토양관리지침서는 농업 관련 기관에 배포되고, 간척지 관련 영농인에게 공개되어 영농에 직접 활용토록 할 예정이다.

제 5절 연구기간 및 연구진의 구성

1. 연구기간

- (1) 1 차년도 : 1999년 11월 19일 ~ 2000년 11월 18일
- (2) 2 차년도 : 2000년 11월 19일 ~ 2001년 11월 18일
- (3) 3 차년도 : 2001년 11월 19일 ~ 2002년 11월 18일

2. 연구진 구성

구 분	성 명	소 속
연구책임자	정 영 상	강원대학교 농업생명과학대학
연구원	임 형 식 윤 세 영 주 진 호 신 중 두 박 철 수 김 은 규	강원대학교 농업생명과학대학 상지대학교 생명자연과학대학 강원대학교 농업생명과학대학 상지대학교 생명자연과학대학 강원대학교 농업생명과학대학 연세대학교 문리대학
연구보조원	이 원 호 유 일 호 김 호 국 고 창 덕 김 희 옥 박 종 국 조 은 주 이 창 호 남 기 정 이 승 수 권 석 철	강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 생명자연과학대학 농학과 상지대 생명자연과학대학 농학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과 강원대 농업생명과학대학 농화학과

제 2 장 전자장 유도장치를 이용한 비파괴 염류도 측정 방법 확립

제 1절 서 론

본 장에서는 간척지에서 비파괴 전자장 유도장치인 EM38을 이용한 염류도의 수직적, 수평적인 공간분포 측정방법 확립에 목적이 있으며, EM38측정방법의 확립을 위하여 시험포장에서 EMv, EMh측정값과 층위별로 시료(0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80cm)를 채취한 ECe의 실측치와의 보정식을 구하였다. 또한 EM38(EMh, EMv)을 토양 표면으로부터 0, 10, 20, 30, 50, 60, 100cm 높이에서 각각 측정하여 ECe와의 관계를 구명하여 가장 유의성이 높은 측정높이를 결정하였다.

전자장 측정법은 단주파수를 이용한 다층 구조를 갖는 토양층에 대한 지구물리학적 탐사법의 하나이다(McNeil, 1980). (그림 2-1)에서와 같이 수 활성화된 송신 코일 Tx가 균질의 토양 위에 놓여 있고, 이로부터 일정한 거리 s에 수신 코일 Rx가 놓여 있을 때, 전자장 쌍극 모멘트 M인 송신 코일이 1차 교류 전류가 주파수 f에서 에너지 활성화되었다고 하면, 발생한 송신기 모멘트는 이다. 송신기의 1차 교류 전류는 비례하는 1차 전자장 H 를 형성한다. 이는 송신기의 동위상(in-phase)이다. Faraday 법칙에 의하면, 시간 영역 1차 전자장은 전도체인 토양에 1차 기전력(EMF)를 유도한다.

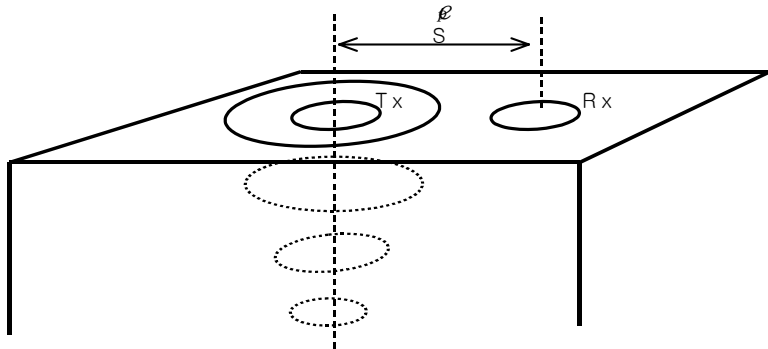


Fig. 2-1. Schematic diagram of induced current flow in a homogeneous half space(vertical dipole mode).

이는 자기 감응 전류환 i_i 를 형성한다. 1차 전자장 H_p 은 항상 송신기 전류와 동위상이며, Faraday 법칙에 의하여 1차 기전력 e_p 을 1차 전자장의 시간 변화량에 비례하므로, 기전력 $e_p(\propto \partial H_p / \partial t = i\omega H_p)$ 는 1차 전자장과 직각 위상이 된다.

여기서 중요한 점을 지적할 수 있다. (i) R_i (전류환 1)의 값이 크거나, (ii) 송신기의 주파수가 매우 작거나, (iii) 송신기 바로 인근에 형성된 전류환만이 관심의 대상이라면, 단순한 전기 이론에 의하여 자기 유도 L_i 와 1차 전자장에 쌍을 이루어 생성되는 상용 유도 M 에 의해 생성되는 환 저항을 무시할 수 있다. 이러한 경우 전류환 1에 흐르는 지중 전류 i_i 는 Ohm의 법칙 $i_i = e_p / R_1$ 으로 주어진다. 이 전류가 e_p 와 동위상이며, 1차 송신 전류와 직각위상이다. 이 지중 전류 i_i 는 송신 코일의 1차 전류와 마찬가지로 비례하는 2차 전자장을 생성한다. 지표면 위에서 송신기 코일로부터 수평으로 일정 거리 s 에 있는 수신기를 이용하여 송신기로부터 직접 발생한 1차 전자장과 함께 측정할 수 있다.

2차 전자장은 i_i 에 비례하며, 이는 전류환 저항 R_i 에 역비례하므로, 측정된 2차 전자장은 지중의 전도도와 직접 비례하는 전류환 전도도, $G_1(G_1 = 1/R_1)$ 에 비례한다. 그러므로, 동위상 1차 전자장에 대한 직각 2차 전자장의 비율을 측정하면, 전도체 영역의 전도도로 환산할 수 있다. 2차 전자장을 H_s 라하면,

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4}$$

이다. 여기서 $\omega = 2\pi f$, f 는 주파수(Hz), μ_0 는 자유 공간의 투과계수, σ 는 지중 전도도(S/m), 그리고 s 는 내부 코일간 거리이다. $i = \sqrt{-1}$. 이 식에서 지중전도도는 1차 전자장과 2차 전자장의 비에 비례함을 보여준다. 여기서 지중전도도 σ_a 는 감응 영역내의 전도

도로서 $\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)$ 이다.

EM측정 장치는 수직 모드와 수평모드 두 가지이다. (그림 2-2)는 수평 모드에서의 측정 예를 보여준다. 트랜스미터 코일(T)이 한쪽 끝에 부착되어 있어 토양 내에서 환형 와류 전류의 고리를 형성하게 된다. 와류 고리의 크기는 고리 주변의 EC에 직접 비례한다. 전류환은 환내에 흐르는 전류의 값에 비례하는 제 2차 전자장을 발생하게 된다. 환으로부터 유도 전자장의 일정분이 수신코일(R)에 의해 검지되며, 증폭되어 ECa에 비례하는 전압

으로 읽어 낼 수 있게 된다. 읽어낸 값은 전체 깊이에 대한 적산치이며, EC가 깊이에 관계 없이 균일한 조건에서 깊이 z 이하의 적산치 $R(z)$ 의 상대적 분포 관계는 기기 개발자인 Geonics에 의해서 제시된 것이다. 이 관계를 보면 수평 배치 상태에서 75%의 감응이 90cm의 깊이에서 온다는 것을 알 수 있다. 수직 배치상태에서는 이 깊이가 190cm일 것이다. 그러므로 전체 근권 또는 이 보다 더 깊은 깊이 까지가 단일 적산치로 표시될 것이다. 이 기기는 염류도의 조사나 염수의 삼투 유출 진단에 가치가 클 것으로 보이며, Rhoades(1979a)가 기술한 바와 같이 이 기법은 어느 지역의 전반적인 염의 상태를 알아볼 필요가 있는 지리 물리학적 탐사에 사용되어 왔다. 그러나 농업 염류도 적용을 위해서는 근권의 염농도의 분포를 알아내야 할 필요가 있다. 그렇지 않으면 EC값이 높을 경우 실제로는 깊은 토양 또는 근권 밖의 염농도가 높은 때에도 지표가 비교적 높은 염농도를 유지하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 염을 진단과 관개 프로젝트에서 용탈과 배수의 적합성을 평가하기 위해 이와 같은 여러 조건이 분별되어야 한다(Rhoades, 1976, 1980).

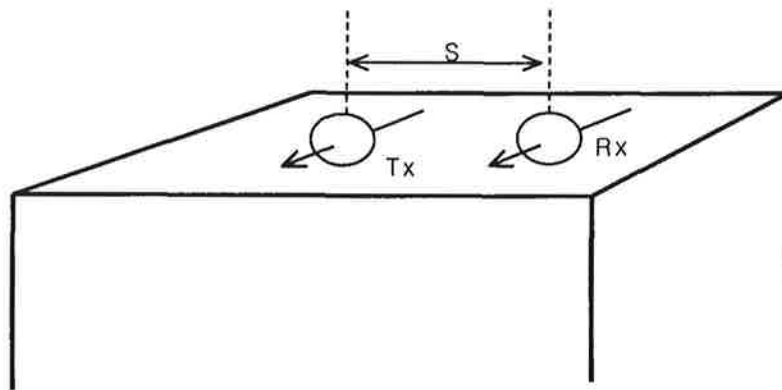


Fig. 2-2. Coil configuration for horizontal dipole mode.

토양의 염도 평가를 위한 EM 측정장치들의 이전의 적용들은 Cameron et al.(1981), Rhoades et.al(1989), Williams and Baker (1982), Williams and Fiddler (1983), Wollenhaupt et al. (1986), McKenzie et al, (1989), Williams and Arunin(1990), Slavich and Petterson (1990), and Lesch et al(1992)에 의하여 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 soil: water(1 : 5)와 포화침출액법(ECe)의 토양 전기전도도에 관계한 토양보정식에 대하여 연구한 것이다.

간척지 토양의 염도의 조사는 농업에 있어 매우 중요한 정보를 제공한다. 예를 들면 관개, 토양 그리고 작물의 관리, 경작지와 지역적인 크기에 대하여 중요한 정보를 제공할 수 있다. 전자장 유도 측정은 토양의 염도와 매우 밀접한 관계에 있기 때문에 이러한 목적

들에 매우 유용한 것을 판정되었다. 다른 중요한 이유로는 기계의 구조가 튼튼하며, 소형으로 설계되었으며, 사용이 간편하며, 측정물체와 직접 접촉하지 않아도 된다. 다른 염도 측정기기와는 달리 물리적인 접촉이 필요하지 않고 각 지점에서의 측정시간이 절약된다. 이러한 장점들로 인해 넓은 지역에서 많은 측정을 할 수가 있다. 이러한 전자장 유도 방식의 비파괴 염류도 측정 기술은 선진 외국에서도 최근 들어 현장에서 적용성이 높은 첨단 기술로 인식되고 있다.

제 2절 연구 수행 방법

1. 연구 대상지 개요

연구 대상지는 1986년에 간척된 충남 당진군 농어촌진흥공사의 대호간척지 시험포장과 영종도 토양에서 실험을 실시하였다. 대호간척지 시험포장은 암거배수와 주배수로가 설치되어 있어 염농도의 높고 낮은 지역을 쉽게 예측할 수 있는 지역으로 염이 표토에 집적된 지역과 용탈된 지역을 쉽게 파악할 수 있는 지역이다.



Fig. 2-3. Experimental plot in Daeho reclaimed land.

1. 연구 대상지 개요

연구 대상지는 1986년에 간척된 충남 당진군 농어촌진흥공사의 대호간척지 시험포장과 영종도 토양에서 실험을 실시하였다. 대호간척지 시험포장은 암거배수와 주배수로가 설치되어 있어 염농도의 높고 낮은 지역을 쉽게 예측할 수 있는 지역으로 염이 표토에 집적된 지역과 용탈된 지역을 쉽게 파악할 수 있는 지역이다.



Fig. 2-3. Experimental plot in Daeho reclaimed land.

2. 전자장 유도장치 측정 방법

염류도 측정방법으로는 비과피 현장 측정법 (전자장 유도법: EM38-Geonics), 실험실 내 분석법으로는 포화 침출액법과 1:5(토양:증류수)법을 이용하였다. EM38(Geonics)에 의해 수평mode(EMh)와 수직mode(EMv)값의 ground conductivity를 측정하였으며, 토양 표면으로부터 0, 10, 20, 30, 50, 60, 100cm 높이에서 각각 EMh와 EMv를 측정하였다.



Fig. 2-4. Geonics EM38 prototype electromagnetic soil conductivity meter(light) lying in the horizontal

position with its coils parallel to the soil surface, and(left) lying in the vertical position

with its coils perpendicular to the soil surface.

이러한 EM38의 현장 조사에 대한 적정성을 검토하고, 실제 토양에 대해 오차가 있는지를 검정하고, 그 관계를 설정하기 위하여 calibration 토양을 EM38값의 범위별로 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80cm에서 채취하여 실험실로 운반하여 포화반죽을 한 후, 추출하여 E_{Ce}값을 측정하였다. EM38에 의한 현장측정치와 실험실내 포화추출에 의한 수치의 상관관계를 알아보았다.

3. 시료채취 및 토양 분석방법

Electrical conductivity(E_{Ce})는 토양 0-10cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm, 60-80cm 80-100cm 깊이로 시료를 sampling하여 토양특성을 토양화학분석법(1988)에 준하여 분석하였다. 토양분석은 포화침출액과 풍건 후 2mm체로 조제한 시료를 이용하였다. 포화침출액법으로 E_{Ce}, 1:5법으로 전기전도도 EC를 측정하였고, pH는 1:5 초자전극법으로 측정하였다. 유기물 함량은 Walkley Black 법으로 측정하였으며, 유효인산 함량은 몰리브덴청법에 의하여 UV-spectrophotometer로 측정하였다. 양이온함량의 측정은 포화침출액과 1N ammonium acetate로 침출액을 Atomic Absorption Spectrophotometer 로 측정하였다. 토양의 NO₃⁻태 질소와 NH₄⁺ 질소는 1N-KCl로 추출한 다음 Kjeldhal법에 의하여 분석하였다. NO₃⁻태 질소는 Davards Alloy 법에 의하여 측정하였다. 토양의 전용적밀도는 2"-core 채토기로

불교란 시료를 채취하여 조사하였으며, 토성은 pipette법에 의하여 모래와 미사 그리고 점토 함량을 측정하여 조사하였다.

4. 시험 포장의 물리·화학적 특성

시험 포장은 제염이 진척되고 있는 간척지 토양으로 점토함량이 18.4-18.9%인 미사질 양토로 심토의 용적밀도 (bulk density)가 높고, 토양 유기물 함량 (O. M.)이 많을수록 용적밀도도 적은 값을 나타내었다(표 2-1).

Table 2-4. Physical properties of the soil of the experimental plot in Daeho.

Depth (cm)	Sand	Silt (%)	Clay	O.M g/kg	Three phase(%)			Porosity (%)	B.D (g/cm ³)
					Soild	Liquid	Gas		
0~10	35.0	46.1	18.9	70	59.92	17.70	22.83	40.07	1.58
10~20	34.9	45.4	19.5	45	69.29	22.00	11.71	33.71	1.75
20~40	35.5	45.9	18.4	42	69.02	23.86	7.11	30.98	1.82
40~60	38.8	42.4	18.8	35	69.10	24.82	6.07	30.90	1.81
60~80	34.3	46.8	18.9	38	67.81	27.13	7.10	32.19	1.79

(표 2-2)는 대호간척지 시험포장의 포화침출액 특성의 평균치와 범위이다. pH는 깊이별 차이는 크게 나타나지 않았으며, ECE의 경우 심토보다는 표토에서 함량이 큰 경향을 나타냈으며, 양이온 함량은 심토에서 높은 경향을 나타내고 있었다. 하지만 이러한 평균적인 값으로는 대호시험포장의 염류의 분포를 표현하는 데는 한계가 있다. 배수가 양호한 지역에서는 보다 낮은 경향을 나타낼 것이고, 배수가 불량한 곳에서는 보다 높은 경향을 나타내고 있기 때문이다. 이 표에서 나타나듯이 평균값은 배수가 양호한 지역과 불량한 지역의 특성을 표현 하는 데는 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 variogram을 작성하여 대호간척지 토양의 공간변이성을 파악을 통하여 분포도를 작성이 가장 좋은 방

범일 것이다.

Table 2-2. The variation of chemical properties of the saturation extract of the experimental plot in Deaho.

Depth (cm)	pH	EC -dS/cm-	Ca -----cmol/L-----	Mg	K	Na
0~10	Mean 7.54	25.68	9.57	41.47	9.52	103.38
	Range 6.89~8.19	0.8~70.3	0.3~2.4	3.4~41.5	2.5~26.2	10.2~280.8
	CV(%) 12.01	105.13	67.09	71.80	77.94	74.47
10~20	Mean 7.38	22.16	9.90	34.28	9.84	93.61
	Range 6.82~8.20	1.4~58.8	0.4~2.1	1.4~4.3	4.0~20.8	12.6~252.1
	CV(%) 5.57	95.06	59.57	121.63	63.67	80.83
20~40	Mean 7.40	19.66	8.91	27.33	8.79	64.95
	Range 7.04~8.17	2.4~46.3	0.1~1.7	3.1~27.3	2.6~16.2	11.4~154.0
	CV(%) 5.72	81.05	57.21	83.68	52.45	79.71
40~60	Mean 7.34	21.54	11.11	21.40	10.97	89.73
	Range 6.55~8.23	3.7~45.8	0.5~1.7	2.9~21.5	3.8~23.0	13.2~271.9
	CV(%) 5.87	66.57	38.55	98.66	48.76	104.12
60~80	Mean 7.39	21.07	12.87	24.37	10.71	102.78
	Range 7.26~8.10	1.9~39.0	0.5~2.9	4.5~24.4	2.5~15.9	14.2~298.2
	CV(%) 3.86	58.60	56.55	100.40	35.33	107.40

(표 2-3)은 배수가 불량한 지역의 화학성분을 나타내고 있다. ECe는 19.50~91.50dS/m의 범위이며, 심토보다는 표토에 염이 집적되어 있었다. 이는 배수도가 불량하고 높이가 낮기 때문에 염이 표토로 집적되어 높은 경향을 나타내고 있었다. (표 2-2)보다 작은 변이를 나타내고 있으나, 역시 큰 변이를 나타내고 있다. 이는 암거배수관과 배수로의 영향으로 인한 염류집적의 차이에 기인하기 때문이라고 판단된다.

Table 2-3. The variation of chemical properties of the saturation extract of the experimental salinity high plot.

Depth (cm)	pH	EC -dS/cm-	Ca -----cmol/L-----	Mg	K	Na
Mean	7.69	45.05	1.34	10.62	1.07	15.50
0~10 Range	7.24~8.04	19.50~91.50	0.70~2.31	2.15~41.47	0.11~2.25	6.25~18.5
CV(%)	3.36	47.85	38.12	103.13	63.44	23.01
Mean	7.59	41.78	1.94	9.36	1.36	15.87
10~20 Range	7.25~7.94	22.80~75.20	1.16~2.62	2.34~29.55	0.46~2.65	7.79~19.30
CV(%)	3.33	37.46	21.63	80.92	47.80	20.29
Mean	7.62	38.77	1.94	8.33	1.38	16.02
20~40 Range	6.55~7.94	28.10~56.40	0.26~3.56	2.51~11.20	0.84~1.92	12.36~17.78
CV(%)	5.01	23.87	42.81	33.36	27.89	9.63
Mean	7.74	35.95	1.91	7.00	1.38	15.37
40~60 Range	7.53~7.97	24.80~51.10	0.77~2.88	2.02~11.04	0.72~2.02	12.79~17.79
CV(%)	1.96	22.91	30.55	42.59	33.17	11.12
Mean	7.75	35.69	1.89	7.06	1.29	15.43
60~80 Range	7.36~7.93	28.90~43.90	1.17~2.40	2.42~9.18	0.75~1.76	13.38~17.69
CV(%)	2.41	13.13	20.73	28.45	26.49	7.92

(표 2-4)는 배수가 양호한 지역의 염류를 나타낸 표이다. ECE의 범위는 1.10 ~ 34.40의 범위이고, 표토보다는 심토에서 보다 높은 경향을 나타내고 있어 주배수로의 영향으로 배수가 촉진되어 표토에서 염류가 용탈되었고 암거배수관의 영향으로 인해 높은 변이를 나타내고 있다. 이렇듯 평균치로서 간척지의 토양을 대표하는 방법은 지역적인 특성에 맞는 토양의 특성을 나타내는 데에는 한계가 따르게 된다.

Table 2-4. The variation of chemical properties of the saturation extract of the experimental salinity low plot.

Depth (cm)		pH	EC -dS/cm-	Ca -----cmol/L-----	Mg	K	Na
	Mean	7.92	9.54	7.78	1.23	0.68	1.42
0~10	Range	7.65~8.68	1.50~19.50	7.35~8.21	0.13~3.20	0.20~1.16	0.22~2.41
	CV(%)	3.53	66.94	3.22	81.32	45.88	58.23
	Mean	7.91	10.34	7.75	0.97	0.83	1.52
10~20	Range	7.56~8.54	1.40~23.90	7.30~8.38	0.09~2.39	0.19~1.88	0.17~2.34
	CV(%)	3.83	67.32	3.69	69.02	59.54	56.18
	Mean	7.84	11.55	7.65	1.08	0.83	2.33
20~40	Range	7.21~8.31	1.10~31.00	7.18~8.36	0.10~3.07	0.14~1.72	0.12~5.96
	CV(%)	4.14	77.64	4.19	79.92	54.13	88.39
	Mean	7.85	12.61	7.64	1.22	0.85	2.62
40~60	Range	7.41~8.41	1.60~31.10	7.13~8.25	0.11~3.42	0.19~1.60	0.21~6.74
	CV(%)	3.56	78.67	3.69	86.34	55.49	85.08
	Mean	7.84	14.39	7.65	1.39	0.84	2.51
60~80	Range	7.36~8.32	2.00~34.40	7.25~8.09	0.08~3.01	1.64~0.26	0.39~7.26
	CV(%)	3.58	74.33	3.51	72.89	49.64	85.14

제 3절 전자장 유도 측정법(EM 38)에 의한 염류도 측정

(그림2-5)는 전자장 유도장치인 EM38의 수평 mode인 EMh 와 수직 mode인 Mv의 측정치로부터 대호 간척지 시험포장의 전기전도도의 분포도를 작성한 것이다. 대호간척지 시험포장에서 배수도가 낮고 배수가 불량한 지역은 염류가 표토로 집적되어 높은 38값을 나타내고, 배수도가 높고 넓어 배수가 양호한 지역은 표토의 염이 용탈되고 또한 10m간격으로 설치된 암거배수관의 영향으로 염류가 낮아 식물 생육이 양호한 지역이다. EM측정치로서 분포도를 작성한 결과 주배수도가 설치되어

배수가 양호한 지역에서는 EM측정치가 낮은 경향성을 나타내고 있었으며, 배수가 불량한 지역에서는 높은 경향을 나타내고 있었다. 그리고 또한 10m간격으로 설치된 암거배수관의 영향을 받는 배수가 양호한 지역에서는

EM측정치가 큰 변이를 나타내고 주기적인 높고 낮음의 영향을 받고 있음으로 미루어 보아 전자장 유도장치인 EM38의 측정치로부터 간척지 토양의 특성인 염류도를 정확하게 구현하고 있었다. (그림 2-6)은 EM측정치로부터 3차원적인 Surface Map을 구현하여 분포도를 작성한 결과 암거배수관이 설치된 곳의 변이가 큰 경향을 나타내고 있었고, 주배수도가 설치되어 배수가 양호한 지역에서는 EM측정치가 낮은 경향성을 보이고 있었으며, 배수가 불량한 왼쪽지역에서는 EM측정치가 높은 경향을 나타냄으로써 대호 시험포장의 분포를 효과적으로 구현 할 수가 있었다. (그림 2-7)은 대호시험포장의 뒤에 위치한 일반 농가의 논 토양을 EM측정치로 분포도이다. 일반 농가의 아래쪽에 넓고 깊은 배수도가 설치되어 있어 염류가 낮은 경향을 보이고 있고, 가운데 지역은 높은 경향을 나타내고 있다. 분포도를 작성한 결과 아랫부분과 윗부분에 배수도가 설치되어 염류가 낮은 지역과 중앙에 위치한 높은 경향을 보이는 분포를 EM측정치로 효과적으로 구현할 수 있었다.

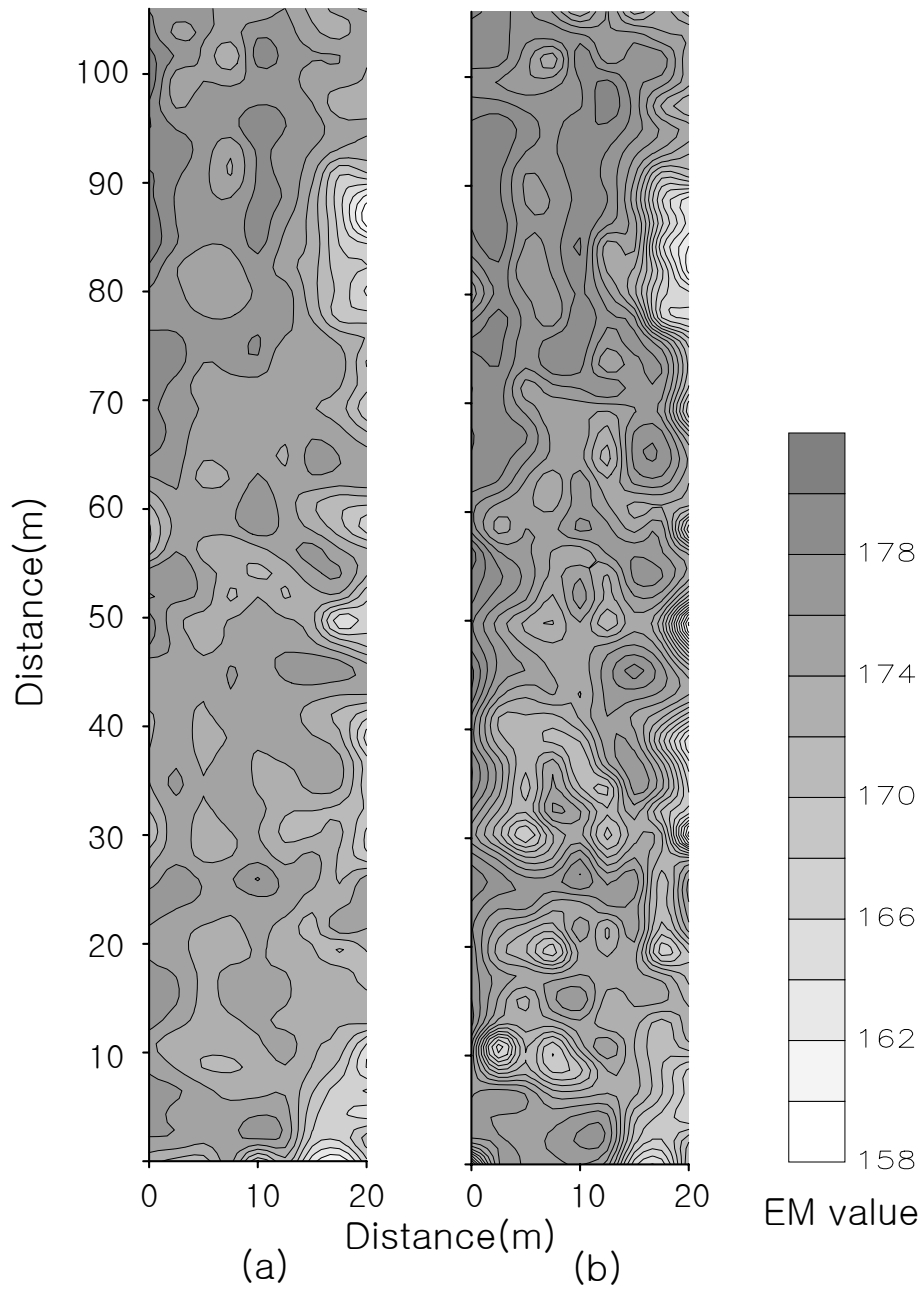
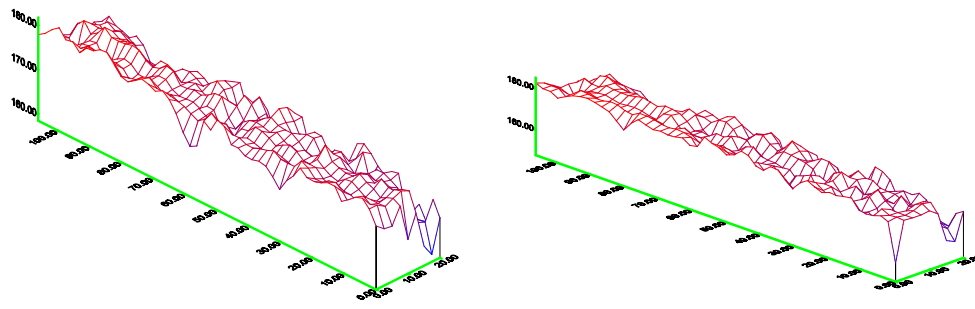


Fig. 2-5. Spatial distribution map (a) EM_V, (b) EM_h of the ground conductivity by Surfer program in the experimental in Daeho reclaimed land.



EMv

EMh

Fig. 2-6. The 3-D distribution map of the ground conductivity by Surfer program in the experimental in Daeho reclaimed area.

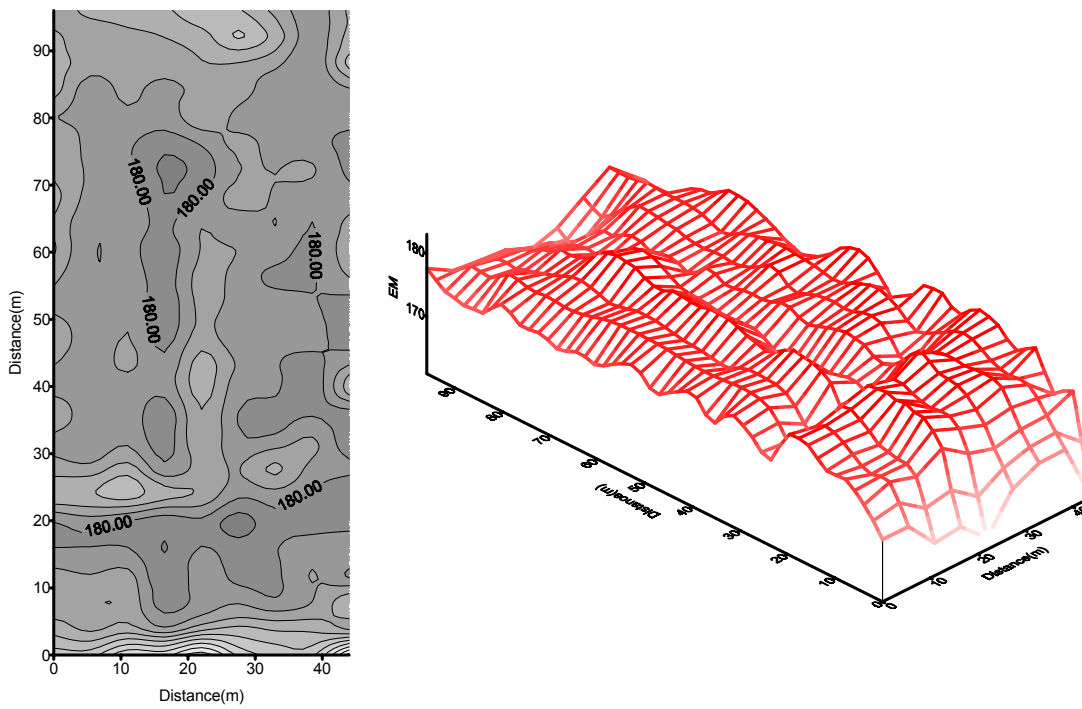


Fig. 2-7. Ground conductivity map of a paddy farm in Daeho reclaimed area.

(그림 2-8)은 김포 매립지 EM측정치의 분포도이다. EM38의 수직 mode인 EM_V의 분포도를 작성한 결과 상부에 설치된 배수로 근처의 지역은 EM측정치가 낮은 경향을 보이고 있었으나 하부에 설치된 배수로에서는 EM측정치가 높은 경향을 나타내고 있었다. 이러한 이유는 김포매립지의 큰 면적에 비하여 EM측정치의 data의 양이 면적에 비하여 충분하지 못하기 때문에 염류의 분포를 정확하게 구현하지는 못한 점이 있다. 보다 정확한 김포매립지의 염류의 분포를 정확하게 구현하기 위해서는 variogram을 통하여 EM측정 위치간의 변이의 크기와 적정거리를 구현하여 분포도를 작성해야 할 것으로 판단된다.

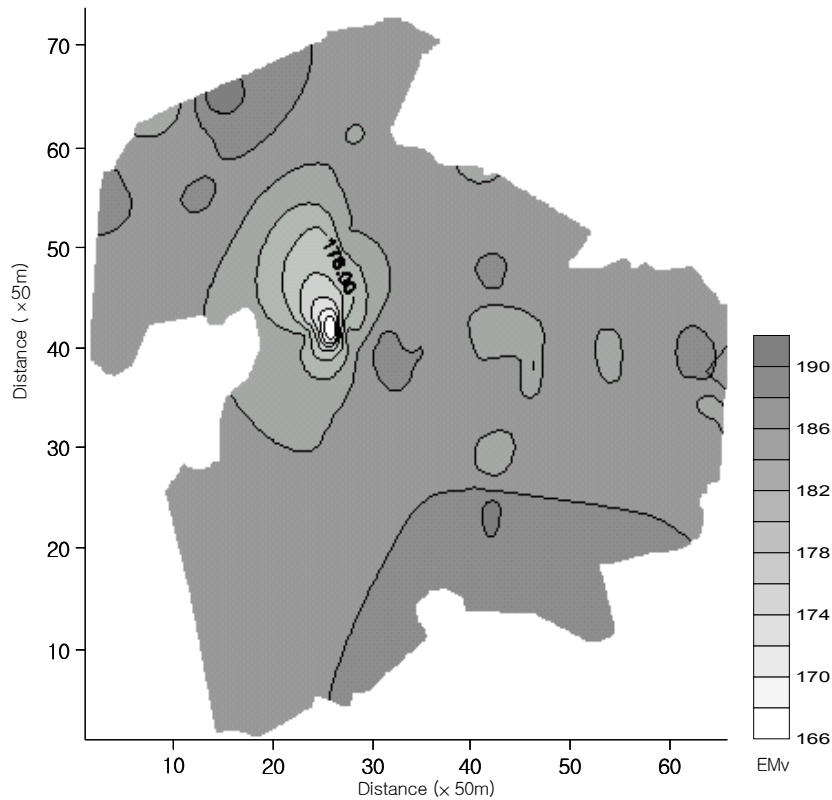


Fig. 2-8. Spatial distribution of EM_V in Kimpo reclaimed area.

제 4절 EM_v와 EM_h 값의 다중회귀 관계식을 이용한 EC_e 산정

1. EM38 높이별 측정치(EM_v, EM_h)의 보정 모델의 종류와 깊이별 계수

최근 연구에 EM38을 보정할 수 있는 여러 가지 모델이 제시되어 있다(Rhoades et al., 1999; Heath et al., 1999; Johnston et al., 1997).

- ① EM_v와 EM_h로부터 0.9m 깊이까지 30cm 간격으로 EC_a를 예측 (Cowin and Rhoades, 1982)
- ② EM_v와 EM_h의 공직선성을 포함하여 0.9m 깊이까지 30cm 간격으로 EC_a를 예측(Rhoades et al., 1989b).
- ③ EM_h와 EC_a의 비선형 관계를 보정하여 EM_v와 EM_h로부터 0.9m 깊이까지 30cm 간격으로 EC_a를 예측(Cowin and Rhoades, 1990, Rhoades et al., 1992).
- ④ EC_a와 EM_v 및 EM_h의 관계로부터 0-0.3, 0-0.6 그리고 0-0.9의 평균값을 예측.
- ⑤ EM_h와 EM_v 값으로부터 EM_h는 깊이 1.2m까지 EM_v는 깊이 1.8m까지의 가중 EC_e 값을 예측(Woolenhaupt, 1986).
- ⑥ 토성을 세 가지로, 토양 수분 상태를 세 가지로 구분하여 EM_v와 EM_h로부터 EC_e를 예측(McKenzie et al., 1989). 모든 EM38 값은 25℃로 환산.
- ⑦ 모델 B의 EC_a로부터 EC_e를 추정.

EM38의 보정에는 두 가지 기본적 접근 방법이 있다. US Salinity Laboratory에서 첫 번째 방법을 개척하였다. 토양의 깊이 30cm 간격으로 단면에 대한 EC_a를 4-전극 probe로 측정하는 것이고, 혼합 시료는 1.2m 깊이까지 조사하는 것이다. EC_e에 대한 EC_a의 별도의 보정이 필요하다. 두 번째 방법은 EM38 값을 EC_e에 대해 직접 상관 관계를 구하는 것이다. 이때 깊이에 대한 가중치를 적용하여 단순 상관을 구하거나, 일정 깊이까지의 혼합시료에 대한 평균을 적용하는 것이다.

깊이에 따른 이론적 기여도와 Wollenhaupt 등(1986)과 McKenzie 등(1989)에 의한 수정 기여도가 아래의 Table에 있다. 이들의 모델에서 EM_h는 깊이 1.2 m, EM_v는 각각 깊이 1.5와 1.8m으로 제한하였다. 이 수정된 기여도는 모델 E와 F에 사용되었다. 그러나, 이 수정치가 이론치보다 더 좋은 예측값을 보인다는 구체적인 증거는 제시되지 않았다 (Johnston et al., 1996).

Table 2-5. Depth coefficient and cumulative coefficient of EM_v and EM_H at various depth.

Depth (cm)	EM _v		EM _H	
	Depth coefficient	Cumulative coefficient	Depth coefficient	Cumulative coefficient
0-10	0.024	0.024	0.148	0.148
10-20	0.050	0.074	0.144	0.292
20-40	0.145	0.219	0.198	0.490
40-60	0.141	0.360	0.120	0.655
60-80	0.109	0.469	0.074	0.729
80-120	0.144	0.613	0.061	0.790
120-150	0.069	0.684	0.038	0.838
>150	0.316	1.000	0.162	1.000

Table 2-6. Depth coefficient and cumulative coefficient of EC_e at various depth.

Depth (m)	Horizontal		Vertical		
	Theoretical	Adjusted Wollenhaupt	Theoretical	Wollenhaupt	McKenzie
0-0.3	0.43	0.54	0.14	0.19	0.19
0.3-0.6	0.21	0.26	0.22	0.30	0.30
0.6-0.9	0.10	0.13	0.15	0.21	0.22
0.9-1.2	0.06	0.08	0.11	0.15	0.16
1.2-1.5			0.08	0.11	0.13
1.5-1.8			0.03	0.04	
>1.8					
Total	0.80	1.00	0.73	1.00	1.00

2. EM38 높이별 측정치(EM_v, EM_h)의 수직·수평적 E_{Ce} 산정

실측치의 비교 높이별 본 연구에서는 위의 (표 2-5, 6)의 가중치 계수를 이용하여 각 깊이의 E_{Ce}의 가중치를 곱하여 EC_{gH}와 EC_{gV}를 구하여 각 높이에서의 EM_v와 EM_h 값과의 다중회귀 관계식을 구하여 각각의 깊이별 E_{Ce}를 산정하는 방법이 사용하였다.

다중 회귀식은 아래 식과 같다.

$$ECe(0-z_{cm}) = \pm c \pm a \times EM_v \pm b \times EM_h$$

이 방법은 토성과 토양 수분 조건이 파악된 상태에서 매우 유용하다. 다음의 (표 2-7, 8, 9, 10, 11, 12)는 대호 간척지 포장의 지면에서부터 0, 10, 30, 50, 100, 150cm 높이에서 측정한 EM_v와 EM_h값으로 다중회귀식을 이용하여 EC_g의 평균값을 구한 것이다.

Table 2-7. Coefficient for EM38 calibration for EC_g measured at soil surface

MODEL*	log(EM _v S)	log(EM _h S)	INTERCEPT	r ²
LOG(EC _{gH})	45.179		-100.435	0.550***
		10.095	-21.567	0.700***
LOG(EC _{gV})	19.300	7.4728	-59.070	0.753***
	43.394		-96.391	0.514***
LOG(EC _{gM})		10.076	-21.499	0.707***
	16.050	7.896	-52.684	0.744***
LOG(EC _{gM})	44.286		-99.413	0.540***
		10.086	-21.532	0.714***
	17.675	7.684	-55.877	0.760***

* Model: Log (Y) = alog(EM_vS) + blog(EM_hS) + c

Table 2-8. Coefficient for EM38 calibration for ECg measured at 10cm.

MODEL*	log(EM _v S)	log(EM _h S)	INTERCEPT	r ²
	37.977		-84.215	0.577***
LOG(ECgH)		6.616	-13.648	0.676***
	18.068	4.584	-49.725	0.743***
LOG(ECgV)	35.907		-79.531	0.523***
		6.716	-13.843	0.706***
	13.174	5.234	-40.148	0.742***
LOG(ECgM)	36.942		-81.873	0.558***
		6.666	-13.746	0.702***
	15.621	4.909	-44.937	0.753***

* Model: $\text{Log}(Y) = \text{alog}(\text{EM}_v\text{S}) + \text{blog}(\text{EM}_h\text{S}) + c$

Table 2-9. Coefficient for EM38 calibration for ECg measured at 30cm.

MODEL*	log(EM _v S)	log(EM _h S)	INTERCEPT	r ²
	22.104		-48.406	0.523**
LOG(ECgH)		2.302	-3.794	0.592***
	5.134	1.850	-14.337	0.597***
LOG(ECgV)	21.842		-47.789	0.518**
		2.366	-3.905	0.634***
	0.711	2.304	-5.365	0.634***
LOG(ECgM)	6.273		-48.098	0.529**
		2.334	-3.849	0.622***
	2.922	2.077	-9.851	0.624***

* Model: $\text{Log}(Y) = \text{alog}(\text{EM}_v\text{S}) + \text{blog}(\text{EM}_h\text{S}) + c$

Table 2-10. Coefficient for EM38 calibration for ECg measured at 50cm.

MODEL*	log(EM _V S)	log(EM _h S)	INTERCEPT	r ²
	3.969		-7.582	0.289*
LOG(ECgH)		1.236	-1.134	0.445***
	-0.704	1.386	0.142	0.448***
LOG(ECgV)	4.327		-8.345	0.348**
		1.211	-1.057	0.433***
	0.856	0.352	-2.608	0.437***
LOG(ECgM)	4.148		-7.963	0.322*
		1.223	-1.095	0.446***
	0.078	1.207	-1.232	0.446***

* Model: $\text{Log}(Y) = a\log(\text{EM}_V\text{S}) + b\log(\text{EM}_h\text{S}) + c$

Table 2-11. Coefficient for EM38 calibration for ECg measured at 100cm

MODEL*	log(EM _V S)	log(EM _h S)	INTERCEPT	r ²
	0.845		-0.460	0.134 ^{NS}
LOG(ECgH)		0.300	0.835	0.141 ^{NS}
	0.397	0.186	0.193	0.151 ^{NS}
LOG(ECgV)	0.807		-0.356	0.124 ^{NS}
		0.295	0.870	0.138 ^{NS}
	0.313	0.204	0.363	0.144 ^{NS}
LOG(ECgM)	0.826		-0.408	0.131 ^{NS}
		0.297	0.852	0.142 ^{NS}
	0.355	0.195	0.278	0.150 ^{NS}

* Model: $\text{Log}(Y) = a\log(\text{EM}_V\text{S}) + b\log(\text{EM}_h\text{S}) + c$

Table 2-12. Coefficient for EM38 calibration for ECg measured at 150cm

MODEL*	log(EM _V S)	log(EM _h S)	INTERCEPT	r ²
LOG(ECgH)	0.845		-0.299	0.145 ^{NS}
		0.637	0.543	0.672 ^{***}
	0.133	0.618	0.326	0.675 ^{***}
LOG(ECgV)	0.757		-0.113	0.118 ^{NS}
		0.522	0.689	0.458 ^{***}
	0.185	0.496	0.388	0.464 ^{***}
LOG(ECgM)	0.801		-0.206	0.133 ^{NS}
		0.580	0.616	0.569 ^{**}
	0.159	0.557	0.357	0.573 ^{***}

* Model: $\text{Log}(Y) = a \log(\text{EM}_V\text{S}) + b \log(\text{EM}_h\text{S}) + c$

(표 2-7)에서 EM38를 토양의 표면에서 측정하였을 경우 ECgH, ECgV, ECgM 모두 매우 높은 상관관계를 나타내고 있으며, 그중 ECgH, ECgV의 평균치인 ECgM으로부터의 다중회귀 관계식의 상관관계가 가장 높은 경향을 보여주었다. (표 2-8, 9, 10, 11, 12)에서 토양으로부터 30cm까지의 높이에서 측정하였을 때 높은 상관관계를 나타내고 있었으며, 50cm이상에서 측정하였을 때는 낮은 상관관계를 보여주고 있었다. 측정치의 높이별 상관관계를 통하여 트랙터에 EM38을 장착하여 염분포도를 실시간으로 작성 시에는 30cm 이내에서 장착하여야만 토양의 염류의 측정을 정확하게 할 수 있을 것으로 판단된다.

3. EM38 높이별 측정치(EM_V, EM_h)의 토양 깊이별 E_{Ce} 산정

(표 2-13~30)은 지면으로부터 0, 10, 30, 50, 100, 150cm의 높이에서 측정한 EM측정치로부터 토양 깊이별 E_{Ce}와의 회귀방정식을 구하여 상관관계를 나타내고 있다. 지면으로부터 30cm까지는 높은 상관관계를 보여주고 있으나 그 이상에서는 낮은 상관관계를 보여주고 있으며, EM_V와 EM_h 모두 변수로 작용할 때 높은 상관관계를 나타내고 있다. EM_V와 EM_h 각각 하나만을 변수로 회귀방정식을 작성하여 상관관계를 나타내었을 때 EM_V보다

EMh 가 보다 더 높은 상관관계를 보여주고 있는 것으로 미루어 보아 토양의 염도를 수평 모드인 EMh가 보다 효과적으로 구현하고 있는 것으로 판단된다.

Table 2-13. Multiple regression equation between ECe for EM_V, EMh measured at soil surface

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-87.4099 + 34.3777LOGEM _V S + 4.9229LOGEMhS	0.4842***
LOGECe(10-20)	-73.6514 + 25.8838LOGEM _V S + 7.330LOGEMhS	0.5880***
LOGECe(20-40)	-69.6556 + 23.3679LOGEM _V S + 8.1087LOGEMhS	0.6913***
LOGECe(40-60)	-61.7045 + 19.5707LOGEM _V S + 8.3969LOGEMhS	0.6852***
LOGECe(60-80)	-49.3572 + 14.4850LOGEM _V S + 8.0154LOGEMhS	0.6445***

Table 2-14. Multiple regression equation between ECe for EM_V, measured at soil surface

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-114.6601 + 51.4260LOGEM _V S	0.4309***
LOGECe(10-20)	-114.2277 + 51.2693LOGEM _V S	0.4609***
LOGECe(20-40)	-114.5401 + 51.4488LOGEM _V S	0.5177***
LOGECe(40-60)	-108.1850 + 48.6500LOGEM _V S	0.4888***
LOGECe(60-80)	-93.7256 + 42.2429LOGEM _V S	0.4338***

Table 2-15. Multiple regression equation between ECe for EMh measured at soil surface

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-20.6095 + 9.5941LOGEMhS	0.3822***
LOGECe(10-20)	-23.3557 + 10.8475LOGEMhS	0.5258***
LOGECe(20-40)	-24.2485 + 11.2839LOGEMhS	0.6347***
LOGECe(40-60)	-23.6760 + 11.0562LOGEMhS	0.6447***
LOGECe(60-80)	-21.2109 + 9.9836LOGEMhS	0.6175***

Table 2-16. Multiple regression equation between ECe for EM_v, EMh measured at 10cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-81.0487 + 34.1331LOGEM _v 10 + 2.3654LOGEMh10	0.5032***
LOGECe(10-20)	-66.7022 + 26.0541LOGEM _v 10 + 4.1053LOGEMh10	0.5872***
LOGECe(20-40)	-60.2489 + 22.4795LOGEM _v 10 + 4.8530LOGEMh10	0.6852***
LOGECe(40-60)	-46.6219 + 15.7030LOGEM _v 10 + 5.5987LOGEMh10	0.6802***
LOGECe(60-80)	-32.5776 + 9.3028LOGEM _v 10 + 5.7755LOGEMh10	0.6641***

Table 2-17. Multiple regression equation between E_{Ce} for EM_V, measured at 10cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-98.7568 + 44.3662LOGEM _V 10	0.4762***
LOGECe(10-20)	-97.4355 + 13.2906LOGEM _V 10	0.4999***
LOGECe(20-40)	-96.5792 + 43.4740LOGEM _V 10	0.5490***
LOGECe(40-60)	-88.5342 + 12.3815LOGEM _V 10	0.4888***
LOGECe(60-80)	-75.8138 + 34.2879LOGEM _V 10	0.4244***

Table 2-18. Multiple regression equation between E_{Ce} for EM_h measured at 10cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-12.8590 + 6.1886LOGEM _h 10	0.3579**
LOGECe(10-20)	-14.6524 + 2.1413LOGEM _h 10	0.4961***
LOGECe(20-40)	-15.3401 + 1.7847LOGEM _h 10	0.6095***
LOGECe(40-60)	-15.2509 + 7.3575LOGEM _h 10	0.6412***
LOGECe(60-80)	-13.9929 + 6.8175LOGEM _h 10	0.6480***

Table 2-19. Multiple regression equation between E_{Ce} for EM_V, EM_H measured at 30cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe(0-10)	-44.0678 + 19.6775LOGEM _V 30 + 0.4311LOGEM _H 30	0.3641**
LOGECe(10-20)	-26.7331 + 11.0343LOGEM _V 30 + 1.4187LOGEM _H 30	0.4312***
LOGECe(20-40)	-15.3216 + 5.2408LOGEM _V 30 + 2.1941LOGEM _H 30	0.5755***
LOGECe(40-60)	-9.8936 + 2.6899LOGEM _V 30 + 2.3580LOGEM _H 30	0.5772***
LOGECe(60-80)	2.4123 - 3.1271LOGEM _V 30 + 5.7755LOGEM _H 30	0.6061***

Table 2-20. Multiple regression equation between E_{Ce} for EM_V, measured at 30cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-52.0067 + 23.6132LOGEM _V 30	0.3617**
LOGECe(10-20)	-52.8548 + 24.0453LOGEM _V 30	0.4030***
LOGECe(20-40)	-55.7190 + 25.3624LOGEM _V 30	0.5001***
LOGECe(40-60)	-53.3083 + 24.3145LOGEM _V 30	0.4853***
LOGECe(60-80)	-47.7499 + 21.8583LOGEM _V 30	0.4616***

Table 2-21. Multiple regression equation between ECe for EMh measured at 30cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-1.6015 + 1.3933LOGEMh30	0.3420**
LOGECe(10-20)	-1.3551 + 0.4817LOGEMh30	0.3228**
LOGECe(20-40)	-1.4516 + 1.4046LOGEMh30	0.4172***
LOGECe(40-60)	-1.3467 + 1.3804LOGEMh30	0.4254***
LOGECe(60-80)	0.2352 + 1.3006LOGEMh30	0.3738**

Table 2-22. Multiple regression equation between ECe for EM_v, EMh measured at 50cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe(0-10)	7.2684 - 4.8961LOGEM _v 50 + 2.4332LOGEMh50	0.4175***
LOGECe(10-20)	3.7739 - 2.8312LOGEM _v 50 + 1.9056LOGEMh50	0.3500**
LOGECe(20-40)	0.1484 - 0.8832LOGEM _v 50 + 1.5921LOGEMh50	0.4202***
LOGECe(40-60)	-2.5099 + 0.6420LOGEM _v 50 + 1.2440LOGEMh50	0.4270***
LOGECe(60-80)	-4.9825 + 2.2204LOGEM _v 50 + 0.7285LOGEMh50	0.4015***

Table 2-23. Multiple regression equation between ECe for EM_v, measured at 50cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-6.2871 + 3.3057LOGEM _v 50	0.1212 ^{VD}
LOGECe(10-20)	-6.8463 + 3.5947LOGEM _v 50	0.1542 ^{VD}
LOGECe(20-40)	-8.7234 + 4.4847LOGEM _v 50	0.2678*
LOGECe(40-60)	-9.4423 + 4.8365LOGEM _v 50	0.3288**
LOGECe(60-80)	-9.0419 + 4.6766LOGEM _v 50	0.3619**

Table 2-24. Multiple regression equation between ECe for EM_h, measured at 50cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-1.6015 + 1.3933LOGEM _h 50	0.3420**
LOGECe(10-20)	-1.3551 + 1.3045LOGEM _h 50	0.3228*
LOGECe(20-40)	-1.4516 + 1.4046LOGEM _h 50	0.4172***
LOGECe(40-60)	-1.3467 + 1.3804LOGEM _h 50	0.4254***
LOGECe(60-80)	-0.9600 + 1.1998LOGEM _h 50	0.3783**

Table 2-25. Multiple regression equation between ECe for EM_v, EM_h measured at 100cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe(0-10)	-0.2695 + 0.5059LOGEM _v 100 + 0.2510LOGEM _h 100	0.1584 ^{VD}
LOGECe(10-20)	-0.0595 + 0.4706LOGEM _v 100 + 0.2002LOGEM _h 100	0.1235 ^{VD}
LOGECe(20-40)	0.2685 + 0.3254LOGEM _v 100 + 0.2402LOGEM _h 100	0.1316 ^{VD}
LOGECe(40-60)	0.4165 + 0.2568LOGEM _v 100 + 0.2782LOGEM _h 100	0.1522 ^{VD}
LOGECe(60-80)	0.5485 + 0.2412LOGEM _v 100 + 0.2325LOGEM _h 100	0.1322 ^{VD}

Table 2-26. Multiple regression equation between ECe for EM_v measured at 100cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-1.1521 + 1.1100LOGEM _v 100	0.1399 ^{VD}
LOGECe(10-20)	-0.7633 + 0.9523LOGEM _v 100	0.1108 ^{VD}
LOGECe(20-40)	-0.5762 + 0.9035LOGEM _v 100	0.1112 ^{VD}
LOGECe(40-60)	-0.5617 + 0.9263LOGEM _v 100	0.1235 ^{VD}
LOGECe(60-80)	-0.2689 + 0.8007LOGEM _v 100	0.1086 ^{VD}

Table 2-27. Multiple regression equation between E_{Ce} for EM_h measured at 100cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	0.5476 + 0.3963LOGEMh100	0.1494 ^{VD}
LOGECe(10-20)	0.7006 + 0.3354LOGEMh100	0.1108 ^{VD}
LOGECe(20-40)	0.7939 + 0.3336LOGEMh100	0.1112 ^{VD}
LOGECe(40-60)	0.8312 + 0.3519LOGEMh100	0.1235 ^{VD}
LOGECe(60-80)	0.9382 + 0.3018LOGEMh100	0.1086 ^{VD}

Table 2-28. Multiple regression equation between E_{Ce} for EM_v, EM_h measured at 100cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe(0-10)	-0.6399 + 0.9092LOGEM _v 150 + 0.1099LOGEM _h 150	0.1872 ^{VD}
LOGECe(10-20)	-0.7014 + 0.9999LOGEM _v 150 + 0.0725LOGEM _h 150	0.1894 ^{VD}
LOGECe(20-40)	-0.6417 + 1.0332LOGEM _v 150 + 0.0192LOGEM _h 150	0.1712 ^{VD}
LOGECe(40-60)	0.1644 + 0.6034LOGEM _v 150 + 0.0446LOGEM _h 150	0.0818 ^{VD}
LOGECe(60-80)	-0.1081 + 0.8081LOGEM _v 150 - 0.0391LOGEM _h 150	0.1001 ^{VD}

Table 2-29. Multiple regression equation between ECe for EM_v measured at 100cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	-1.0124 + 1.1567LOGEM _v 150	0.1627 ^{VD}
LOGECe(10-20)	-0.9472 + 1.1599LOGEM _v 150	0.1776 ^{VD}
LOGECe(20-40)	-0.7067 + 1.0755LOGEM _v 150	0.1703 ^{VD}
LOGECe(40-60)	0.0135 + 0.7017LOGEM _v 150	0.0765 ^{VD}
LOGECe(60-80)	0.0245 + 0.7218LOGEM _v 150	0.0953 ^{VD}

Table 2-30. Multiple regression equation between ECe for EM_h measured at 100cm

MODEL	Regression equation	r ²
LOGECe (0-10)	0.9207 + 0.2016LOGEM _h 150	0.1091 ^{VD}
LOGECe(10-20)	1.0160 + 0.1733LOGEM _h 150	0.0867 ^{VD}
LOGECe(20-40)	1.1319 + 0.1233LOGEM _h 150	0.0490 ^{VD}
LOGECe(40-60)	1.2002 + 0.1054LOGEM _h 150	0.0378 ^{VD}
LOGECe(60-80)	1.2791 + 0.0423LOGEM _h 150	0.0072 ^{VD}

4. 염류도 실측치와 EM_v와 EM_h 값의 다중회귀관계식에 따른 예측치의 비교

(그림 2-9~13)은 지면으로부터 EM측정치로부터 토양 깊이별 EC_e와의 회귀방정식을 구하여 상관관계를 확인한 다음 예측치와 실측치와의 관계를 나타내었다. 예측치 회귀방정식 또한 지면으로부터 30cm까지는 높은 상관관계를 보여주고 있으나 그 이상에서는 낮은 상관관계를 보여주고 있으며, EM_v와 EM_h 모두 변수로 작용할 때 높은 상관관계를 나타내고 있다. 또한 EM_v와 EM_h 각각 하나만을 변수로 회귀방정식을 작성하여 상관관계를 나타내었을 때 EM_v보다 EM_h가 보다 더 높은 상관관계를 보여주고 있는 것으로 미루어 보아 토양의 염도를 수평 모드인 EM_h가 보다 효과적으로 구현하고 있는 것으로 판단되고, 심토에서 상관관계가 높은 경향을 나타내므로 표토 보다는 심토에서 효과적으로 염도를 구현 할 수 있을 것으로 판단된다.

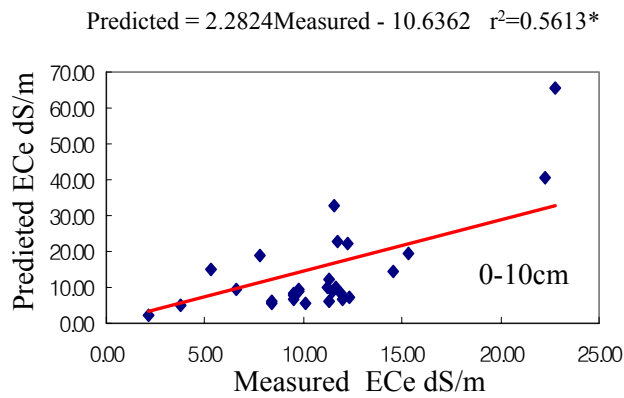


Fig. 2-9. Relationship between measured EC_e(0-10cm) and predicted EC_e(0-10cm) at the soil surface.

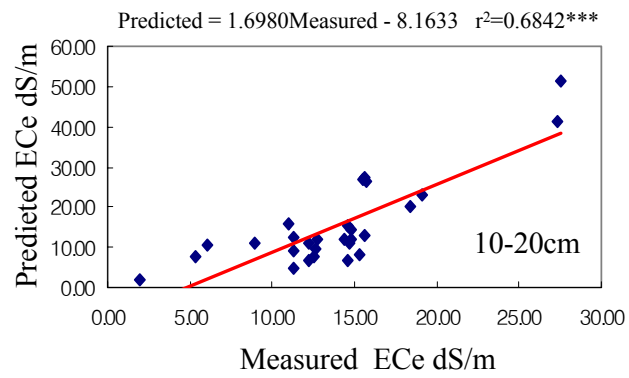


Fig. 2-10. Relationship between measured ECe(10-20cm) and predicted ECe(10-20cm) at the soil surface.

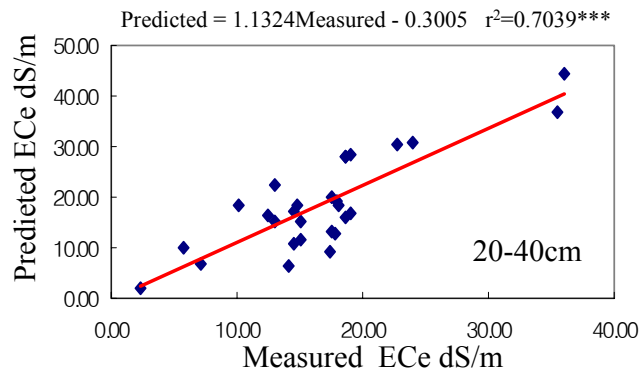


Fig. 2-11. Relationship between measured ECe(20-40cm) and predicted ECe(20-40cm) at the soil surface.

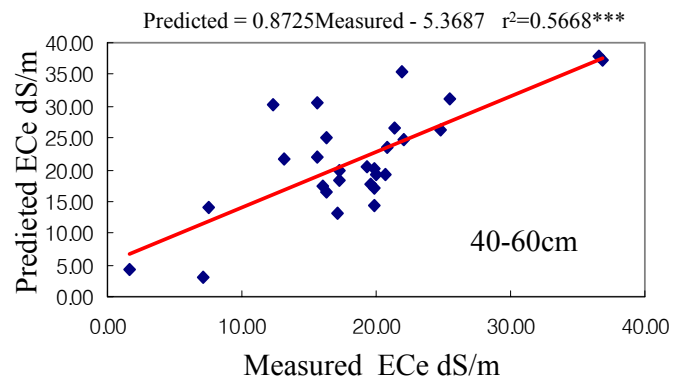


Fig. 2-12. Relationship between measured ECe(40-60cm) and predicted ECe(40-60cm) at the soil surface.

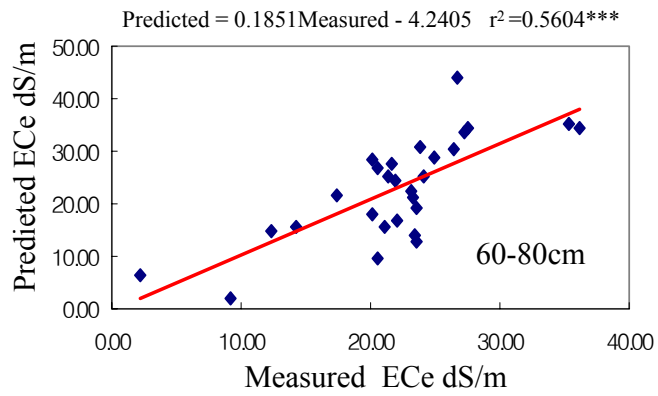


Fig. 2-13. Relationship between measured ECe(60-80cm) and predicted ECe(60-80cm) at the soil surface.

5. EMv와 EMh 값의 다중회귀관계식에 따른 ECE 분포도 작성

(그림 2-14~17)은 (표 2-7)의 모델을 사용하여 산출된 ECGM의 분포도이다.

$$\log(\text{ECGm}) = 17.675\log(\text{EMVS})+7.684\log(\text{EMHS})-55.877$$

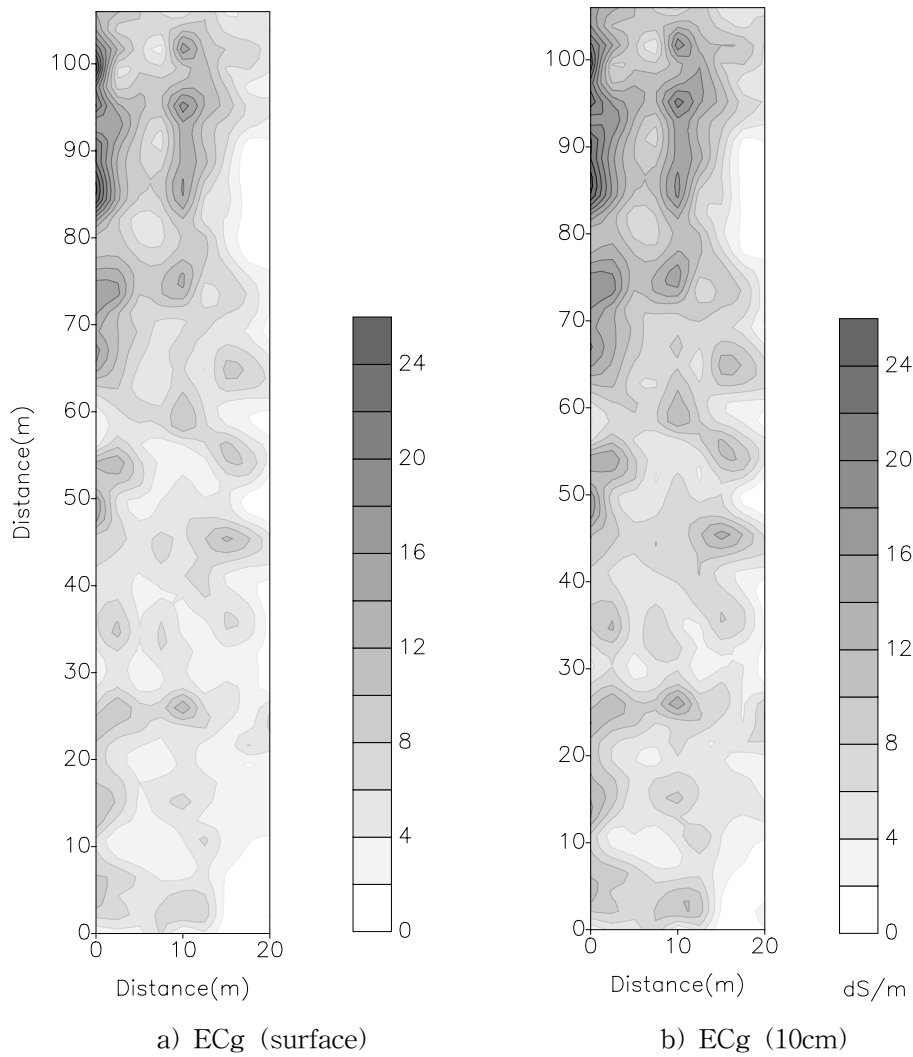


Fig. 2-14. Spatial distribution map of the ground conductivity measured at the surface and 10cm using EM 38 at the Daeho reclaimed area.

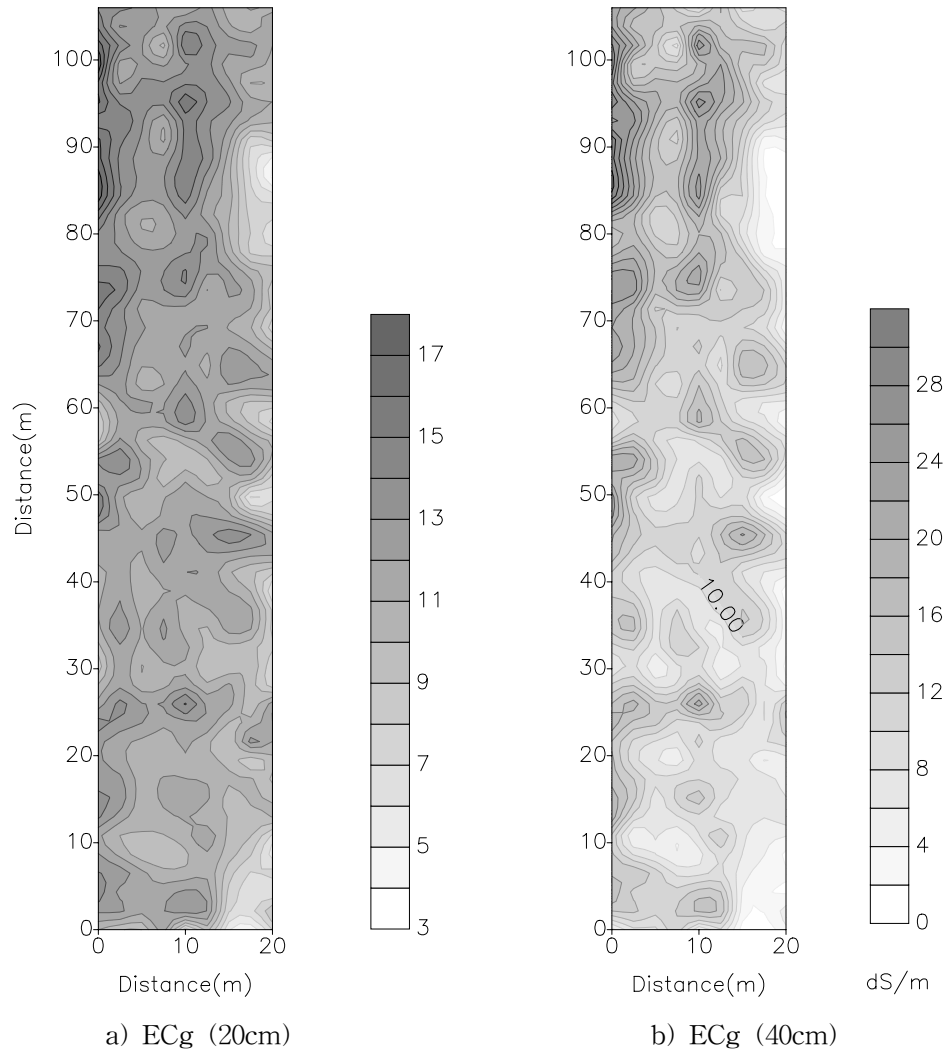


Fig. 2-15. Spatial distribution map of the ground conductivity measured at the 20cm and 40cm using EM 38 at the Daeho reclaimed area.

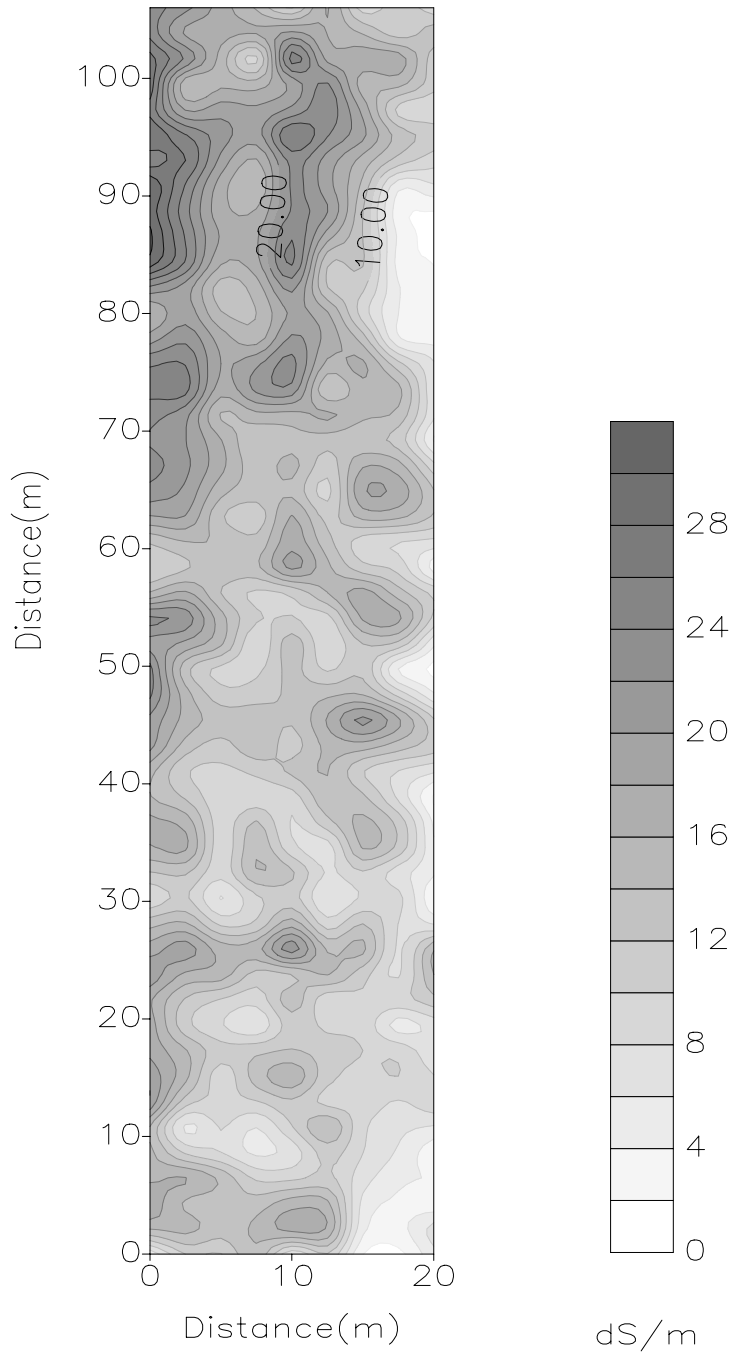


Fig. 2-16. Spatial distribution map of the ground conductivity measured at the surface of the Daeho 60cm using EM 38 reclaimed area.

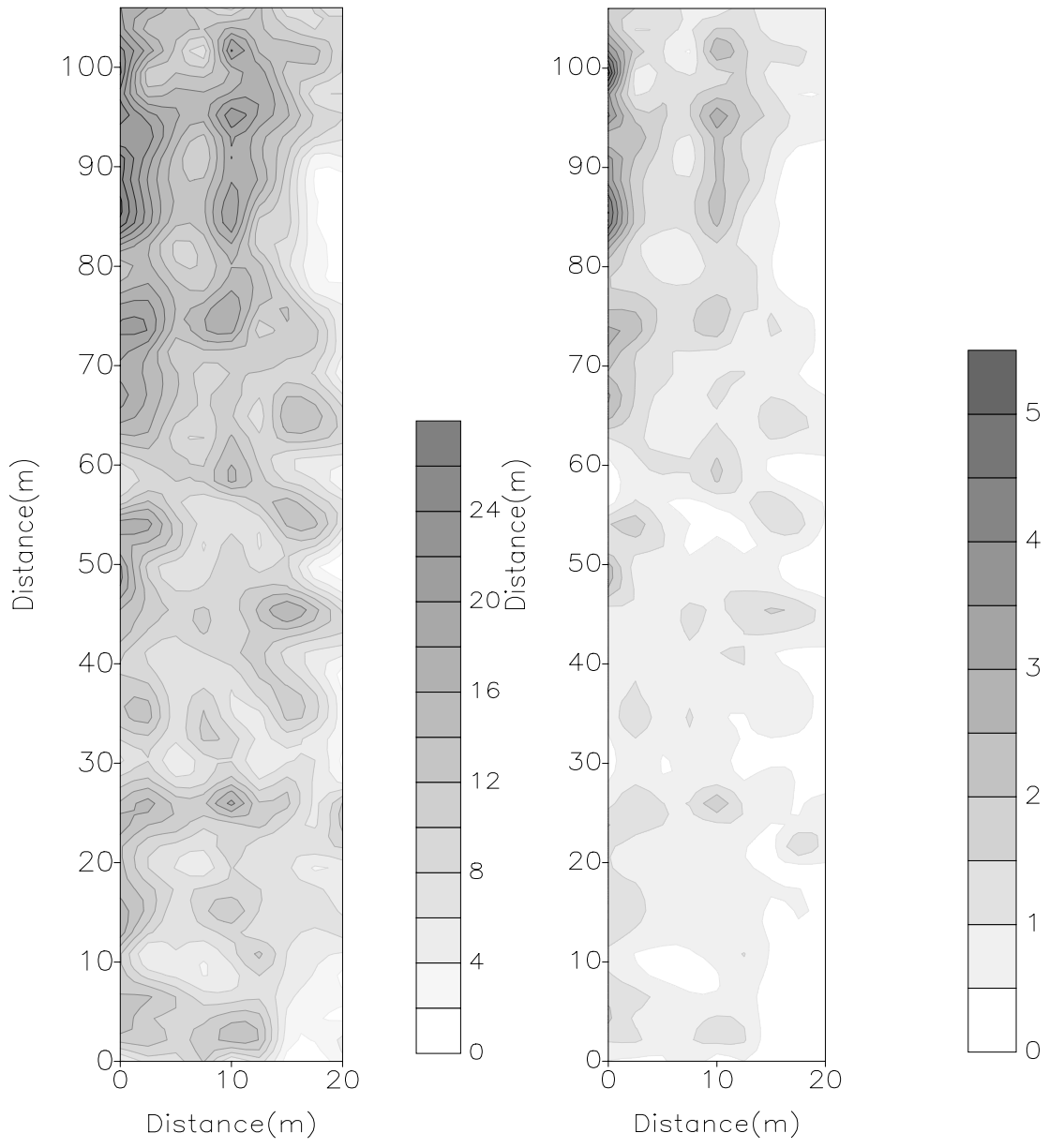


Fig. 2-17. Spatial distribution map of the ECG mean (EMVHS) of the surface of the Daeho reclaimed area

제 5절 EM38측정치에 의한 용탈층 집적층의 구분

EM38의 수평 mode인 EMh는 측정하는 곳의 전방 180. 까지의 토양의 염류를 측정할 수 있고, 수직 mode인 EMv는 2m 깊이까지 토양의 염류를 측정할 수 있다. EMh가 EMv보다 크다면 표토에 염류가 집적되었음을 추측 할 수 있고, 깊이별 회귀방정식을 통해 상층부(0-40cm)와 하층부(40-100)으로 구분하여 염분포도를 작성하면 용탈층과 집적층을 구분할 수 있을 것이라고 판단된다. 이에 각 토양 깊이별 회귀방정식을 통해 간척지 시험 포장의 용탈층과 집적층의 구분을 위한 분포도를 (표 2-6)의 계수를 이용하여 지면에서 측정한 EMh와 EMv의 측정치에 의해 ECe상층부와 ECe하층부의 비율의 회귀방정식을 구하여 분포도를 작성하였다.

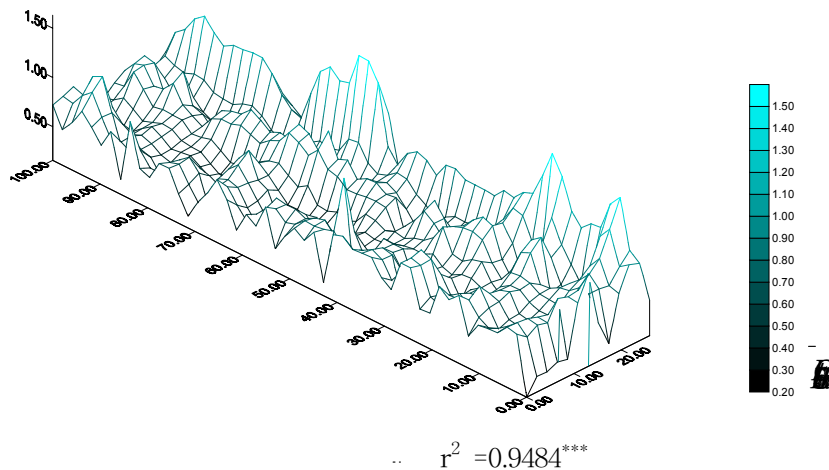


Fig. 2-18. Spatial distribution map of the EC_{up}/EC_{down} at the Daeho reclaimed area.

(그림 2-18)은 (표 2-6)에서 제시된 토양 깊이별 가중치를 각각의 깊이의 ECe에 곱하여 EC_{up} 은 ECe의 상층부(0~40cm)와 EC_{down} 은 EC하층부(40~100)로 구분하여 EM_{hS} 와 EM_{vS} 의 비율에 의해 ECe상층부와 ECe하층부의 비율의 회귀방정식을 구하여 작성하

였다. 분포도를 통하여 ECup/ECdown의 값이 1보다 높은 곳은 염류가 표토에 집적한 것이고, 1보다 작은 곳은 용탈된 층이라고 생각할 수 있다. 이러한 분포도는 시험포장의 배수가 불량한 지역의 염류가 집적된 곳과 배수가 양호한 지역의 용탈된 곳의 위치와 일치한다. 이를 통하여 전자장 유도장치를 이용하여 간척지 토양의 염류의 집적과 용탈을 쉽게 파악할 수 있을 것이라고 판단된다.

제 6절 포화 침출액(ECe)와 토양용액의 EC(1:5)와의 비교

실험실 내에서 염도를 측정하는 방법에는 세가지가 있다. 두가지 방법은 자연 토양 배지에 존재하는 가용성 염 중 토양 용액에 희석하여 추출해 내는 방법이다. 첫째 방법이 포화시킨 후 진공 감압하여 추출하는 것이다. 이 방법이 ECe를 조사하는 포화침출액 법이다. 두 번째 방법은 토양과 물의 비율을 1, 2, 5 또는 10으로 하여 추출하는 방법이다. 이 방법에 의해 측정된 EC를 EC_{1:1}, EC_{1:2}, EC_{1:5}, EC_{1:10}이다. 세 번째 방법은 추출하지 않고 포화 반죽 자체의 EC_p측정하고, 포화점을 측정하여 ECe로 환산하는 방법이다.

이들 방법은 전기전도도의 서로 다른 측정값이다. EC_{1:5}는 토양의 일정 부피에 있는 가용성 염의 측정이다. ECe는 실제 작물이 흡수하는 토양의 상태에 가장 가까운 가용성 염을 측정한다. 그러므로 후자가 작물의 염도에 대한 반응을 더 정확히 반영한다.

포화침출액 EC와 토양과 증류수의 비율을 1:5로 침출한 토양용액의 EC의 상관관계는 (그림 2-19~23)에 나타나 있다. 대호 간척지 논외의 경우 포화침출액 EC (Y)와 1:5로 침출한 토양용액의 EC (x)의 관계식은 $Y = 9.57x + 1.88$ ($r^2 = 0.74$)로서 포화침출액의 EC는 1:5 침출액 EC의 약 10배에 해당된다. 또한 대호 간척지 밭의 경우도 포화침출액의 EC는 1:5 침출액 EC의 약 10배에 해당된다. 영종도 토양의 경우 포화침출액의 EC는 1:5 침출액 EC의 6.4배에 해당되는데 이는 대호간척지 토양 (Silt soil)과 영종도 토양 (Silty clay soil)의 토성에 따른 포화도(sp)의 차이에 기인한다.

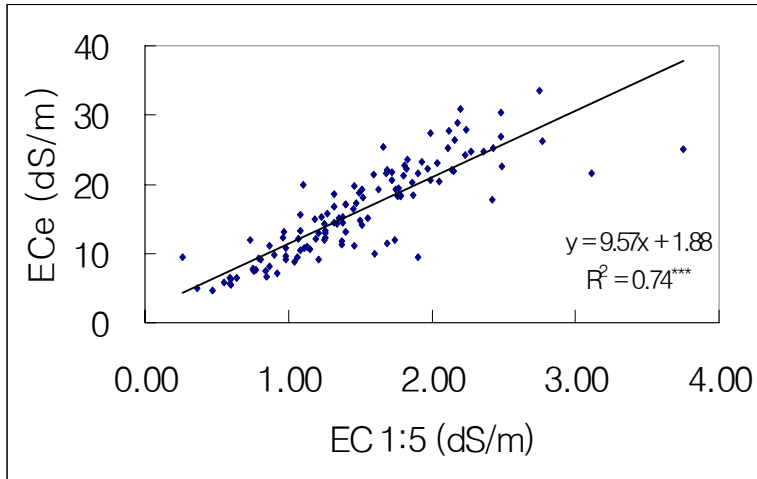


Fig. 2-19. Relationship between ECe and EC (1:5) at the Daeho reclaimed paddy area.

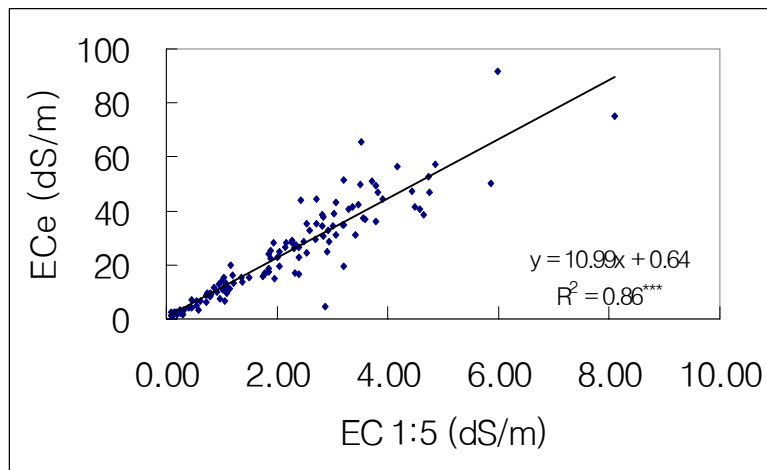


Fig. 2-20. Relationship between ECe and EC (1:5) at the Daeho reclaimed upland area.

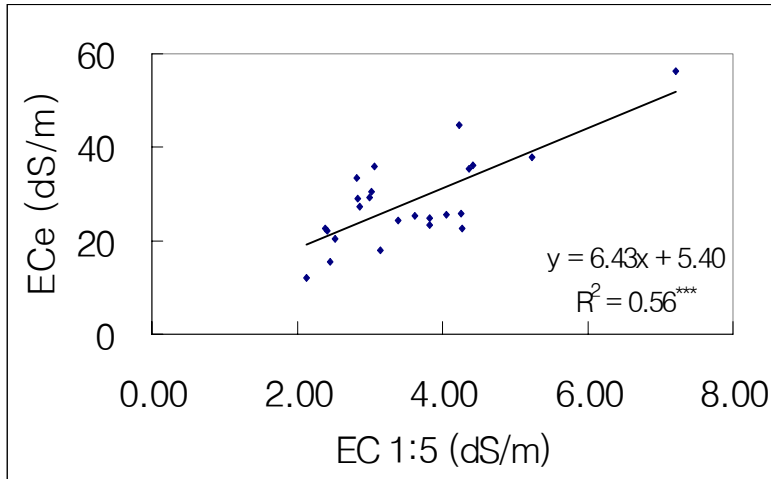


Fig. 2-21. Relationship between ECe and EC (1:5) at the Yeonggong-Do.

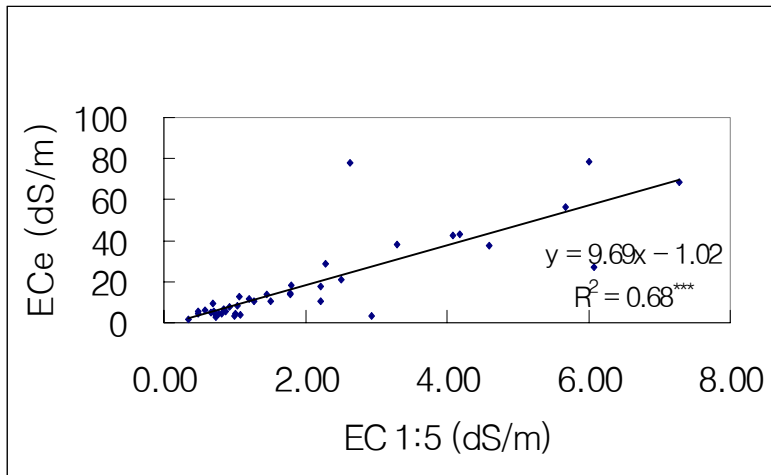


Fig. 2-22. Relationship between ECe and EC (1:5) at the Kimpo reclaimed area.

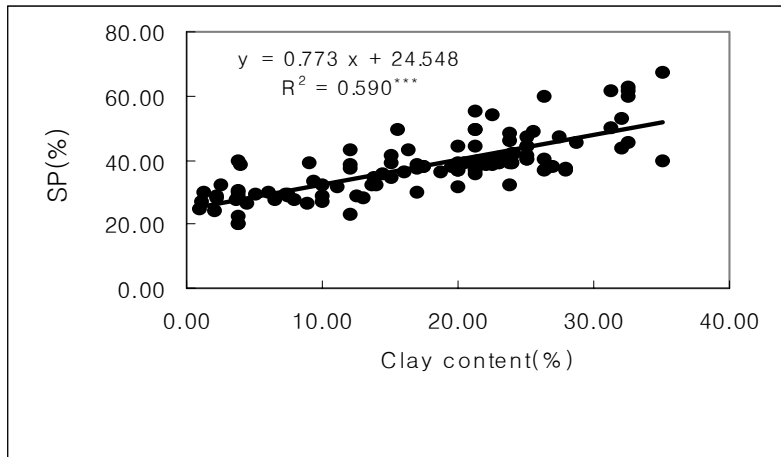


Fig. 2-23. Relationship between saturation percentage and clay content of the reclaimed soil.

제 3 장 전자장 유도장치를 이용한 주요 간척지의 염류도 측정

제 1절 서 론

1. 연구목표 및 내용

넓은 면적의 간척지에서 염의 공간분포를 측정하기 위해서는 현장에서 시료를 직접 채취하여 분석하는 데에 많은 시간과 비용이 소요된다. 넓은 면적의 간척지에서 염의 공간 분포를 효과적으로 구현하기 위해서 대단위 간척지 8개소(해남, 학파, 유당, 태원, 계화, 대호, 석문, 김포)를 대상으로 전자장 유도장치(EM38)에 의해 측정된 수평mode EMh와 수직 mode EMv값 다중회귀식을 이용하여 ECe값을 산정하였으며, 토양의 이화학적 특성을 알아보았다.

2. 연구대상지 현황

우리나라 주요 간척지의 염류도를 조사하기 위해 다음의 대단위 간척지 8개소(해남, 남해, 유당, 태원, 계화, 대호, 석문, 김포)를 선정하여 조사를 실시하였다.

1) 해남지구 간척지

1985년에 간척사업이 시작되었으며, 간척지는 논으로 이용되고 있으며, 수답을 한 지는 대부분 5년 정도이고, 2개의 양수장을 가지고 있다. 전남 해남군 해남읍외 4개면(황산, 마산, 삼산, 화산)에 접해 있으며, 총 개발 면적은 3,711ha이며, 간척지 3,032ha, 배후지 679ha로 구성되어 있다.

2) 학파 농장

전남 영암군 서호면에 1943년에 이미 제방이 완공된 오래된 간척지이다. 일찍부터 부분적으로 개답되었으나, 농지조성이 완료된 것은 1961년 이후이다. 직영시험포 13.3ha를 가

지고 있으며, 나머지는 임대영농 방식을 취하고 있다. 수도 수량은 일반답과 비슷한 수준인 400kg/10a의 높은 수량을 올리고 있다.

3) 유당농장

전남 무안군 청계면에 속하며, 1982년에 준공된 간척지로서 그 면적은 1,077ha이다. 산업용지와 골프장으로 이용되거나 벼가 재배되고 있다. 학파-양장농장은 전남 영암군 서호면에 1943년에 이미 제방이 완공된 오래된 간척지이다. 일찍부터 부분적으로 개답되었으나, 농지조성이 완료된 것은 1961년 이후이다. 개답연수가 오래된 곳의 수도 수량은 일반답과 비슷한 수준인 400kg/10a의 높은 수량을 올리고 있다. 간척이 최근에 이루어진 곳도 있는데, 조사대상지는 개답된 지 5년된 곳으로 염에 대한 피해를 본 적이 없는 곳이었다. 영산강의 물을 관개용수로 이용하고 있었다.

4) 태원농장

전남 무안군 해제면, 신안군 지도면에 1978년에서 1983년에 걸쳐 간척되었으며 간척면적은 1,378ha이다. 대부분 논으로 이용되고 있다.

5) 계화도지구 간척지

전북 부안군 계화도에서 1968년에 간척되었으며, 그 면적은 3,968ha이다. 농경지 중 10ha는 농촌진흥청 호남작물시험장 시험포장으로 이용되고 있으며, 분양된 일반 농가의 경작지는 2,704ha이다. 수량은 현재 일반답 수준으로 높다.

6) 대호 간척지

충남 서산에 있는 간척지로서 민간 기업에 의하여 조성된 간척지 중 가장 넓은 곳이다. 이 간척지는 A지구와 B지구로 나뉘어져 있다. A지구는 충남 서산시와 서산군의 인지, 부석, 해미, 고북 4읍면과 홍성군의 갈산, 서부 2읍면 등 1시 2군 6읍면에, B지구는 서산군의 부석과 태안군의 태안과 남면의 2군 3읍면에 걸쳐 있다. 1980년에 간척공사를 착수하여 1982년과 1984년에 각각 B방조제와 A방조제 물막이 공사가 완료되었으며, 농지면적은 A지구 6,400ha, B지구 3,766ha로서 전체 면적이 10,166ha이다. 회사가 직영하는 대규모 기계화 영농단지로서 한 필지는 240 × 60m²인 1.44ha이다. 1986년경부터 개답된 논에서는 2001년이 15년차로서 수도를 재배하고 있다.

7) 석문 간척지

충남 당진군 석문, 고대, 송산면에 속하며, 1987년에 착공하여 1995년에 준공하였다. 개발면적은 3,750ha(석문공단 885ha 포함)로 논으로 이용하고 있는 지역과 논으로 이용하기 위해 관개수로와 배수로를 정비하는 지역, 그리고 미개발지에는 갈대가 우점하고 있다.

8) 김포매립지

인천광역시 서구 원창도, 경서동, 연희동 일원에 포함된 곳으로 1980년 조성을 시작하여 1991년까지 10개년 동안 조성한 간척지로서 총 간척면적은 3,724ha이며, 이 중 2,075ha는 수도권 쓰레기 매립장으로 환경부에 양도되었으며, 잔여면적 1,649ha만을 대상으로 간척농지 개발사업이 시행되었다. 토지이용현황은 답이 766ha, 전이 337ha, 잡종지가 122ha이다.

제 2절 연구 수행 방법

1. 간척지 토양의 이화학적 특성

연구대상지의 토양의 이화학적 특성을 조사하였는데, 토양의 화학적 특성은 풍건 후 2mm 이하의 입자로 농촌진흥원의 토양화학분석법에 준하여 pH, EC, 유기물, 인산, 양이온 등의 함량을 분석하였으며, 포화침출액 중의 pH, ECe, 양이온 함량을 분석 실시하였다. 물리적 특성은 2mm 이하의 입자에 대해 모래, 미사, 점토의 함량을 조사하였으며, 또한 현장에서 penetrometer에 의한 토양 경도조사와 토양단면, 토양의 수리전도도를 조사하였다.



Fig. 3-1. Measurement of soil physics by penetrometer and sand-fill auger hole method.

2. 전자장 유도장치를 이용한 주요 간척지 토양의 염류도 측정

8개 지구(해남, 학파, 유당, 태원, 계화, 대호, 석문, 김포)간척지에서 EM38 (Geonics)에 의해 수평mode(EMh)와 수직mode(EMv)값의 ground conductivity를 측정하였으며, 각 지역에서 측정된 EM38값의 고저범위별로 calibration을 위한 토양을 깊이별(0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80cm)로 채취하여 실험실로 운반해서 포화반죽을 한 후, 추출하여 E_{Ce}값을 측정하였다. 그리고 측정된 EM38값과 E_{Ce}와의 상관관계를 통하여 각 지역에서 유의성이 가장 높은 회귀식을 산출하였다.

제 3절 간척지 토양의 이화학적 특성

1. 토양의 화학적 특성

우리 나라의 간척지는 대부분 서남해안의 간척지에 조성되어 있다. 간척지 토양의 토성은 사토, 양질사토, 사양토 등 모래가 많은 조립질 토양이 43.2%를 차지하고 있으며, 미사질계 토양은 47.3%, 그리고 점토함량이 많은 식질계 토양은 9.5%이다(농업진흥공사, 1989). (표 3-1)은 토양의 입도조성 즉 점토, 실트 및 모래의 함유율을 기준으로 각 조사대상지의 깊이별 평균값을 나타낸 것이다.

Table 3-1. Particle size distribution and soil texture of the surveyed reclaimed lands.

Area		Particle size distribution (%)			Soil Texture
		Sand	Silt	Clay	
Hakpa	0~10	11.68	62.44	25.88	SiL
	10~20	9.90	68.02	22.08	SiL
	20~40	10.67	64.11	25.22	SiL
	40~60	11.10	55.58	33.32	SiCL
	60~80	10.43	47.96	41.61	SiC
Yudang	0~10	25.93	53.74	20.33	SiL
	10~20	18.60	64.30	17.10	SiL
	20~40	17.67	62.77	19.57	SiL
	40~60	20.33	57.20	22.47	SiL
	60~80	19.22	58.95	21.83	SiL
Taewon	0~10	11.41	63.20	25.40	SiL
	10~20	10.85	70.72	18.43	SiL
	20~40	10.19	69.13	20.68	SiL
	40~60	14.13	74.19	11.68	SiL
	60~80	16.56	67.30	16.14	SiL

(Continued)

Area		Particle size distribution (%)			Soil Texture
		Sand	Silt	Clay	
Haenam	0~10	5.32	64.75	29.93	SiCL
	10~20	3.47	62.28	34.24	SiCL
	20~40	4.68	62.33	32.99	SiCL
	40~60	7.07	61.57	31.36	SiCL
	60~80	5.88	64.62	29.50	SiCL
Seokmun	0~10	13.38	73.95	12.68	SiL
	10~20	12.33	72.08	15.59	SiL
	20~40	10.58	73.85	15.56	SiL
	40~60	12.38	71.03	16.59	SiL
	60~80	12.68	71.68	15.65	SiL
Gyehwa	0~10	69.68	20.48	9.84	SL
	10~20	69.41	20.99	9.60	SL
	20~40	66.78	22.98	10.25	SL
	40~60	67.84	21.76	10.39	SL
	60~80	67.23	22.93	9.84	SL
Daeho	0~10	32.24	55.46	12.30	SiL
	10~20	32.32	55.40	12.28	SiL
	20~40	32.8	55.20	12.00	SiL
	40~60	32.0	55.10	12.90	SiL
	60~80	34.32	52.20	13.48	L
Kimpo	0~10	21.35	64.80	13.85	SiL
	10~20	37.15	49.84	13.01	L
	20~40	20.30	66.86	12.84	SiL
	40~60	27.35	56.61	16.04	SiL
	60~80	28.00	61.95	10.50	SiL

계화지구의 경우는 모래, 미사, 점토의 함유율이 각각 66.78~69.68%, 20.48~22.98%, 9.60~10.39% 범위 내에 분포하고 있어 모래의 함량이 많은 사양토의 토성을 보였으며, 다른 지역의 경우는 3.47~25.43%, 42.40~73.95%, 11.68~41.61%의 범위로 점토함량이 많은 미사질양토, 미사질식양토, 미사질식토의 토성을 나타내고 있었다.

조사대상지에 대한 토양의 화학성을 분석한 결과의 평균값을 (표 3-2)와 (표 3-3)에 나타내었다. 토양의 일반적인 화학적 특성을 보면, 조사대상지역에서 유기물과 유효인산의 경우 4.9~15.7g/kg과 33.01~75.93mg/kg으로 우리나라 논토양 및 밭토양의 평균 유기물과 인산함량 25g/kg, 128mg/kg(농업과학기술원, 1999)보다 낮은 수준을 유지하고 있었으며, 양이온 중 Na, Mg이온의 함량이 높게 나타났다. 염류토의 토양관리에 있어서 가장 중요한 토양의 특성은 간척지 토양의 물리적 특성 이외에 토양포화침출액에 대한 E_{Ce}와 그의 화학적 성분의 조성 및 SAR이다. 염분도는 여러 기준에 따라 평가되는데 치환성염분 퍼센트(ESP)와 염분흡착비(SAR)가 가장 흔하게 이용된다. 전자의 ESP는 토양의 양이온 치환용량에 대한 염분이온의 백분율로 나타내며, ESP가 15이상일 경우 토양은 염분토양으로 평가된다. SAR과 ESP는 식(1)과 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$\dots\dots\dots (1)$$



$$100(-0.0126 + 0.01475SAR) \dots\dots\dots (2)$$

ESP =

$$\frac{100(-0.0126 + 0.01475SAR)}{1 + (-0.0126 + 0.01475SAR)}$$

포화침출액의 E_{Ce}는 4.1~27.49dS/m, SAR은 10.0~36.2의 범위를 나타냈으며, 표토(4.10~25.68dS/m, 10.0~22.7)에서 심토(8.08~27.49dS/m, 17.3~33.5)로 갈수록 높은 경향을 보였다. 이러한 결과는 간척지의 대부분이 논으로 이용되고 있어 표토에서 염농도가 많이 낮아져 있는 것으로 판단된다.

특히 계화지구의 경우 E_{Ce}와 SAR값의 범위가 4.10~8.08dS/m, 10.0~17.3으로 다른

조사지역에 비하여 낮은 수준을 나타냈다(표 3-3). Hayward(1953)에 의하면, 토양의 포화침출액의 E_c가 4dS/cm 이하이면 saline토양, SAR이 13이상이면 sodic토로 구분되며, 이 기준에 따라서 E_c가 4dS/m 이하이고 SAR이 13이하이면 정상토양, 그리고 E_c가 4dS/m 이상이고 SAR이 13이상이면 saline-sodic토로 구분된다고 하였다. 이 기준에 의하면 계화도 간척지의 일부 토양만이 정상토이며, 그 밖의 모든 간척토양은 saline-sodic토이다. 다른 간척지구에 비해 계화도 간척지의 경우 간척년도가 오래되었으며, 배수조각이 잘되어 있고, 농업용수가 풍부하여 염농도와 SAR값이 낮은 수준을 보인 것으로 판단된다.

Table 3-2. Chemical properties of the surveyed reclaimed lands under cropping.

Area	pH	O.M g/kg	P ₂ O ₅ mg/kg	CEC cmol/kg	ESP %	Ext. cations(cmol/kg)				
						Ca	Mg	K	Na	
Hakpa	0~10	6.07	15.7	75.93	8.97	17.7	3.87	6.73	1.67	6.21
	10~20	7.18	13.0	61.37	9.30	23.3	4.08	6.99	2.31	7.34
	20~40	7.75	11.8	52.83	8.73	25.1	3.58	7.06	2.47	8.53
	40~60	7.95	9.0	49.70	10.10	28.6	3.48	6.92	2.57	8.86
	60~80	7.41	6.3	38.77	8.97	30.9	3.64	7.11	2.59	9.01
Yudang	0~10	5.81	9.9	49.77	6.37	24.3	2.43	4.84	0.61	5.89
	10~20	6.34	9.7	48.13	6.17	27.1	2.32	3.75	0.65	5.07
	20~40	7.27	7.5	41.30	6.43	31.3	1.68	3.64	1.13	5.36
	40~60	7.78	6.5	37.90	6.27	33.6	2.05	3.21	1.07	6.32
	60~80	7.80	5.4	37.43	6.83	30.5	1.04	2.83	1.06	6.08
Taewon	0~10	6.94	13.3	43.57	8.93	23.6	4.09	4.86	0.95	6.30
	10~20	7.96	12.3	49.47	8.20	24.3	4.08	5.26	0.85	5.46
	20~40	8.86	10.0	41.13	8.90	34.2	4.41	5.06	1.35	7.02
	40~60	8.47	8.4	36.00	8.93	33.6	3.93	4.62	1.66	7.31
	60~80	8.50	8.0	37.23	7.93	30.2	4.88	4.55	1.66	6.96
Haenam	0~10	8.10	11.9	48.31	12.74	19.1	5.45	6.60	1.80	10.25
	10~20	8.63	8.9	47.17	12.07	21.1	4.44	6.60	1.94	10.09
	20~40	8.56	6.6	42.11	12.76	25.8	4.98	6.51	2.19	10.98
	40~60	8.59	5.1	37.73	12.46	27.1	5.08	6.20	2.24	11.65
	60~80	8.59	4.9	33.01	11.03	27.4	5.21	6.14	2.18	12.92
Seokmun	0~10	8.19	6.4	39.37	12.95	29.8	3.13	7.02	1.35	7.23
	10~20	8.25	6.2	38.95	12.03	27.7	3.68	6.84	1.65	8.01
	20~40	7.81	6.2	35.60	11.63	29.2	3.24	6.74	1.63	8.94
	40~60	7.87	5.8	38.08	12.33	29.8	3.00	6.73	1.83	9.53
	60~80	7.77	5.5	34.95	12.00	32.5	3.72	6.76	2.22	9.96
Gyehwa	0~10	6.51	15.1	62.57	6.23	11.4	2.53	2.53	0.47	3.43
	10~20	7.33	12.4	54.80	6.48	15.4	1.94	1.94	0.71	4.21
	20~40	7.72	10.0	54.88	6.50	17.7	2.17	2.17	0.98	4.56
	40~60	7.40	8.4	45.25	6.42	19.9	2.26	2.26	1.09	4.96
	60~80	7.99	8.0	43.70	6.48	18.8	2.04	2.04	1.12	4.94
Daeho	0~10	7.88	7.0	56.84	11.25	22.5	4.16	6.85	1.41	8.34
	10~20	7.69	4.5	48.22	10.96	22.1	4.23	6.28	1.46	7.99
	20~40	7.76	4.2	37.24	10.84	18.6	4.08	5.21	1.34	6.11
	40~60	7.85	3.5	33.56	11.51	24.1	4.39	5.14	1.61	7.81
	60~80	7.79	3.8	35.41	10.78	25.4	4.44	5.19	1.60	8.44
Kimp'o	0~10	7.54	6.8	39.27	9.12	25.0	3.28	4.13	1.09	6.41
	10~20	7.67	6.5	35.45	8.49	27.4	3.43	3.98	1.14	6.83
	20~40	7.44	6.1	35.15	10.10	26.6	3.41	4.42	0.98	6.57
	40~60	7.53	5.9	34.12	9.84	27.9	3.46	4.51	1.11	6.69
	60~80	7.61	6.1	36.46	9.51	29.7	3.47	4.62	1.24	6.94

Table 3-3. Chemical properties of the saturated extracts of the surveyed reclaimed lands under cropping.

Area	pH	ECe dS/m	Ca	Mg	K	Na	SAR	SP %	
			me/l						
Hakpa	0~10	7.19	4.86	4.01	27.41	3.63	60.47	15.5	46
	10~20	7.30	6.27	3.56	33.54	5.53	91.79	21.6	44
	20~40	7.79	9.76	4.38	45.63	11.06	114.52	23.7	47
	40~60	8.02	12.00	3.80	42.45	7.51	128.25	28.2	47
	60~80	8.05	15.81	3.79	47.54	9.04	155.53	31.1	48
Yudang	0~10	6.83	9.98	6.89	39.24	4.01	101.60	22.7	36
	10~20	6.72	7.45	5.19	27.15	5.69	91.84	26.2	35
	20~40	7.49	9.25	4.59	26.81	7.25	111.49	32.2	31
	40~60	7.69	11.17	4.77	33.94	11.37	143.30	35.2	32
	60~80	7.84	11.98	4.97	29.49	8.78	121.49	30.7	31
Taewon	0~10	7.50	11.68	6.96	30.11	7.48	95.47	22.1	32
	10~20	8.03	5.47	4.89	16.04	4.69	73.28	22.7	29
	20~40	8.05	7.80	3.81	15.76	5.06	111.51	36.2	30
	40~60	7.93	12.69	4.02	26.68	7.84	134.49	35.2	32
	60~80	8.02	10.77	4.03	24.50	7.45	118.11	30.9	33
Haenam	0~10	8.28	13.57	39.96	68.39	9.05	130.77	17.8	40
	10~20	8.33	12.06	26.59	53.61	7.87	120.94	19.7	44
	20~40	8.32	17.73	16.91	64.96	11.42	160.60	25.5	40
	40~60	8.33	21.91	17.00	75.29	13.54	184.96	28.1	40
	60~80	8.22	27.49	19.78	97.36	16.12	219.83	29.5	39
Seokmun	0~10	8.39	8.51	3.49	41.90	4.16	97.10	20.0	38
	10~20	8.37	11.11	3.36	40.75	5.54	127.56	27.1	34
	20~40	7.82	16.58	4.56	53.16	8.11	153.74	28.9	35
	40~60	8.14	22.22	6.62	72.65	10.93	189.72	29.8	35
	60~80	7.95	23.72	7.58	73.93	12.38	209.66	33.5	36
Gyehwa	0~10	7.63	4.10	2.59	12.01	0.78	26.34	10.0	59
	10~20	8.01	6.94	2.26	18.81	2.06	45.46	13.7	47
	20~40	8.08	6.93	2.19	16.15	2.35	49.65	16.0	42
	40~60	8.23	7.51	1.82	13.50	2.32	54.83	18.4	41
	60~80	8.20	8.08	1.97	16.58	2.75	57.62	17.3	41
Daeho	0~10	7.54	25.68	9.57	41.47	9.52	103.38	20.58	37
	10~20	7.38	22.16	9.90	34.28	9.84	93.61	20.10	35
	20~40	7.40	19.66	8.91	27.33	8.79	64.95	16.31	31
	40~60	7.34	21.54	11.11	21.40	10.97	89.73	22.33	32
	60~80	7.39	21.07	12.87	24.37	10.71	102.78	23.91	32
Kimpo	0~10	7.81	18.74	8.81	47.94	8.38	124.68	23.42	39
	10~20	7.83	24.39	7.94	68.44	11.32	146.21	26.44	35
	20~40	7.69	24.28	7.81	64.25	10.87	147.59	25.41	40
	40~60	7.71	23.76	8.31	59.95	11.25	153.42	27.11	38
	60~80	7.74	25.58	9.56	51.34	10.91	189.24	29.55	38

2. 토양의 물리적 특성

가. penetrometer에 의한 토양경도 조사

(1) 김포간척지의 토양경도 조사

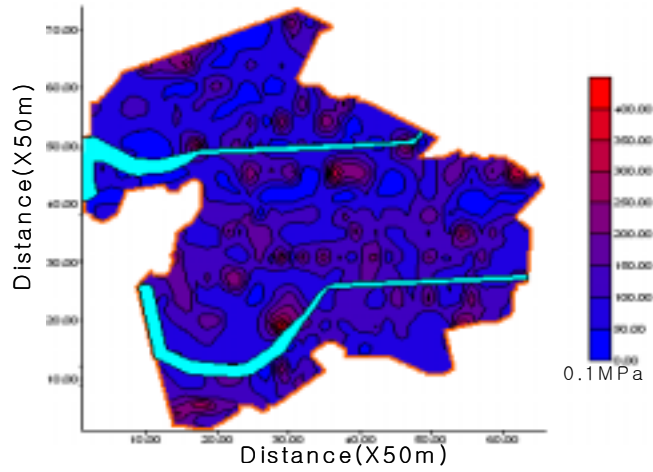


Fig. 3-2. Spatial distribution map of soil hardness(surface soil) using penetrometer in the Kimpo reclaimed land.

2) 대호간척지의 토양경도 조사

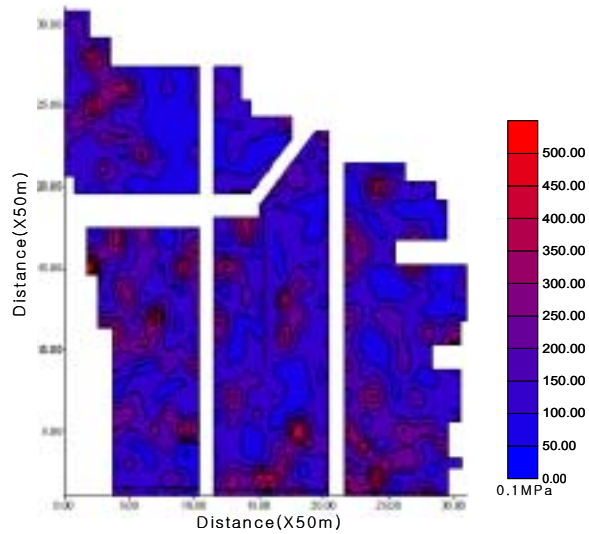


Fig. 3-3. Spatial distribution map of soil hardness(surface soil) using penetrometer in the Daeho reclaimed land.

나. 토양의 수리전도도 측정

(1) sand-fill auger hole method를 이용한 토양수리전도도 측정

기존의 auger hole 방법을 간척지에 이용할 경우, hole 안이 무너져 내리게 되어 일정 깊이 이하의 수리전도도 측정을 할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 지름이 4cm의 다공질관을 이용하였다. Auger로 토양을 시험 목적에 적당한 깊이로 파고 다공질 관을 삽입한다. 다공질 관의 외벽에 공간은 균일한 모래로 채우고, 그 양을 측정한다. 굵은 모래의 수리전도도를 무한대로 보고, hole의 전체 부피와 면적을 계산하였다. 시험에 사용한 공식은 식 (3)과 같다.

$$K = 1.15 r \frac{\log(h(t_i) + r/2) - (\log(t_n) + r/2)}{t_n - t_i} = 1.15 r \tan \alpha \dots\dots\dots (3)$$

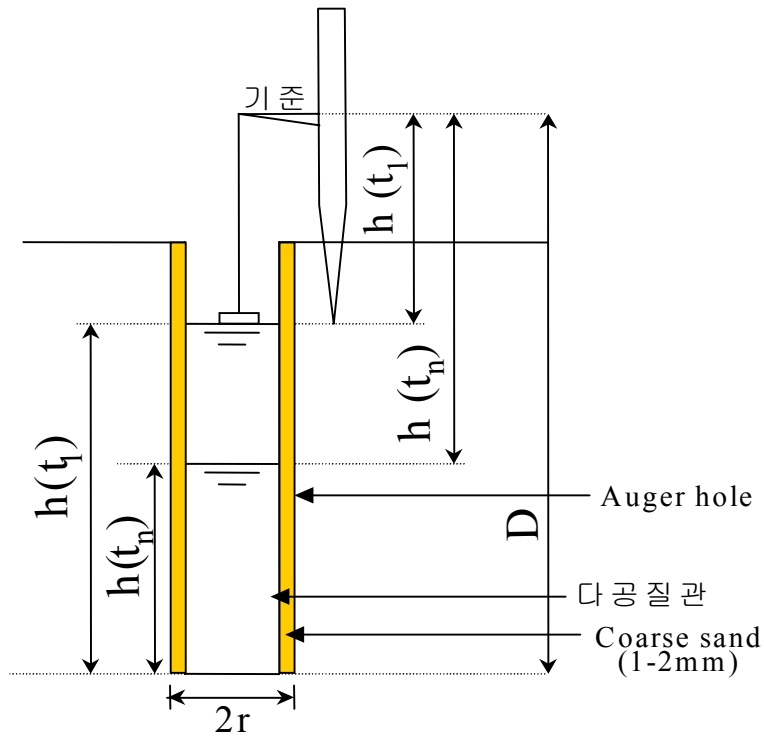


Fig. 3-4. Measurement of hydraulic conductivity by sand-fill auger hole method.

시험이 이루어진 토양은 전기전도도가 12-45dS/cm로 대단히 높은 지역이었으며, 유기물 함량은 2-7g/kg의 범위를 보였는데, plot A가 B보다 2.8g/kg 더 높았다. 수리전도도에 직접적인 영향을 미치는 용적밀도, 입자분포 및 공극율을 살펴보면, plot B가 A보다 sand의 함량이 높고, clay의 함량이 낮으며, 공극율은 plot B가 큰 것으로 조사되었다.

Table 3-4. Hydraulic conductivity of the reclaimed land.

i	t _i sec	plot A			plot B			
		h'(t _i)	h(t _i) cm	h(t _i)+r/2 cm	t _i sec	h'(t _i)	h(t _i) cm	h(t _i)+r/2 cm
1	0	0.0	100.0	101.5	0	0.0	100.0	101.5
2	760	10.0	90.0	91.5	300	27.6	72.4	73.9
3	11508	26.5	73.5	75.0	600	39.0	61.0	62.5
4	16020	30.5	69.5	71.0	900	51.5	48.5	50.0
5	19140	37.5	62.5	64.0	1200	60.7	39.3	40.8
6	20340	39.5	60.5	62.0	1500	70.8	29.2	30.7
7	23040	40.8	59.2	60.7	1800	79.1	20.9	22.4
8	25620	43.7	56.3	57.8	2400	84.5	11.5	13.0

plot A

$$\log(h(t_i) + r/2) - (\log(t_n) + r/2)$$

$$K = 1.15 r \frac{\log(h(t_i) + r/2) - (\log(t_n) + r/2)}{t_n - t_i} = 1.15 r \tan \alpha$$

$$= 1.15 \times 4 \times (\log 96.1 - \log 55.0) / 25716$$

$$= 0.0000434 \text{ cm/sec}$$

$$= 0.037 \text{ m/day}$$

plot B

$$\log(h(t_i) + r/2) - (\log(t_n) + r/2)$$

$$K = 1.15 r \frac{\log(h(t_i) + r/2) - (\log(t_n) + r/2)}{t_n - t_i} = 1.15 r \tan \alpha$$

$$t_n - t_i$$

$$\begin{aligned}
&= 1.15 \times 4 \times (\log 85.3 - \log 2.5) / 2401 \\
&= 0.0029370 \text{ cm/sec} \\
&= 2.54 \text{ m/day}
\end{aligned}$$

plot A가 B보다 수리전도도가 대단히 낮은 것으로 조사되었는데, 이것은 plot A가 B보다 유기물, sand와 clay의 함량이 높고, 공극율이 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, plot A의 경우, 전기전도도가 높은 것은 Na의 농도가 높다는 것을 의미한다. 상대적으로 plot B보다 높은 Na가 토양을 잘 분산시켜 물의 흐름을 방해한 것도 하나의 원인으로 생각된다.

제 4절 전자장 유도장치를 이용한 주요 간척지 토양의 염류도 측정

전자장 유도장치 EM38을 이용한 간척지 토양에서의 염류도 측정시 2장에서 ECe실측치와의 고도의 유의성이 인정되었으며, EM38측정 높이별 유의성은 지면에서 30cm까지 높은 유의성을 갖는다는 결과를 얻을 수 있었다. 그 결과를 토대로 우리나라 주요간척지 8개소에서 지면에서 EM38의 수평mode인 EMh와 수직mode EMv를 측정한 후 ECe실측치와의 상관관계를 이용하여 각 지역에서 가장 유의성이 높은 회귀식을 산출하였다.

(표 3-5)는 조사대상지에서의 토지이용상황에 따른 EM38측정값을 나타낸 것으로, 개답이 오래된 토양일수록 EM38값이 낮은 수치를 나타내고 있으며, 벼농사 지역의 경우는 벼 재배가 양호한 곳보다 불량한 지역의 EM38값이 높게 나타났는데, 이것은 간척지에서 벼의 생육에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 염류도임을 감안할 때 EM측정치가 현장의 염상태를 효과적으로 나타내고 있다고 사료된다. 또한 일반작물이나 식생이 존재하지 않는 나지지역의 EM38값이 높은 수준을 보였으며, 염생식물이 자생하는 지역에서도 높은 수준의 EM38값을 나타내고 있었다. 이러한 EM38측정값의 고저와 그 지역의 식생형태가 유사

한 경향을 나타내고 있으므로, 염해지에서의 작물관리에 있어 품종의 선택과 농가포장 관리에 효과적일 것이라 판단된다.

Table 3-5. Values of EMv and EMh of reclaimed land depending on various land use.

Area	Land used	EMv	EMh
Haenam	Paddy in 2yrs	718 (107~1501)	521 (78~1022)
	Paddy in 5yrs	580 (274~990)	412 (178~682)
	Average	622	460
Kimp'o	Rice(good)	382 (284~538)	269 (192~425)
	Rice(poor)	641 (572~709)	515 (398~631)
	Reeds	428 (350~534)	340 (238~452)
	Poor vegetation	584 (551~625)	515 (453~586)
	Average	456	364
Hakpa	Rice	544 (321~717)	402 (221~596)
Yudang	Rice	221 (43~706)	170 (31~541)
Seokmun	Rice	541 (110~1148)	373 (75~800)
	Halophyte	657 (407~978)	572 (325~1005)
	Reeds	313 (56~852)	225 (14~663)
	Fallow	746 (582~987)	730 (528~1499)
	Average	428	339
Taewon	Rice	363 (160~577)	257 (113~469)

앞의 2장에서 EM38과 토양 ECe와 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었으며, EM38 측정시에 지면으로부터 30cm의 높이 이하에서의 측정치가 토양 ECe와 높은 상관관계를 나타내고 있는 결과를 바탕으로, 본 절에서는 각 간척지구(유당, 태원, 학파, 석문, 해남, 계화, 대호, 김포)에서 지면에서 측정된 EM38의 수평mode(EMh)와 수직mode(EMv)값과 각 지역에서 측정된 EM38값의 고저범위별로 calibration을 위한 토양 깊이별(0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80cm) 시료의 ECe값을 측정하여, 다음의 (표 3-6~8)의 회귀방정식을 작성 할 수 있었다. (표 3-6)은 EM38의 수직 mode인 EMv를 단일 변수로 하여 깊이별 ECe측정치와의 상관관계를 각 지역별로 나타내어 유의성을 알아본 것이다. 대부분의 모든 간척지에서 표토와 심토에서 실측한 ECe와 EMv의 상관관계에서 유의성이 있는 것으로 나타났으며, 특히 대호, 김포 간척지의 경우는 모든 깊이에서 $r^2=0.652^{**}$ ($p < 0.01$) 이상의 고도의 유의성이 있는 것으로 나타났다. 계화 간척지의 표토에서는 ECe와 EMv의 상관관계가 유의성이 없었고, 심토에서 $r^2=0.514^*$ ($p < 0.05$) 이상의 유의성을 나타내었다.

(표 3-7)은 EM38의 수평 mode인 EMh를 단일 변수로 하여 깊이별 ECe측정치와의 상관관계를 각 지역별로 나타내어 유의성을 알아본 것으로, 계화 간척지의 표토를 제외한 모든 지역에서 ECe와 EMh의 상관관계가 $r^2=0.469^*$ ($p < 0.05$) 이상의 유의성이 인정되었다.

(표 3-8)은 EM38의 EMv와 EMh의 두 가지 변수를 깊이별 ECe측정치와의 다중 회귀방정식을 구하여 상관관계를 나타낸 것이다. 모든 조사대상지에서 $r^2=0.624^*$ ($p < 0.05$) 이상의 유의성을 보여주고 있었으며, 특히 유당, 석문 지역에서는 $r^2=0.902^{***}$ ($p < 0.001$) 이상의 매우 높은 유의성을 보여주었다.

(표 3-9)는 모든 조사대상지에서 측정된 EM38값과 ECe값 사이의 상관관계를 알아본 것으로 EMv와 EMh를 단일변수로 하였을 때 $r^2=0.176^*$ 이상의 유의성을 보이고 있으며, 두 가지 변수일 때는 $r^2=0.754^{***}$ 이상의 높은 유의성을 보였다.

이상의 결과에서 EM38의 수직 mode인 EMv와 수평 mode인 EMh를 단일변수로 하여 작성된 (표 3-6)과 (표 3-7)의 회귀방정식을 이용한 ECe값을 산정하기에는 그 지역에서 토양깊이별로 유의성이 없는 곳도 있으므로, 각 조사대상 지역의 염류도를 효과적으로 구현할 수 없을 것이라 판단되며, EMv와 EMh 모두를 변수로 작용할 때가 단일변수일 때 보다 ECe와의 높은 상관관계를 보여주고 있으므로, 조사대상지의 염류도의 정확한 측정을 위하여 (표 3-8)의 다중회귀방정식의 이용이 효과적일 것이라 판단된

다. 또한 (표 3-9)의 식은 EM38을 이용한 ECe 산출시에 실측된 ECe값이 없는 지역에서 효과적일 것이라 판단된다.

Table 3-6. Regression equation between ECe and EMv for different soil depths.

ARea	MODEL	Regression equation	r ²
Yudang	ECe(0-10)	0.0164EM _v + 0.5679	0.844**
	ECe(10-20)	0.0247EM _v - 0.2953	0.886***
	ECe(20-40)	0.0411EM _v - 2.5424	0.814**
	ECe(40-60)	0.0137EM _v + 0.7262	0.641*
	ECe(60-80)	0.0289EM _v - 0.6026	0.978***
Taewon	ECe(0-10)	0.0203EM _v - 2.2824	0.614*
	ECe(10-20)	0.0217EM _v - 2.0309	0.543*
	ECe(20-40)	0.0351EM _v - 4.3715	0.694**
	ECe(40-60)	0.0529EM _v - 7.0858	0.706**
	ECe(60-80)	0.0688EM _v - 13.1646	0.745**
Hakpa	ECe(0-10)	0.0135EM _v - 2.8973	0.625*
	ECe(10-20)	0.0149EM _v - 3.3577	0.853***
	ECe(20-40)	0.0149EM _v - 2.8801	0.530*
	ECe(40-60)	0.0376EM _v - 7.3417	0.918***
	ECe(60-80)	0.0534EM _v - 12.184	0.961***
Seokmun	ECe(0-10)	0.0163EM _v - 0.7448	0.501*
	ECe(10-20)	0.0203EM _v - 0.4169	0.872***
	ECe(20-40)	0.0329EM _v - 1.3315	0.978***
	ECe(40-60)	0.0377EM _v - 1.2645	0.963***
	ECe(60-80)	0.0392EM _v - 1.9623	0.971***

(n=8 : Taewon, Hakpa, Seokmun, n=7 : Yudang)

(continued)

Area	MODEL	Regression equation	r ²
Haenam	ECe(0-10)	0.0035EM _v + 2.1203	0.677**
	ECe(10-20)	0.0098EM _v - 0.5060	0.935***
	ECe(20-40)	0.0259EM _v - 7.1766	0.987***
	ECe(40-60)	0.0397EM _v - 8.3988	0.972***
	ECe(60-80)	0.0548EM _v - 9.7368	0.953***
Gyehwa	ECe(0-10)	0.0084EM _v + 2.2198	0.207 ^{NS}
	ECe(10-20)	0.0133EM _v + 1.7164	0.320 ^{NS}
	ECe(20-40)	0.0302EM _v + 0.5857	0.514*
	ECe(40-60)	0.0337EM _v + 0.4016	0.730**
	ECe(60-80)	0.0438EM _v - 0.9352	0.976***
Daeho	ECe(0-10)	0.1824EM _v - 53.0017	0.955***
	ECe(10-20)	0.1173EM _v - 25.9927	0.980***
	ECe(20-40)	0.0822EM _v - 7.9081	0.954***
	ECe(40-60)	0.0513EM _v + 7.6650	0.865***
	ECe(60-80)	0.0364EM _v + 16.6604	0.711**
Kimpo	ECe(0-10)	0.1504EM _v - 23.8212	0.846***
	ECe(10-20)	0.1182EM _v - 19.4848	0.652**
	ECe(20-40)	0.0788EM _v - 7.9828	0.736**
	ECe(40-60)	0.0688EM _v - 5.6657	0.753**
	ECe(60-80)	0.0528EM _v - 3.1280	0.839***

(n=7 : Daeho, n=8 : Haenam, Gyehwa, n=10 : Kimpo)

Table 3-7. Regression equation between ECe and EMh for different soil depths.

Area	MODEL	Regression equation	r ²
Yudang	ECe(0-10)	0.0225EMh + 0.5234	0.870***
	ECe(10-20)	0.0337EMh - 0.3457	0.906***
	ECe(20-40)	0.0563EMh - 2.6711	0.843**
	ECe(40-60)	0.0179EMh + 0.8089	0.595*
	ECe(60-80)	0.0388EMh - 0.5755	0.965***
Taewon	ECe(0-10)	0.0178EMh + 0.0282	0.567*
	ECe(10-20)	0.0233EMh - 0.8680	0.748**
	ECe(20-40)	0.0359EMh - 1.9613	0.872***
	ECe(40-60)	0.0495EMh - 1.9978	0.739**
	ECe(60-80)	0.0639EMh - 6.4256	0.771**
Hakpa	ECe(0-10)	0.0140EMh - 1.3238	0.545*
	ECe(10-20)	0.0166EMh - 1.9864	0.844***
	ECe(20-40)	0.0163EMh - 1.4703	0.469*
	ECe(40-60)	0.04261EMh - 4.2479	0.949***
	ECe(60-80)	0.0584EMh - 7.0564	0.930***
Seokmun	ECe(0-10)	0.0209EMh - 0.8859	0.572*
	ECe(10-20)	0.0250EMh - 0.2458	0.916***
	ECe(20-40)	0.0398EMh - 0.8349	0.993***
	ECe(40-60)	0.0458EMh - 0.7569	0.986***
	ECe(60-80)	0.0474EMh - 1.3959	0.989***

(n=8 : Taewon, Hakpa, Seokmun, n=7 : Yudang)

(continued)

Area	MODEL	Regression equation	r ²
Haenam	ECe(0-10)	0.0045EMh + 2.3141	0.627*
	ECe(10-20)	0.0131EMh - 0.4097	0.967***
	ECe(20-40)	0.0317EMh - 5.0075	0.849***
	ECe(40-60)	0.0519EMh - 7.2982	0.963***
	ECe(60-80)	0.0735EMh - 9.2982	0.991***
Gyehwa	ECe(0-10)	0.0133EMh + 1.7164	0.320 ^{NS}
	ECe(10-20)	0.0427EMh - 0.3237	0.717**
	ECe(20-40)	0.0429EMh - 0.5002	0.646**
	ECe(40-60)	0.0459EMh - 0.4823	0.838***
	ECe(60-80)	0.0561EMh - 1.5409	0.991***
Daeho	ECe(0-10)	0.3336EMh - 138.2455	0.790**
	ECe(10-20)	0.2185EMh - 83.0756	0.841**
	ECe(20-40)	0.1654EMh - 54.8936	0.954***
	ECe(40-60)	0.1108EMh - 25.9685	0.996***
	ECe(60-80)	0.0811EMh - 8.6042	0.872***
Kimpo	ECe(0-10)	0.1098EMh - 5.9804	0.879***
	ECe(10-20)	0.0908EMh - 6.9152	0.748***
	ECe(20-40)	0.0589EMh + 0.9069	0.802***
	ECe(40-60)	0.0524EMh + 1.7960	0.851***
	ECe(60-80)	0.0372EMh + 9.8469	0.810***

(n=7 : Daeho, n=8 : Haenam, Gyehwa, n=10 : Kimpo)

Table 3-8. Multiple regression equation between ECe and EM_v, EM_h for different soil depths.

Area	MODEL	Regression equation	r ²
Yudang	ECe(0-10)	0.1349EM _h - 0.0832EM _v + 0.5294	0.928***
	ECe(10-20)	0.1539EM _h - 0.0889EM _v - 0.3390	0.937***
	ECe(20-40)	0.3886EM _h - 0.2458EM _v - 2.6528	0.921***
	ECe(40-60)	-0.2413EM _h + 0.1918EM _v + 0.7947	0.932***
	ECe(60-80)	-0.0736EM _h + 0.0832EM _v - 0.5816	0.987***
Taewon	ECe(0-10)	0.0024EM _h + 0.0178EM _v - 2.0649	0.626*
	ECe(10-20)	0.0436EM _h - 0.0235EM _v + 1.9026	0.814**
	ECe(20-40)	0.0539EM _h - 0.0208EM _v + 0.4933	0.897***
	ECe(40-60)	0.0358EM _h + 0.0157EM _v - 3.8536	0.746**
	ECe(60-80)	0.0428EM _h + 0.0244EM _v - 9.2986	0.781**
Hakpa	ECe(0-10)	-0.0688EM _h + 0.0748EM _v - 8.2053	0.796**
	ECe(10-20)	0.0016EM _h + 0.0136EM _v - 3.2365	0.853**
	ECe(20-40)	-0.0589EM _h + 0.0653EM _v - 6.2449	0.624*
	ECe(40-60)	0.0755EM _h - 0.0297EM _v - 1.5138	0.957***
	ECe(60-80)	-0.0451EM _h + 0.0936EM _v - 15.665	0.969***
Seokmun	ECe(0-10)	0.21771EM _h - 0.1645EM _v + 2.2893	0.902***
	ECe(10-20)	0.1055EM _h - 0.0673EM _v + 1.0536	0.978***
	ECe(20-40)	0.0661EM _h - 0.0219EM _v - 0.4108	0.996***
	ECe(40-60)	0.1049EM _h - 0.0495EM _v + 0.1986	0.997***
	ECe(60-80)	0.0904EM _h - 0.0359EM _v - 0.7032	0.994***

(n=8 : Taewon, Hakpa, Seokmun, n=7 : Yudang)

(continued)

Area	MODEL	Regression equation	r ²
Haenam	ECe(0-10)	0.0002EMh + 0.0034EMv + 2.1185	0.677*
	ECe(10-20)	0.0093EMh + 0.0029EMv - 0.5837	0.974***
	ECe(20-40)	-0.0131EMh + 0.0355EMv - 7.0676	0.999***
	ECe(40-60)	0.0237EMh + 0.0224EMv - 8.5970	0.988***
	ECe(60-80)	0.0541EMh + 0.0153EMv - 10.189	0.997***
Gyehwa	ECe(0-10)	0.1381EMh - 0.0993EMv + 0.6829	0.887***
	ECe(10-20)	0.2102EMh - 0.1333EMv - 1.7107	0.937***
	ECe(20-40)	0.2562EMh - 0.1697EMv - 2.2656	0.965***
	ECe(40-60)	0.1769EMh - 0.1043EMv - 1.5676	0.975***
	ECe(60-80)	0.0496EMh + 0.0051EMv - 1.4878	0.992***
Daeho	ECe(0-10)	-0.0983EMh + 0.2283EMv - 23.4269	0.963***
	ECe(10-20)	-0.0287EMh + 0.1307EMv - 17.3663	0.981***
	ECe(20-40)	0.0856EMh + 0.0422EMv - 33.6637	0.983***
	ECe(40-60)	0.1188EMh - 0.0042EMv - 28.0924	0.997***
	ECe(60-80)	0.1058EMh - 0.0131EMv - 15.1855	0.882**
Kimpo	ECe(0-10)	0.0735EMh + 0.0539EMv - 13.3603	0.891***
	ECe(10-20)	0.0964EMh - 0.0084EMv - 5.7705	0.749**
	ECe(20-40)	0.0507EMh + 0.0122EMv - 0.7705	0.804***
	ECe(40-60)	0.0523EMh + 0.0001EMv + 1.7801	0.851***
	ECe(60-80)	0.0139EMh + 0.0346EMv + 5.1018	0.852***

(n=7 : Daeho, n=8 : Haenam, Gyehwa, n=10 : Kimpo)

Table 3-9. Regression equations between E_{Ce} and E_{Mv}, E_{Mh} for whole 51 soil samples.

Model	E _{Mv}	E _{Mh}	Intercept	r ²
ECe(0-10)	-0.1254	0.1814	4.2116	0.754***
		0.0589	-4.2989	0.449***
	0.0351		0.5456	0.176*
ECe(10-20)	0.1736	-0.1157	1.6642	0.865***
		0.0606	-6.1877	0.560***
	0.0379		-1.8450	0.242**
ECe(20-40)	-0.0635	0.1218	0.0264	0.863***
		0.0598	-4.2830	0.738***
	0.0444		-2.4368	0.447***
ECe(40-60)	-0.0239	0.0781	-0.3480	0.846***
		0.0548	-1.9672	0.823***
	0.0452		-1.9263	0.619***
ECe(60-80)	0.0890	0.0474	-1.0622	0.832***
		0.0560	-0.4580	0.829***
	0.0560		-2.0195	0.752***

(n = 51)

제 4 장 전자장 유도장치(EM38)에 의한 주요 간척지 염류도 공간변이성 해석

제 1절 서 론

조사지역 염류도의 공간분포를 효과적으로 구현하기 위해 공간통계학을 적용하여 variogram의 계산과 정의, modeling등의 공간통계학의 기능들을 이해하여 그 지역에 적합한 적정 variogram model의 선정과 전자장 유도장치(EM38)의 유효측정거리의 산출을 하였다.

간척지에서의 환경 보존형 정밀농업을 위해서 무엇보다도 염류도의 공간적 분포 특성을 파악하는게 중요하다. 최근 주목받고 있는 정밀농업은 포장내의 공간변이에 대응하여 적절한 재배관리를 수행함으로써 작물의 안정생산, 농자재의 적정투입 및 환경부하의 경감을 추구하는 것으로, 선진국에서는 이미 친환경 농업을 위한 토양 영양상태의 분포도 작성에 관한 연구가 활발히 수행되어지고 있다(Sudduth, 2001).

토양의 변이성에 대한 학문적인 인식은 일찍이 1800년대 후 토양의 비옥도를 다루는 농학자들에 의해 제기되어 왔으나 이에 대한 본격적인 연구는 통계학이 도입된 1900년대 이후이다. 초기의 토양 변이성 연구는 조사 대상지에서 반복으로 채취된 토양시료에 대한 이화학적 분석치의 변이를 해석하는 고전통계학(classical approach)적 방법에 의하였다. 그러나 고전통계학적 방법은 시료의 표준집단에 대한 정보만 제공해 줄뿐이며, 표본수가 적거나 시료채취가 편향된 경우 오차발생이 필연적이다. 전통적인 통계학과는 달리, 지질통계는 공간적으로 종속된 자료의 분석을 이용하여 어떤 변이 자료가 공간적으로 종속된 범위에 대한 정보를 제공한다. 가까운 위치에서의 공간적 종속은 먼 거리간의 공간적 종속보다 근본적으로 크다(Webster and Oliver, 1990). 지역적 변이에 기반을 둔 지질통계는 공간변이의 변이구조와 공간변이를 분석하는 도구로 활용한다. Bakhsh 등(2000), Borgelt 등(1997), 정 등(2000)은 정밀농업에서 지질통계학을 적용하는 것에 대해 연구하였다.

비파괴 전자장 유도장치인 (EM38)을 이용하여 간척지 토양의 염분포도와 공간변이성을 수행해 나가기 위해서는 정확한 간격으로 토양시료를 채취하여 포장내의 변이를 기

록하는데 최적인 최우선의 방법은 variance 해석에 있다. 예를 들어 설명하자면 포장내의 변이를 측정하기 위해서 각 자료점의 variance를 계산한다. 하나의 variance를 계산하기 위해서는 두 개의 자료 값을 취해 두 자료간의 차이를 제곱한 후 2로 나눈다. 각 계산에 이용된 두 점 사이의 거리를 lag라고 하는데, 모든 lag값을 표시하여 그래프를 만들고 이 그래프에서 자료를 적합시키기 위해서 만들어진 직선을 variogram이라고 하고, 여기서 경사 부분은 시료간의 거리에 따라 특성이 얼마나 빨리 변하는 가를 나타낸다. 따라서 상대적으로 평평한 직선은 한 점에서 다른 점으로 이동할 때 자료 값의 변화가 완만하다는 것을 의미하고, 반대로 경사가 급한 것은 자료가 아주 급격히 변한다는 것을 의미한다. 이러한 variogram을 통한 간척지 토양의 공간변이성 파악과 이해를 통해 분포도 작성시 sampling site의 거리를 결정할 수가 있으며, 간척지 토양의 분포도 작성시의 오차를 줄여 나갈 수 있을 것이다.

가. Variogram의 정의

Variogram은 지질통계학적인 평가에 가장 기초적이고 중요한 도구로서 분포도 작성시 sample site의 거리의 정보와 토양의 특성의 변화정도를 알려주는 중요한 정보를 내포하고 있으며 다음과 같이 정의한다.

$$Z(x) - Z(y) = \dots \dots \dots (4)$$

식(4)는 variogram은 vector의 기능으로서 거리와 방향의 기능을 한다. 여기서 $Z(x)$ 는 variable(on the average), h 는 distance increase along a given direction을 의미한다. variogram의 특성은 방향성에 따라 거리 h 가 증가할수록 Z 값이 변화하게 된다.

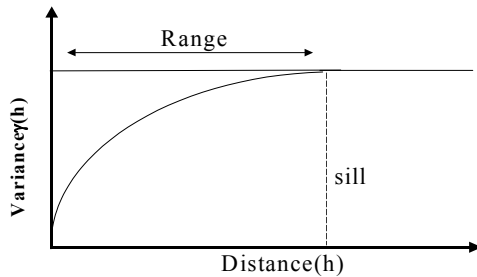


Fig. 4-1. Idealized variogram graph.

(그림 4-1)은 이상적인 variogram model이다. 처음에는 증가하다가 나중에는 증가하

는 비율이 줄어든다. variance는 lag의 증가와 함께 증가하고, 그대로 무한히 증가하는 경우도 있지만 그림에 표시한 것처럼 어느 거리에서 최대값에 도달하는 일이 많다. 이 최대값을 sill(S)이라고 말하고, 얻어진 데이터의 분산과 거의 같다. 또한 실에 도달했을 때의 lag를 range(R)라고 말한다. range는 공간의존성의 한계를, 실측한 2지점 이상의 데이터로부터 그 사이에 존재하는 측정하지 않은 값을 추측할 수 있는 데이터의 내삽입이 가능한 범위를 표시하는 중요한 값이다. 한편, lag를 0에 무한히 접근시키면 이론적으로는 semivariogram은 0으로 되어야 하지만, 실제로는 많은 경우에 정의 값을 가진다. 이 lag 0에서는 semivariance를 nugget(N)라고 부른다. Nugget는 샘플링간격 이하의 공간변이와 실험오차 등의 설명할 수 없는 우연의 변이를 표시하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나, semivariogram은 반드시 그림과 같은 커브를 그리지 않고 다양한 형태로 표시된다. 또한 계측한 샘플수와 위치에 따라서도 산출되는 세미베리언스의 값과 조합수가 다르다. variogram graph을 구현하기 위한 3가지 기초적인 개념인 Continuity, Zone of influence, Anisotropies 등의 세 가지가 연관되어 이상적인 variogram을 생성할 수가 있다.

1) Continuity(연속성)

Continuity(연속성)은 매우 밀접한 거리에 있는 변이들에 대한 완만성에서 언급되고 처음의 variogram graph에서 증가하는 $\gamma(h)$ 의 비율에 의해서 결정된다.이론상 $\gamma(0)=zero$ 이나 실제에는 변이가 존재하게 된다. 이러한 현상을 Nugget effect(C_0)라고 하고, 이것은 측정과정에서 오차를 나타내는 현상이다. nugget이 높을수록 오차도 증가하게 된다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서는 분석동안 nugget effect(C_0)를 최소화하고, FE(fundamental error)와 GE(geographic error)의 사이에서 시료를 채취하여야 한다. 만약 nugget effect(C_0)가 높으면 공간적인 연속성과 data의 독립성은 상실되게 된다.

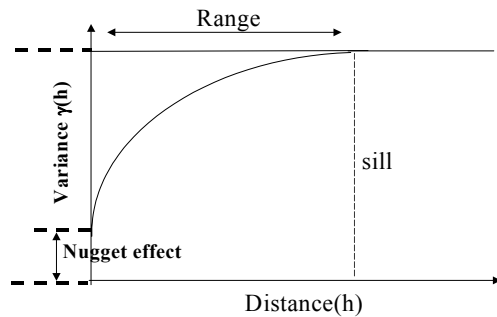


Fig. 4-2. Nugget effect graph.

2) Zone of Influence

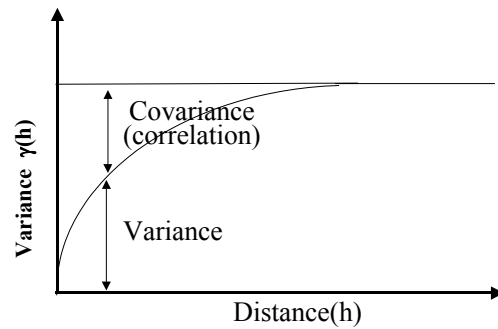


Fig. 4-3. Idealized variogram showing correlation and variance components.

Zone of Influence은 대부분 시료채취 주위의 영향을 주는 요인들에 대한 이해와 통찰력에 이용된다. 이것은 일반적으로 시료채취지역의 정확성의 정도로부터 일정한 거리에 대해서 예측할 수 있고, 지정된 위치의 유사성이 있는 거리에서 예측할 수 있다. 거리가 증가할수록 variance도 증가하게 되어 상관요소도 감소하게 된다. 그러므로 variogram zone의 특성의 범위는 지정된 sample 사이의 유사성이 있는 거리에서 제공되어 진다.

나. Variogram Models

1) Spherical Model

spherical model은 variogram modeling에서 가장 많이 사용하는 기능이다. 급속히 기울기가 증가하다가 완만한 평형을 이룬다.

$$h \leq a$$

~~h~~ C - Co h <a



a = the range

Co = nugget effect

sill = C + Co

2) Exponential Model

Exponential Model은 시각적으로 spherical model과 유사하나 더욱 연속적인 과정들을 포함한다. 처음에는 급속히 증가하다가 완만한 비율로 평형을 이룬다. 이 모델은 kringing 동안 커다란 (-)부분이 생기는 경향을 조심하여야 한다.



3) Gaussian Model

Gaussian model은 전형적으로 짧은 거리의 지극히 작은 변이에서의 model과정으로 이용하고, 처음에는 포물선의 형태인 model이다.



4) Hole effect Model

Hole effect Model은 주기적인 모델에 사용한다. 이 현상의 형태는 높고 낮은 농도의 지역의 연속적인 곳에서 생긴다. 이 model은 Gaussian model과는 다르게 처음에는 희미한 포물선을 나타낸다. 최대값에 도달하면 그래프는 위 아래로 면적이 줄어들면서 진동한다. Hole effect model은 sine model인 exponential model과 연결되어 있다. 모델식은 다음과 같다.



제 2절 연구 수행 방법

우리나라 주요 간척지의 염류도를 조사하여, 각 간척지에 대한 염 분포도를 효과적으로 작성하기 위하여 대단위 간척지 8개소(해남, 남해, 유당, 태원, 계화, 대호, 석문, 김포)에서 염류도의 공간변이성 해석을 통하여 variogram model의 선정과 전자장 유도장치(EM38)의 유효측정거리의 산출을 하였다.

1. 염류도의 공간변이성 해석을 위한 공간통계학의 적용

대호 간척지에서 암거배수의 설치로 인한 염의 분포형태를 쉽게 파악할 수 있는 시험포장과 인근의 벼 재배 농가지역을 대상으로 EM38측정값을 공간통계학(variogram model)에 적용하여 그 지역에서 염의 공간변이를 효과적으로 나타내주는지 알아보았다.

2. 주요 간척지 염류도의 공간변이성 해석

간척지 토양 중 염분포도의 효과적인 구현을 위해 조사 대상지 8개 지역에서 한 구획을 50m×50m간격으로 grid 형태의 전자장 유도장치(EM38)값을 측정하였다. 측정된 정보를 대상으로 기술통계(descriptive statistics)와 함께 공간의존성을 해석하는 공간통계학을 적용하여 세미베리어그램(Semi-variogram)에 의한 공간의존성 및 공간의존성 지표값을 해석하였으며, 각 조사 대상지 염분포도의 효과적인 구현을 위해 전자장 유도장치(EM38)의 유효측정 거리의 산출과 적정 variogram model을 선정하였다. 이상의 해석에는 공간통계학의 해석 소프트웨어 GS⁺ Version 3.1 for Windows(Gamma Design Software)을 이용했다.

제 3절 염류도의 공간변이성 해석을 위한 공간통계학의 적용

1. EM38에 의한 염류도 공간변이성 해석

가. 대호간척지 시험포장의 공간변이성 파악

(그림 4-4, 5, 6, 7, 8)은 대호간척지 토양의 variogram을 나타내고 있다. 대호간척지 시험포장의 남북 방향과 대각선 방향은 spherical 모델을 따르고 있으며, 동서방향은 hole effect 모델을 따르고 있다. Spherical 모델은 측정치 값의 변이가 크지 않은 곳에서 나타나는 모델로서 남북 방향과 대각선 방향은 이 모델의 형태를 나타내고 있다. 그 이유는 대호 시험 포장의 주배수로와 배수가 불량한 지역의 변이가 크므로 variogram의 기울기가 크며, sill 또한 높은 값을 나타내고 있다고 판단된다.

대호 간척지의 동서 방향의 variogram은 hole effect 모델의 형태를 따르고 있다. 이러한 모델을 나타내고 있는 이유는 암거배수관이 10m 간격으로 설치되어 있으므로 측정치의 값이 주기적으로 변화하게 되어 sine곡선의 형태로 주기적인 변화를 나타내고 있다고 판단된다.

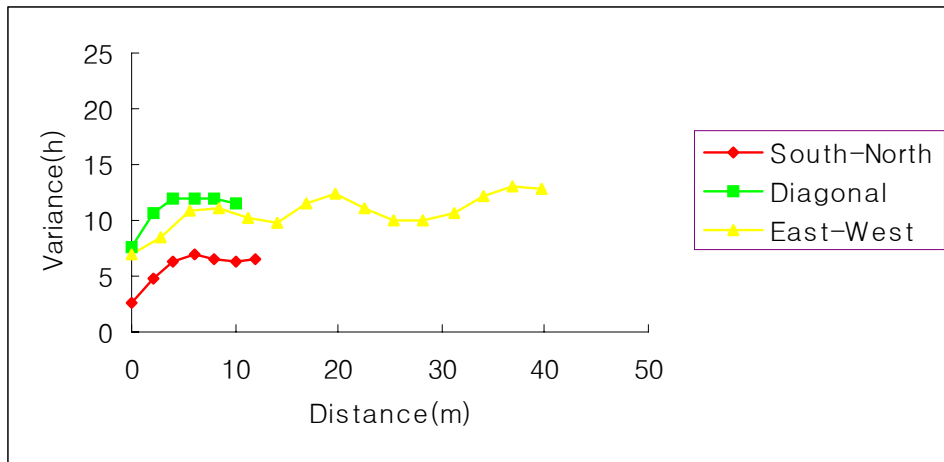


Fig. 4-4. Variograms of EMh at different directions.

(그림 4-4)는 수평 mode인 EMh의 variogram을 나타내고 있다. variogram의 기울기가 EMv, ECg에 비하여 완만한 형태로 나타내고 있다. 이는 토양의 수평적 염류도는 수직적인 염분포도에 비해 변이가 적다는 것으로 판단되며, nugget effect의 크기는 대각선, 동서, 남북방향의 순으로 나타났으며, 이러한 경향이 나타나는 이유는 실험 오차, 측정 오차외의 간척지 토양의 특성인 지하수의 불균일로 인한 지역적인 배수의 불량에 의한 원인으로 사료된다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서는 FE(fundamental error)와 GE(geographic error)의 사이에서 시료를 채취하여야 한다.

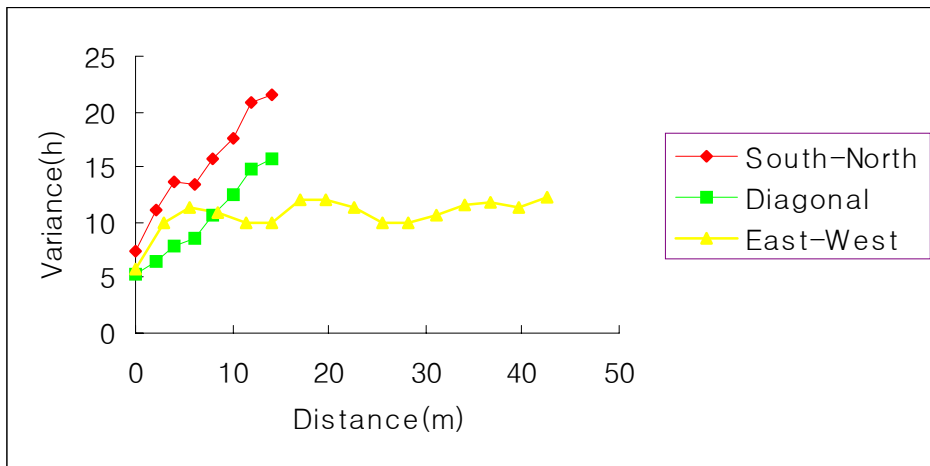


Fig. 4-5. Variograms of EMv at different directions.

(그림 4-5)는 수직 mode인 EMv의 남북방향, 대각선 방향의 variogram은 EMh와 마찬가지로 spherical의 형태를 나타내고 있으며, 동서방향은 암거배수관의 영향으로 hole effect model의 경향을 보이고 있다. EMv variogram의 기울기는 EMh에 비해 급한 경향성으로 변이의 정도가 작음을 알 수 있다. 그리고 sill은 EMh에 비해 매우 높은 값을 나타내고 있다. 이런 경향으로 대호 시험포장의 염류도는 수직적인 분포가 수평적인 분포보다 변이가 크다고 생각할 수 있다.

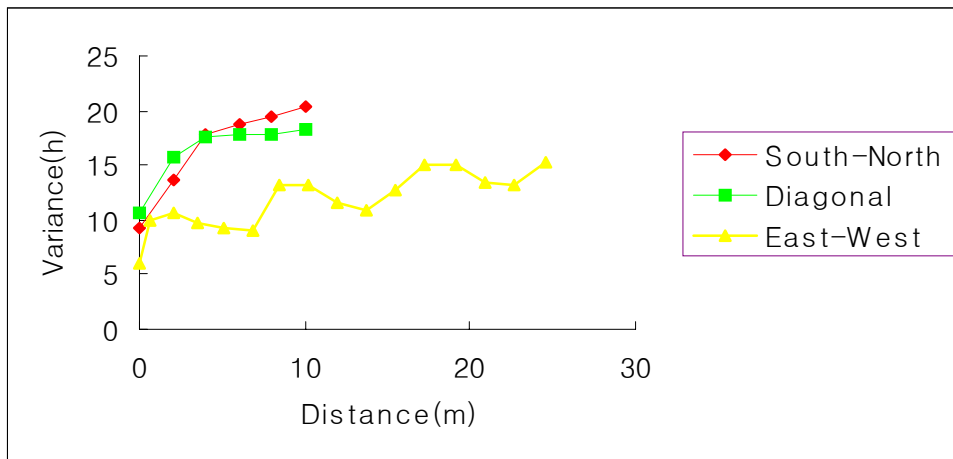


Fig. 4-6. Variograms of ECgM at different directions.

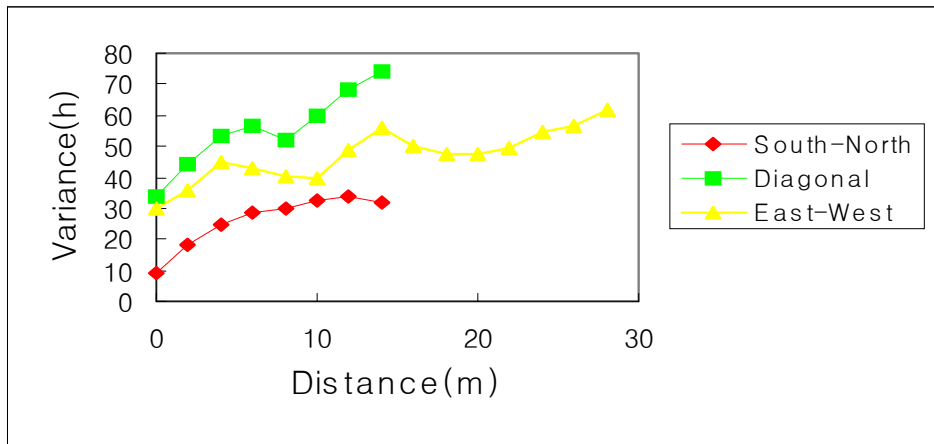


Fig. 4-7. Variograms of ECgH at different directions.

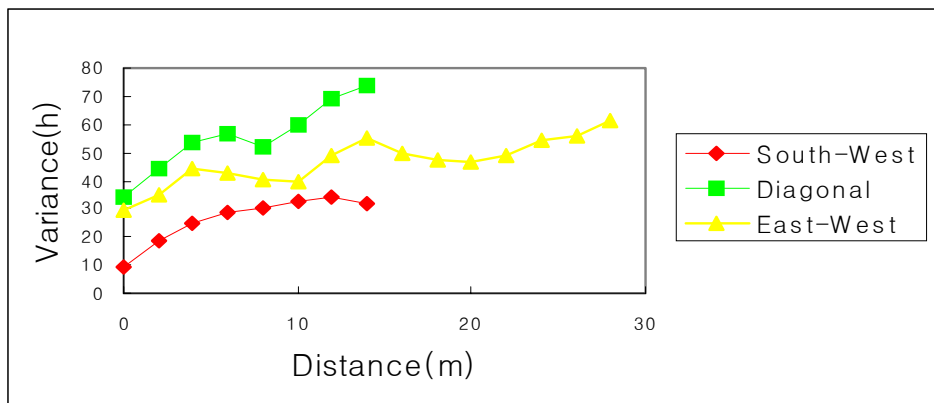


Fig. 4-8. Variograms of ECgV at different directions.

(그림 4-6, 7, 8)은 (표 2-6)의 가중치계수를 이용한 회귀방정식을 통한 ECgM, ECgH, ECgV의 variogram을 나타내고 있다. EMv, EMh의 variogram과 같은 경향을 나타내고 있었으며, EMv, EMh와 비교하여 급한 기울기와 높은 sill을 가지고 있어, 앞의 두 variogram에 비해 높은 변이를 가지고 있으며, 그 이유는 배수가 양호한 지역과 배수가 불량한 지역의 염의 집적과 용탈된 층의 큰 변이의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 3가지 방향 중 동서방향이 가장 길게 나타나는 이유는 시험포장의 모양이 가로 100m, 세로 20m로 직사각형을 이루고 있기 때문에 동서방향의 variogram이 더욱 더 길게 나타나는 경향을 보였다. 위의 variogram에서 나타나듯이 간척지 시험포장의 변이가 큰 경향을 잘 구현

하고 있으며, 분포도 작성시 sill의 높이에 있어서 거리를 측정할 결과 남북방향, 대각선 방향, 동서방향의 적정거리는 약 8, 8, 10m 거리안에서 측정하여 분포도를 작성하여야만 대호간척지 시험포장의 암거배수관과 주배수로, 배수불량 지역의 염분포를 효과적으로 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 대호간척지 일반 경작지(논)의 공간변이성 파악

대호간척지 토양의 일반 농토양에서의 공간변이성과약을 수행하기 위하여 전자장 유도장치인 EM38의 variogram을 작성하였다. 대호 시험포장과는 달리 일반 경작지는 분포도 하부에 있는 주배수로 만이 설치된 지역으로 변이가 크지 않은 지역이므로 sill의 높이와 기울기 또한 높지 않으므로 변이의 차이가 크지 않고 측정위치에 따라 값의 차이가 크지 않게 나타났다.

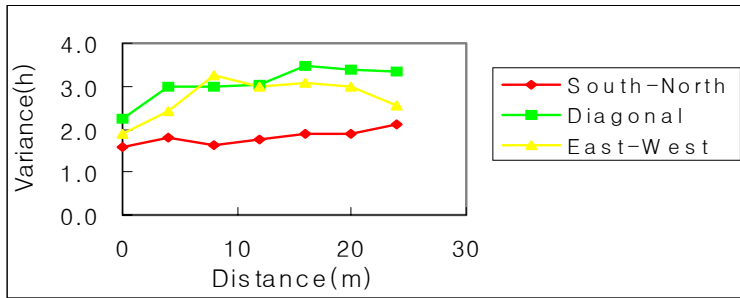


Fig. 4-9. Variograms of EM_V at different directions at paddy farm in Daeho reclaimed area.

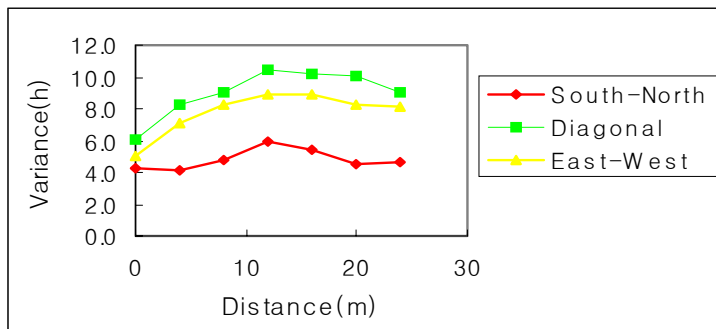


Fig. 4-10. Variograms of EM_h at different directions at paddy farm

in Daeho reclaimed area.

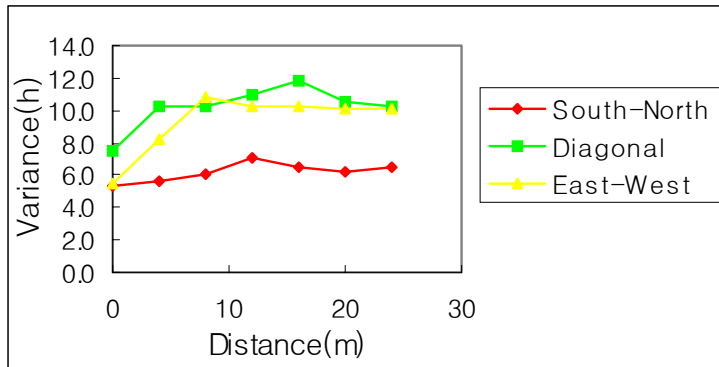


Fig. 4-11. Variograms of ECgM at different directions at paddy farm in Daeho reclaimed area.

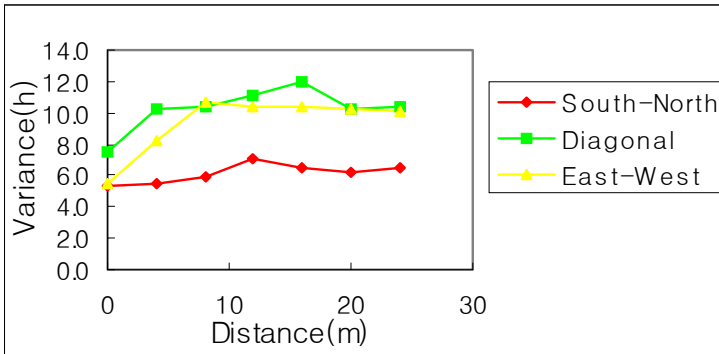


Fig. 4-12. Variograms of ECgV at different directions at paddy farm in Daeho reclaimed area.

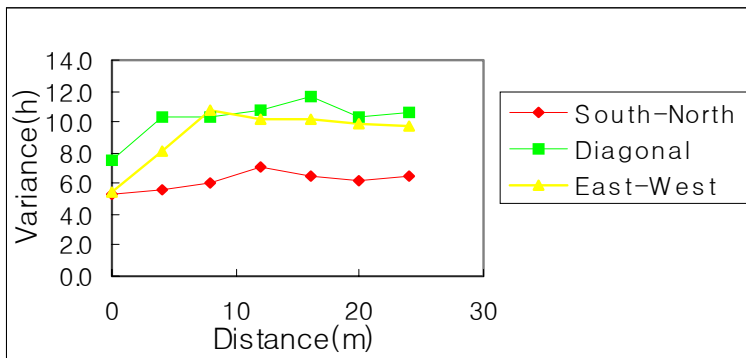


Fig. 4-13. Variograms of ECgH at different directions at paddy farm

in Daeho reclaimed area.

(그림 4-9~13)은 각각 일반 논 경작지의 EM_V , EM_H , $ECgM$, $ECgV$, $ECgH$ 의 variogram을 나타내고 있다. 대호간척지 시험포장과는 달리 남북, 대각선, 동서방향의 variogram은 모두 spherical model의 형태를 나타내고 있다. 이는 암거배수관과 같은 영향이 없기 때문에 주기적인 변화를 갖지 않기 때문이다. 대호간척지 시험포장에 비해 sill의 높이와 기울기에 의한 변이 정도는 매우 작은 경향을 보이고 있다. 이는 시험포장에 비해 측정위치별 값의 변이가 매우 작기 때문이라고 판단되며, 시험포장과 같이 sill의 높이와 기울기에 의해 수직적인 분포가 수평적인 분포에 비하여 변이가 큰 경향을 나타내고 있었다. sill의 높이와 기울기의 경사는 대각선 방향과 동서방향이 남북방향의 variogram에 비하여 큰 경향을 나타내고 있었다. 이는 하단에 배수로의 영향으로 염분의 변이가 남북방향의 변이보다 크게 나타났기 때문이다.

제 4절 주요 간척지 염류도의 공간변이성 해석

본 연구에서는 조사대상지 8개 지역에서 구획을 50m×50m간격으로 하여 전자장 유도장치(EM38)값을 측정하였다. 측정된 정보를 대상으로 기술통계(descriptive statistics)와 함께 공간의존성을 해석하는 공간통계학을 적용하여 Semivariogram에 의한 공간의존성 및 공간의존성 지표값을 해석하여, 전자장 유도장치(EM38)의 유효측정거리의 산출과 적정 variogram model을 선정하였다.

가. EM38측정치의 기술통계학적 해석

조사대상지역에서의 EM38측정값인 EM_V 와 EM_H 의 최소값, 최대값, 평균값 그리고 변이계수를 보면 (표 4-1)과 (표 4-2)에서와 같다. EM38측정값의 평균(EM_V : 116~622, EM_H : 81~445)은 지역적으로 많은 차이를 보였으며, 특히 계화간척지의 경우 다른 조사 지역에 비하여 2~6배 낮은 수준의 EM38값을 나타내었다. 공간 변이계수는 유당, 석문, 계화 지역에서 EM_V 48.27%, EM_H 58.33% 이상으로 상당한 변이를 보이고 있는데, 이것은 동일 지역 내에서 토지이용형태와 지하수위의 차이에 의해 염류의 분포가 불균일적으로 심화된 것으로, 공간변이에 따른 토양관리가 필요하다고 판단된다.

Table 4-1. Descriptive statistics of EMv for the reclaimed lands.

Area	Minimum	Maximum	Average	CV(%)
Yudang	43	706	220.84	56.95
Taewon	160	577	363.18	25.34
Hakpa	321	717	543.73	14.01
Seokmun	28	1148	455.75	48.27
Haenam	107	1501	622.09	31.81
Gyehwa	12	772	116	68.16
Daeho	14	597	367.98	26.92
Kimpo	24	657	374.15	23.69

Table 4-2. Descriptive statistics of EMh for the reclaimed lands.

Area	Minimum	Maximum	Average	CV(%)
Yudang	31	541	169.68	60.16
Taewon	113	469	257.35	30.36
Hakpa	221	596	401.62	17.07
Seokmun	3	1499	363.79	58.33
Haenam	78	1022	445.58	33.08
Gyehwa	4	842	81.43	73.54
Daeho	9	492	276.45	30.07
Kimpo	14	782	314.33	36.45

나. EM38측정치의 공간통계학적 해석

(그림 4-14)는 조사대상지 8개 지역에서 구획을 50m×50m간격으로 하여 측정된 EM38값의 semivariogram을 나타낸 것으로, 횡축은 lag, 종축은 semivariance로 나타내었다. semivariogram으로부터 이것에 수학적모델(spherical, exponential, linear, linear to sill, Gaussian)을 회귀시켜 각 조사지역의 Nugget, sill 그리고 range와 Q값을 (표 4-3~10)에 나타냈었다. Q값은 sill(S)과 nugget(N)로부터 다음과 같은 식(5)에 의해 계산하였다.

$$Q = \frac{S - N}{S} \quad (5)$$

이 값은 nugget가 sill에 대해서 큰 비율을 차지할수록 즉, Q값이 작을수록 가까이에 위치한 점 상호간의 측정값의 연속성은 작아져 측정값은 임의적으로 나타나게 된다. 이 측정값의 연속성을 공간구조라고 부르고 연속성이 높을 때(Q값이 1에 가까울 때) 공간구조가 강하고, 역으로 연속성이 낮을 때(Q값이 0에 가까울 때) 공간구조는 약하다고 한다. Range는 공간적으로 연속이 있는 거리로서 공간거리 의존성을 표시하는 지표값으로 range가 구해지는 경우 공간거리 의존성의 대소가 고찰 가능하다.

(그림 4-14)의 semivariogram에 수학적모델(spherical, exponential, linear, linear to sill, Gaussian)을 적용시켜 결정계수(r^2)가 높고, 공간구조의 강도를 나타내는 Q값이 높은 model을 조사지역에서의 적정 variogram model로 선택하였다.

학파, 유당, 김포, 계화 간척지는 spherical model, 석문, 대호 간척지는 exponential model, 태원, 해남 간척지는 linear to sill model을 따르는 것으로 나타났다. 조사대상지역에 적합한 model을 적용시켰을 때 공간의존성을 나타내는 지표인 Q값은 0.823~0.999로 공간구조가 강함을 알 수 있었고 공간의존거리를 나타내는 range는 132~453m로 나타났다 (표 4-3~10).

조사대상지역에서 EM38 측정시 두 지점사이의 유효측정 거리를 학파 132m, 유당 194m, 태원 133m, 석문 441m, 해남 133m, 계화 412m, 대호 453m, 김포 384m 이내에서 측정하면, 염지도 작성을 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

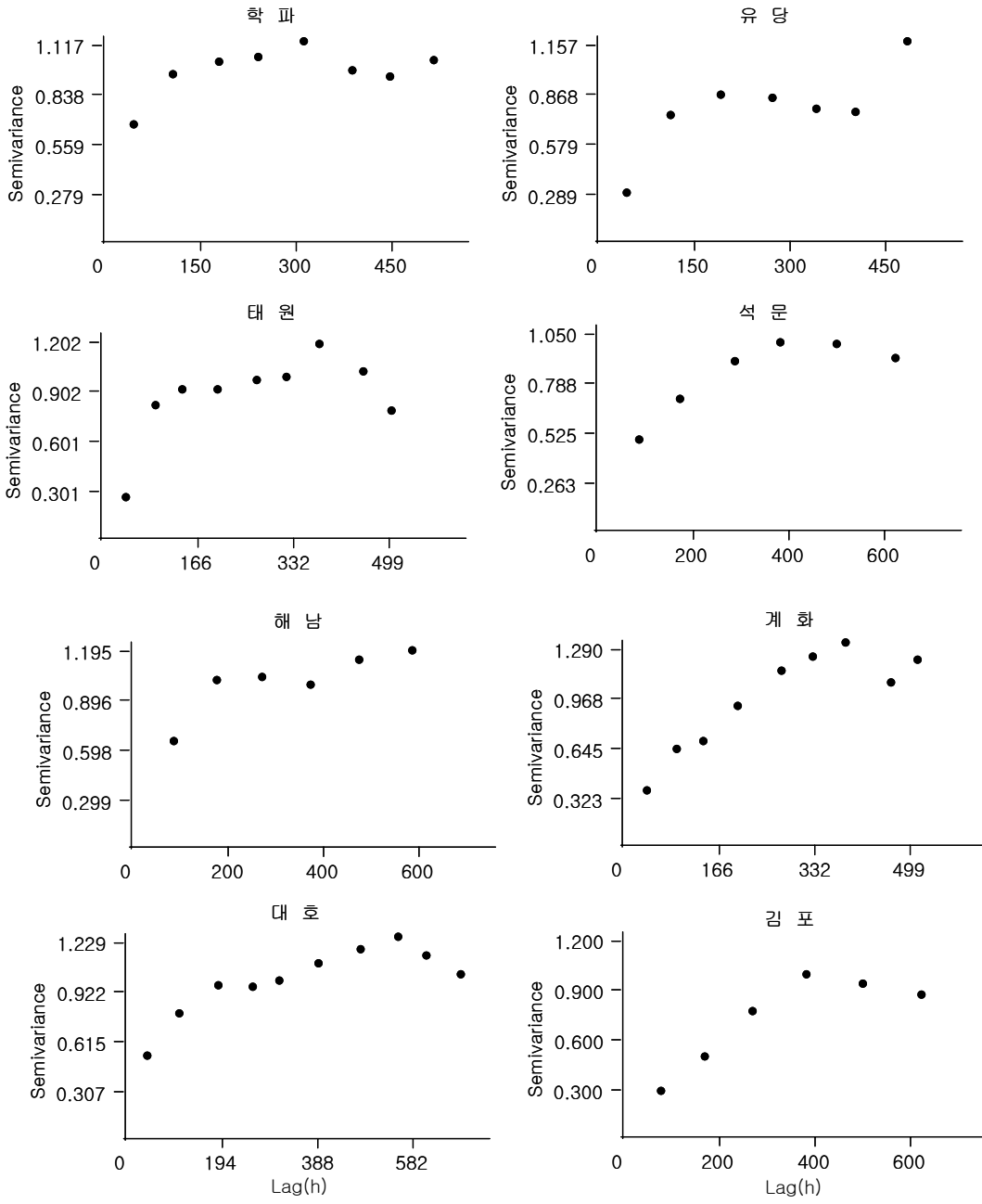


Fig. 4-14. Semivariograms of the surveyed reclaimed lands.

Table 4-3. Geostatistical parameter of EMh in the Hakpa reclaimed land.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.178	1.006	132	0.823	0.831
Exponential	0.229	1.020	168	0.775	0.799
Linear	0.815	1.051	445	0.225	0.247
Linear to sill	0.192	0.997	89	0.807	0.806
Gaussian	0.196	1.002	294	0.804	0.823

Table 4-4. Geostatistical parameter of EMh in the Yudang reclaimed and.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.001	0.871	194	0.999	0.749
Exponential	0.001	0.919	300	0.999	0.704
Linear	0.425	1.048	517	0.594	0.599
Linear to sill	0.007	0.870	145	0.992	0.722
Gaussian	0.021	0.869	444	0.976	0.722

Table 4-5. Geostatistical parameter of EMh in the Taewon reclaimed and.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.001	0.992	191	0.999	0.807
Exponential	0.001	1.025	261	0.999	0.771
Linear	0.628	1.107	557	0.433	0.327
Linear to sill	0.001	0.983	133	0.999	0.817
Gaussian	0.062	0.991	453	0.937	0.825

Table 4-6. Geostatistical parameter of EMh in the Seokmun reclaimed land.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.223	0.986	424	0.774	0.981
Exponential	0.001	1.013	441	0.999	0.952
Linear	0.552	1.083	684	0.490	0.647
Linear to sill	0.237	0.970	297	0.756	0.965
Gaussian	0.356	0.987	1089	0.639	0.976

Table 4-7. Geostatistical parameter of EMh in the Haenam reclaimed land.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.001	0.987	189	0.999	0.807
Exponential	0.001	1.012	252	0.999	0.768
Linear	0.665	1.089	617	0.389	0.285
Linear to sill	0.001	0.980	133	0.999	0.816
Gaussian	0.068	0.987	453	0.931	0.824

Table 4-8. Geostatistical parameter of EMh in the Gyehwa reclaimed land.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.172	1.181	412	0.854	0.949
Exponential	0.026	1.272	528	0.980	0.887
Linear	0.445	1.339	556	0.668	0.754
Linear to sill	0.217	1.178	321	0.816	0.952
Gaussian	0.309	1.184	1044	0.739	0.940

Table 4-9. Geostatistical parameter of EMh in the Daeho reclaimed land.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.469	1.110	503	0.577	0.877
Exponential	0.258	1.117	453	0.769	0.889
Linear	0.668	1.208	721	0.447	0.659
Linear to sill	0.250	1.042	182	0.760	0.770
Gaussian	0.536	1.097	1155	0.511	0.857

Table 4-10. Geostatistical parameter of EMh in the Kimpo reclaimed land.

Model	Nugget	Sill	Range	Q value	r ²
Spherical	0.141	0.983	384	0.971	0.980
Exponential	0.085	1.017	450	0.961	0.973
Linear	0.158	1.065	550	0.864	0.985
Linear to sill	0.165	0.977	287	0.857	0.985
Gaussian	0.317	0.984	814	0.785	0.971

제 5 장 주요 간척지 염지도 작성

제 1절 서론

염류도의 토양 특성 자료의 정보화를 통한 환경 보전형 정밀 농업을 수행하기 위해서는 그 지역에서의 염의 분포와 변이를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 이러한 염류도의 공간적 분포를 GPS(Ground positioning system)에 의한 측정지점 위치 자료의 수집과 kriging기법을 이용한 염지도의 작성을 통해 자료화 할 수 있다.

Kriging기법은 정밀농업에서 사용되는 가장 복잡하고 정확하게 예측할 수 있는 보간법으로서 토양의 특성과 같은 자료가 많을수록 좋은 보간값을 찾을 수 있는 것이다. Kriging이란 semivariogram에 의해 구해져 있는 공간영역에 있어서 관측값의 공간의존성을 이용해 영역의 임의점의 추정값을 주변의 관측값의 가중치를 선형결합에 의해 구하는 방법이다.



= is the separation (in map coordinates),

A = is the component's Length parameter,

θ = is the anisotropy angle,

p = is the anisotropy ratio.

이러한 기법은 거리를 이동할 때 자료의 값의 변화정도를 쉽게 예측할 수 있다. kriging 기법은 $\frac{1}{n}$ 의 제곱의 형태로 나타낸다. 거리 (h)를 결정하는 데 θ , A, p에 따라서 거리를 추정해가면서 data을 예측하는 보간법으로서 정방향의 계산일 때는 $\cos\theta$ 와 $\sin\theta$ 의 값이 0, 1이므로 계산이 용이하나 비정방향(anisotropy)일 때는 계산이 매우 복잡하다. 이러한 kriging 기법을 올바르게 사용하기 위해서는 적절한 variogram을 작성하여야 하며, 이러한 수행을 해나가기 위해서는 수많은 자료값이 필요하다. 만약 자료가 충분하지 않다면 variogram의 기울기의 값이 정확하지 못하여 변이의 높고 낮음의 파악이 힘들며, 분포도 작성시 적정 거리를 구할 수 없게 된다.

GPS(Ground positioning system)에 의한 측정지점 위치 자료와 함께 조사하여 GIS(Geological Information System)를 응용하면 한 지역에서의 염의 분포와 변이를 정확히 파악해 낼 수 있는 잇점이 있으며, 그 적용성이 커진다.

제 2절 연구 수행 방법

1. 주요 간척지 위치자료수집

각 조사 대상지에서의 전자장 유도장치(EM38)의 측정지점 위치 자료를 얻기 위하여 (그림 5-1)의 방법으로 DGPS(Model: Trimble TSC1)를 이용하여, 위경도 좌표를 수신하였다.



Fig. 5-1. Field measurement by an electromagnetic inductance, EM38 and GPS.

2. 주요 간척지 염지도 작성

염지도 작성은 각 조사 지역에 선정된 variogram model을 적용하여 Kriging기법을 이용하는 Surfer[®] for Windows version6.04.27로 작성하였다.

제 3절 주요 간척지 염지도 작성

1. 조사 대상지의 위치자료 수집

GPS(Global Positioning System, 지구위치시스템)는 위성으로부터 신호를 받아 3차원 절대위치를 높은 정밀도로 결정할 수 있는 시스템의 일종으로 각 지점의 위치를 판독한 위치정보와 현장에서 획득한 환경정보인 속성정보를 결합하여 database화 할 수 있는데, (그림 5-2~7)은 간척지 토양에서의 염지도 작성을 위하여 DGPS(Model: Trimble TSC1)를 이용한 각 조사 대상지에서의 위경도 좌표의 위치정보와 속성정보인 전자장 유도장치(EM38)의 측정값 학파 340, 유당 431, 태원 330, 석문 880, 해남 2400, 계화 1291지점을 나

타낸 것이다. 조사대상지에서 수집된 위경도 좌표의 위치정보와 EM38측정값은 Microsoft Excel로 database화 하였다.

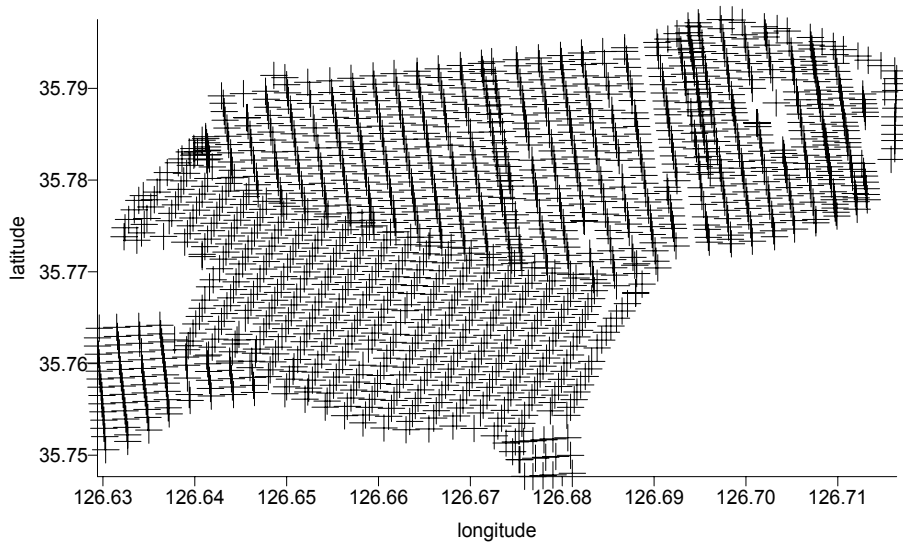


Fig. 5-2. Point map of data measured in the Gyehwa reclaimed land.

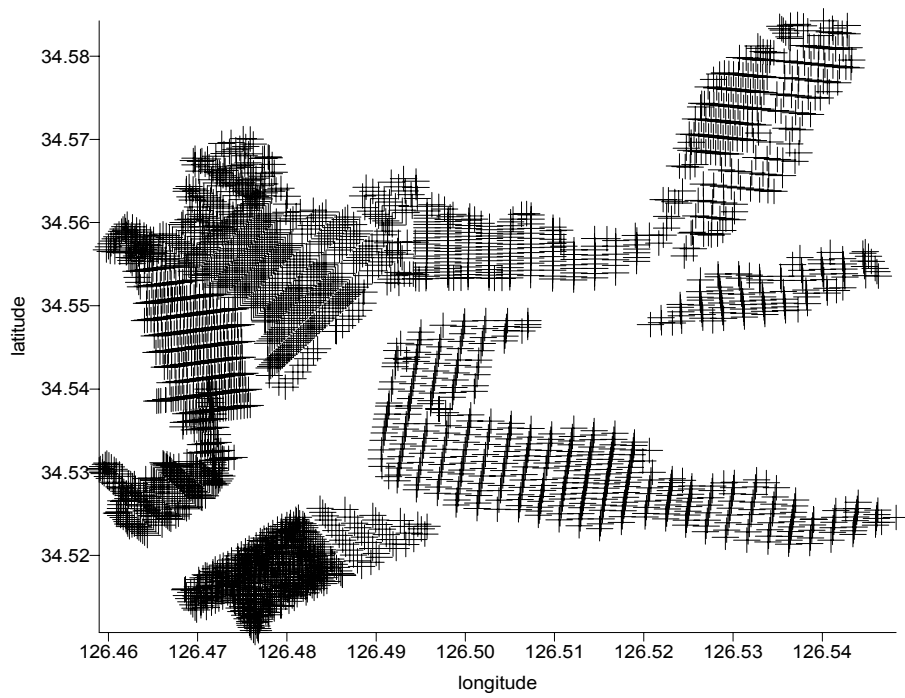


Fig. 5-3. Point map of data measured in the Haenam reclaimed land.

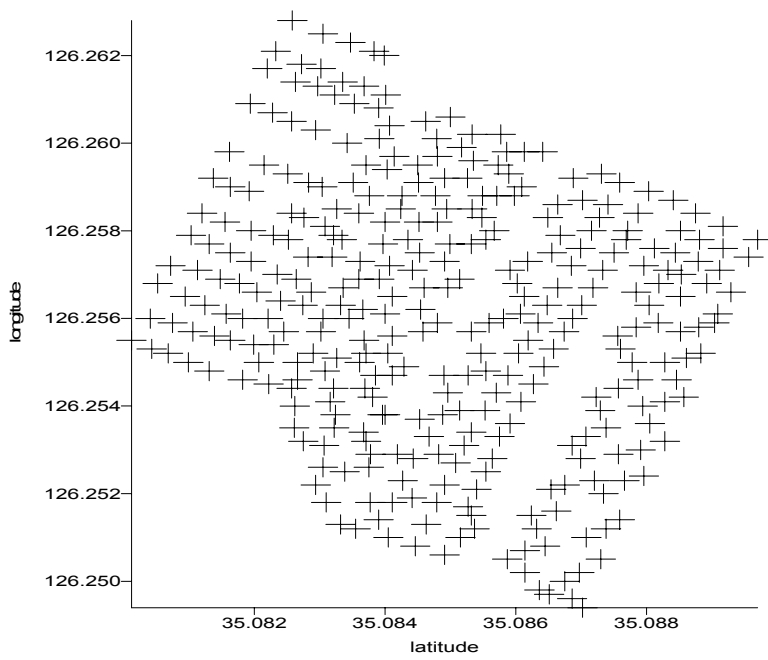


Fig. 5-4. Point map of data measured in the Taewon reclaimed land.

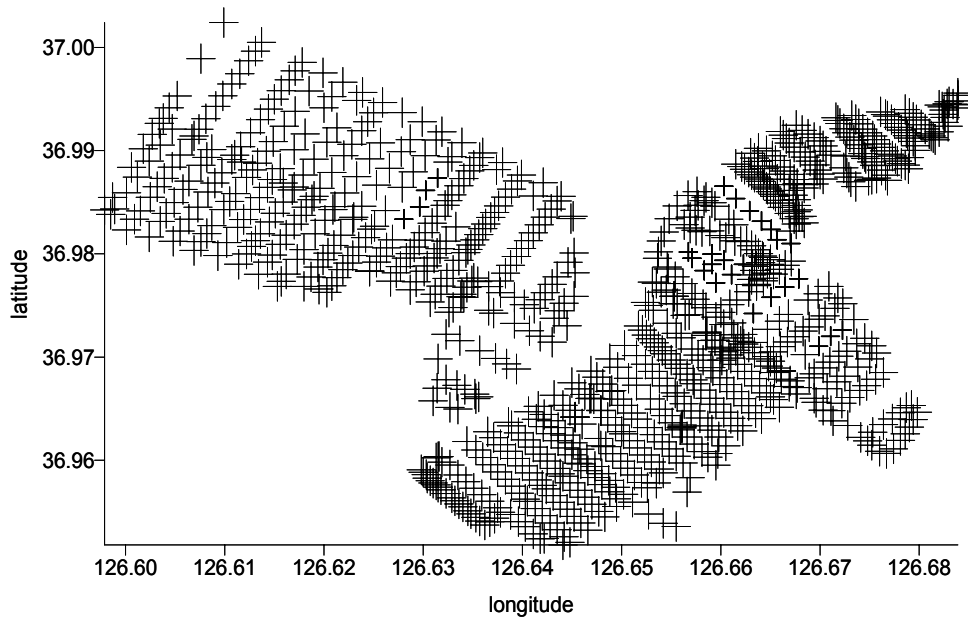


Fig. 5-5. Point map of data measured in the Seokmun reclaimed land.

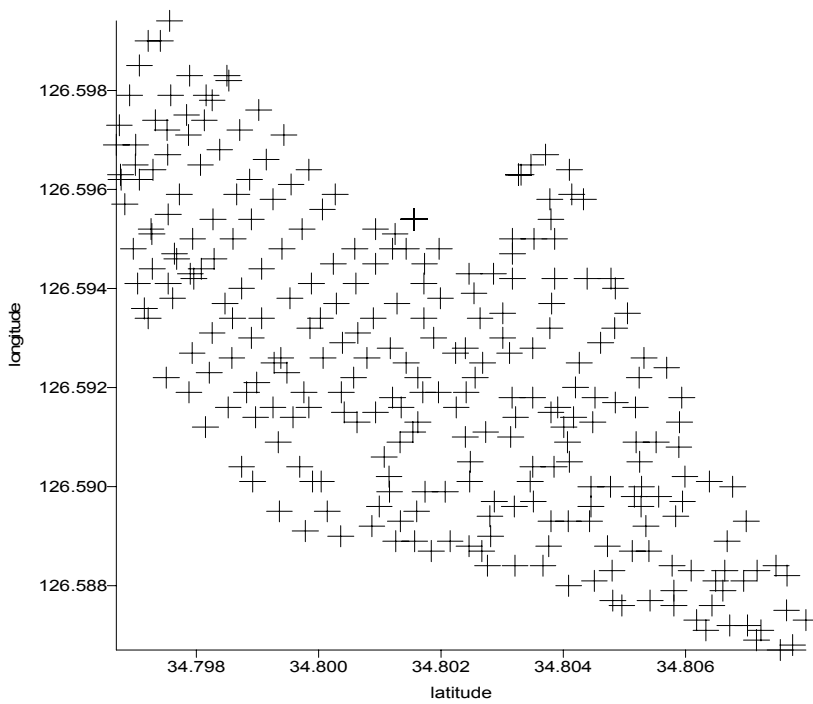


Fig. 5-6. Point map of data measured in the Hakpa reclaimed land.

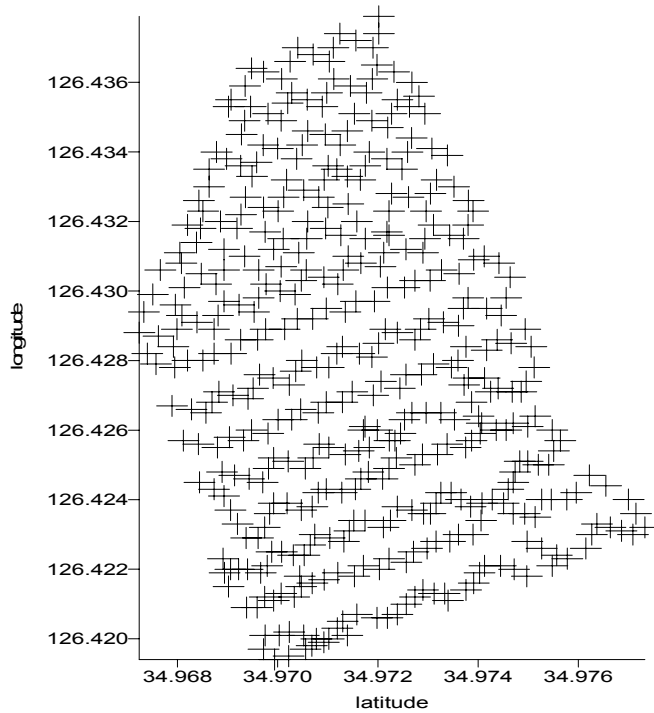


Fig. 5-7. Point map of data measured in the Yudang reclaimed land.

2. 주요 간척지 염지도 작성

염지도 작성을 위해서는 위치정보인 측정지점의 좌표와 그 지점에서의 EC값, 즉 속성정보가 필요한데 위치정보는 (그림 5-2~7)에 표시된 위경도 좌표를 이용하였고, 속성정보는 지역별로 측정된 EM38값을 (표 3-8)의 다중회귀방정식에 적용하여 산출된 ECe를 사용하였다. 이렇게 조사대상지역에서 수집된 위치정보와 속성정보값을 kriging에 의한 공간예측을 통하여 토양 표토(0~10cm)와 심토(60~80cm)를 지도화 하였다(그림 5-8~23).

이러한 염지도는 현장의 염의 상태를 지역별로 쉽게 파악 할 수 있어 지역에 적합한 토양 관리와 농작물의 선택을 통하여 간척지를 효율적으로 이용할 수 있는 자료로서 유용 할 것으로 판단된다.

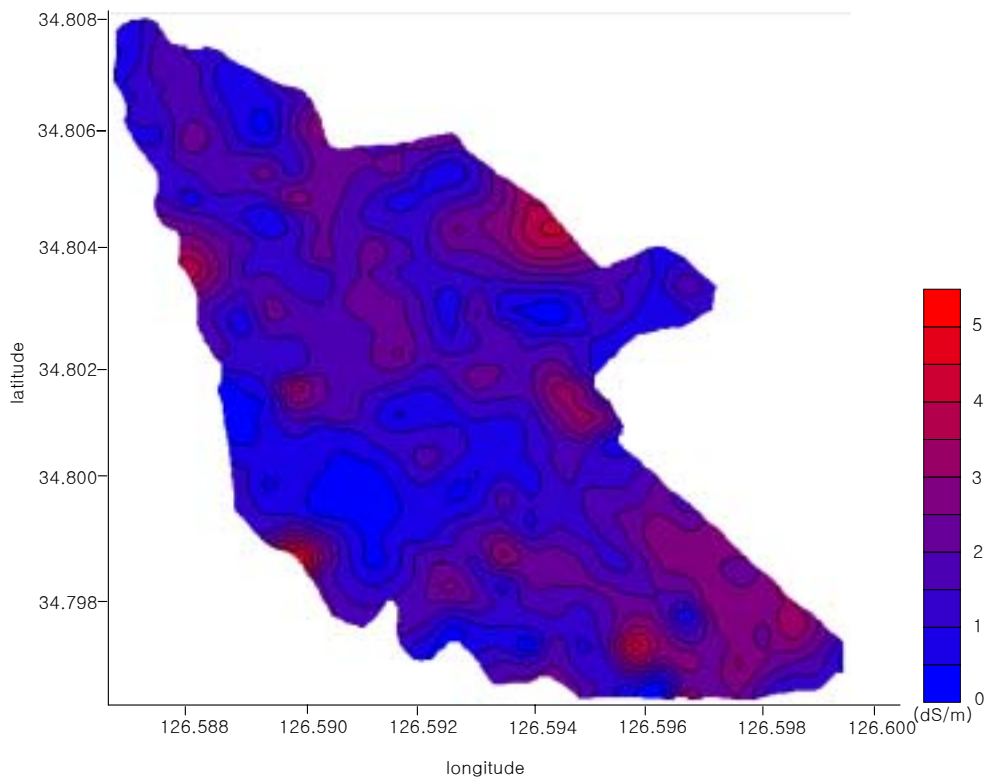


Fig. 5-8. Spatial distribution map of predicted E_{Ce}(0~10cm) using EM38 in the Hakpa reclaimed land.

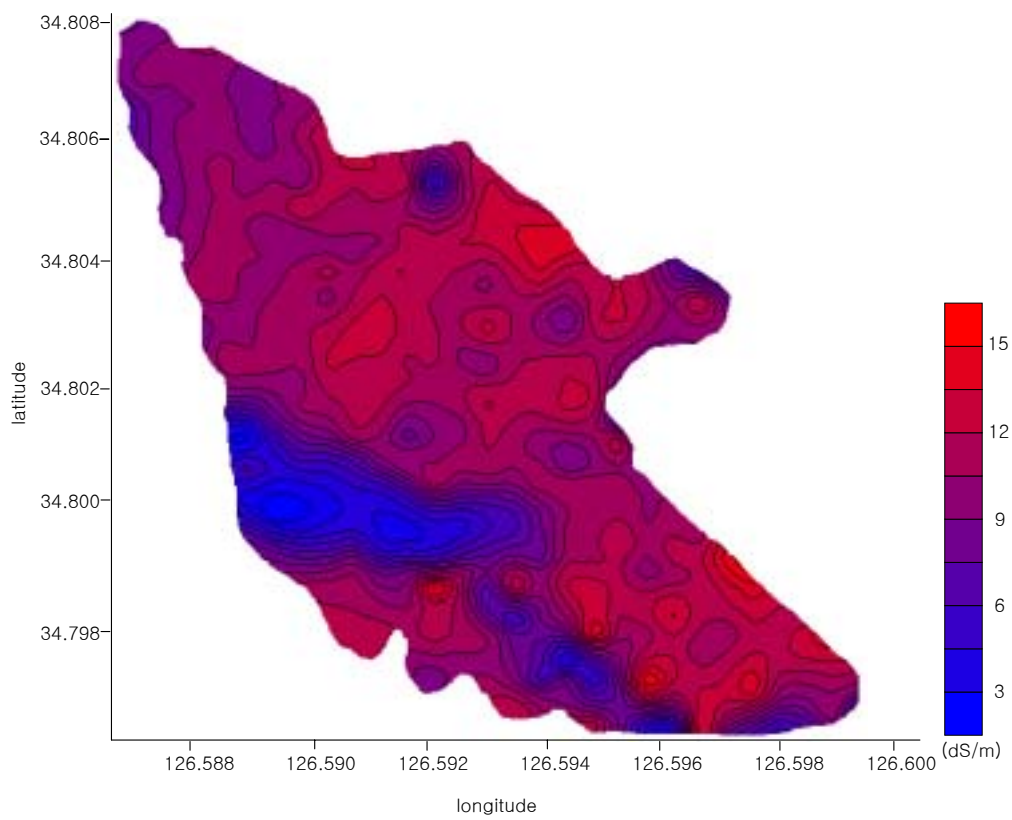


Fig. 5-9. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Hakpa reclaimed land.

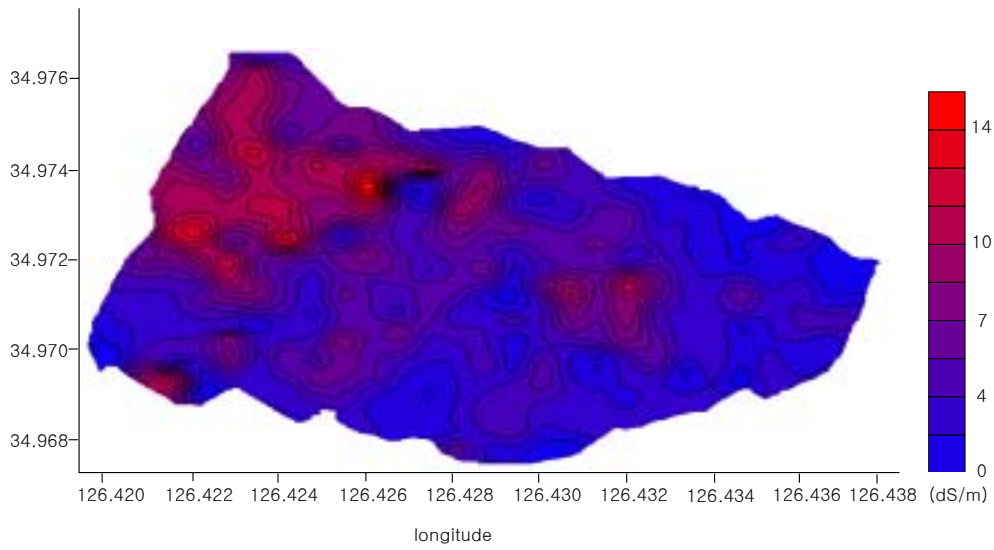


Fig. 5-10. Spatial distribution map of predicted ECe(0~10cm) using EM38 in the Yudang reclaimed land.

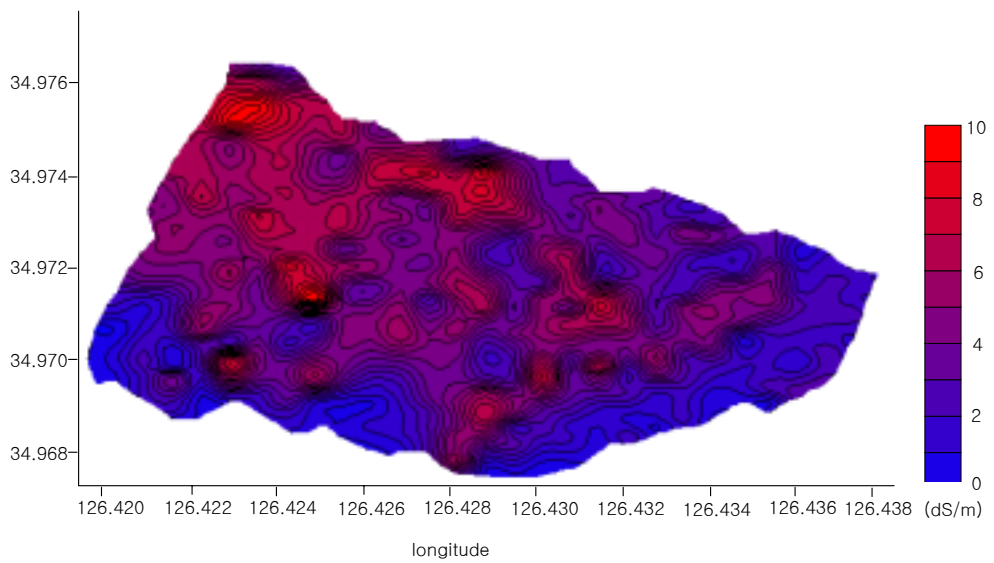


Fig. 5-11. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Yudang reclaimed land.

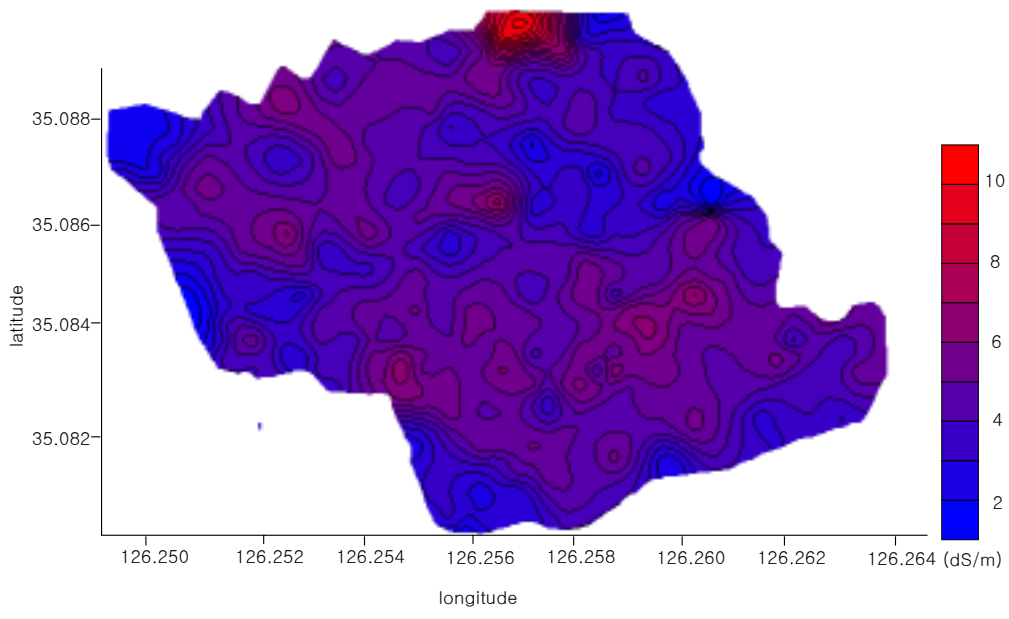


Fig. 5-12. Spatial distribution map of predicted ECe(0~10cm) using EM38 in the Taewon reclaimed land.

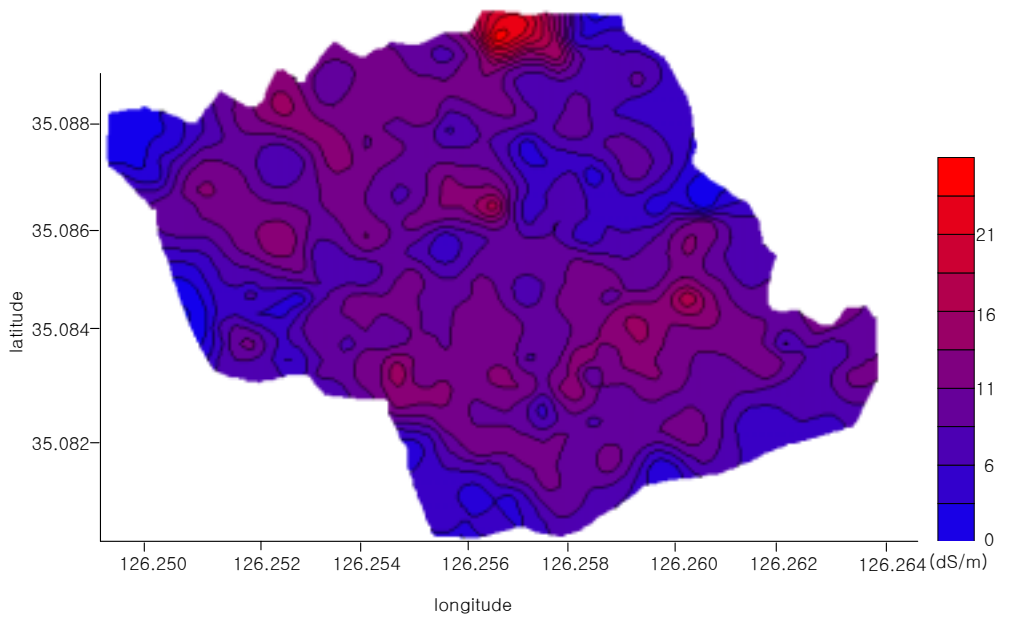


Fig. 5-13. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Taewon reclaimed land.

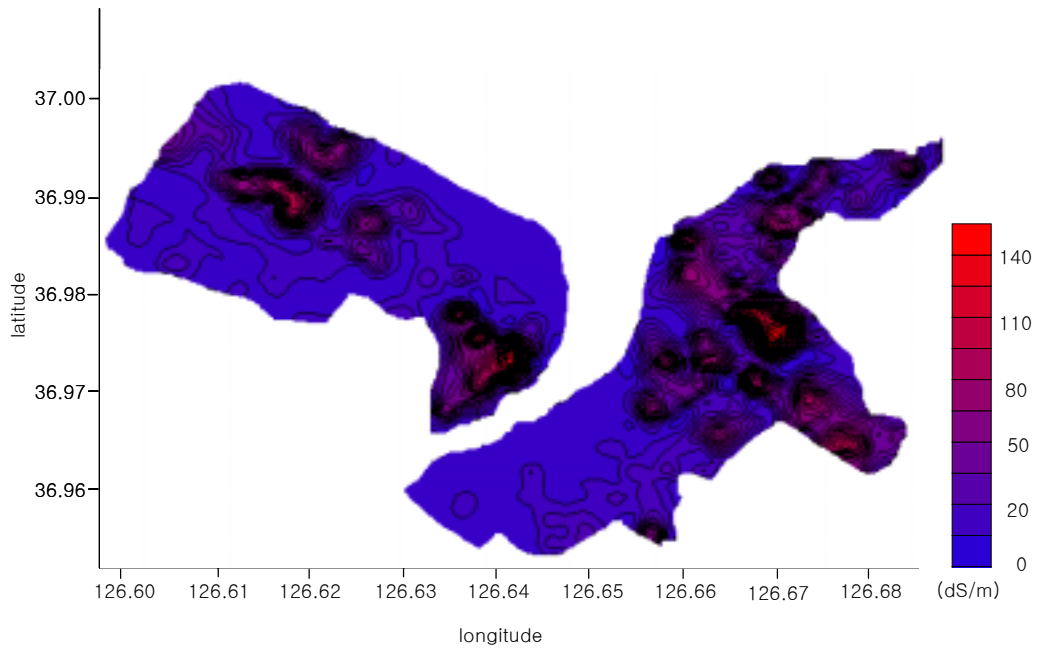


Fig. 5-14. Spatial distribution map of predicted ECe(0~10cm) using EM38 in the Seokmun reclaimed land.

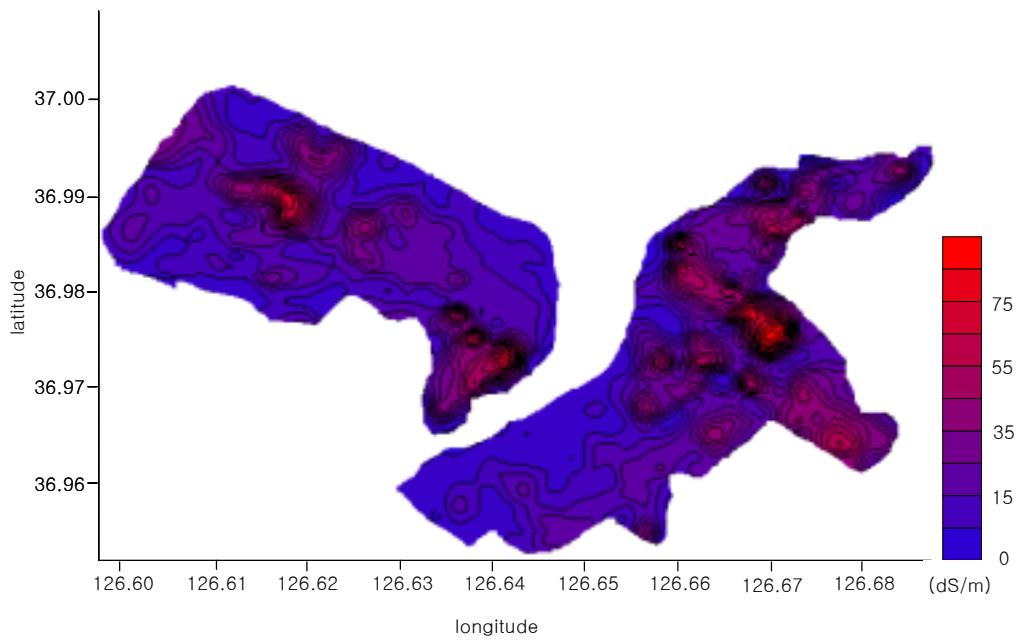


Fig. 5-15. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Seokmun reclaimed land.

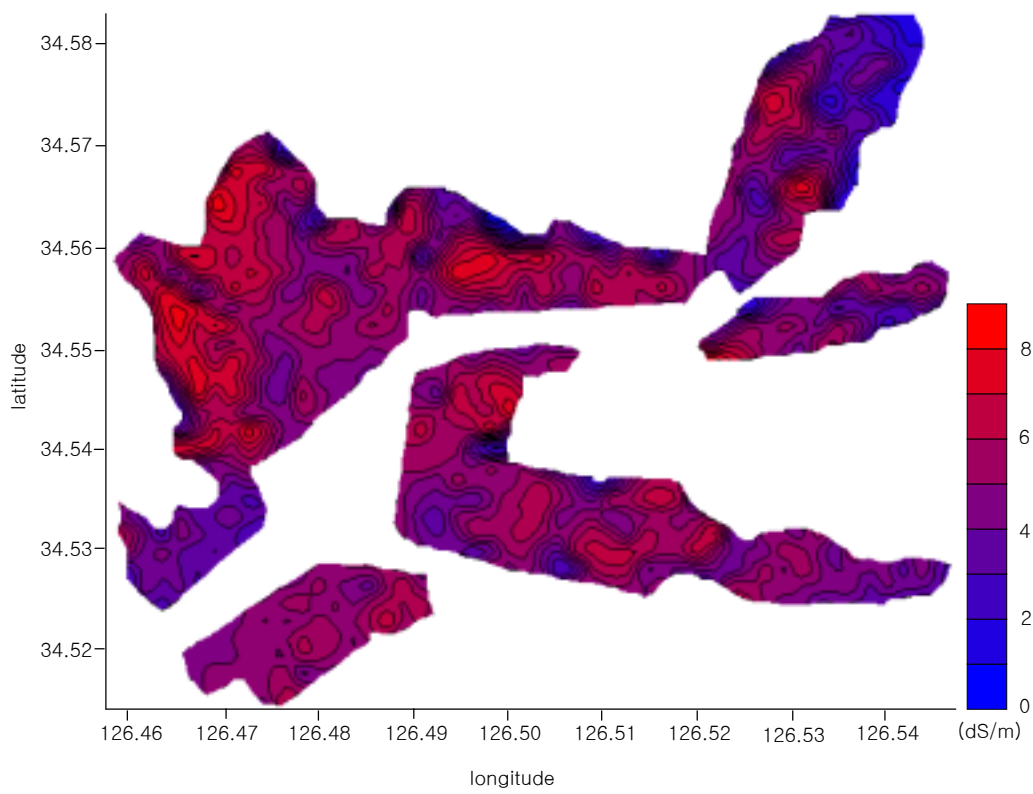


Fig. 5-16. Spatial distribution map of predicted ECe(0~10cm) using EM38 in the Haenam reclaimed land.

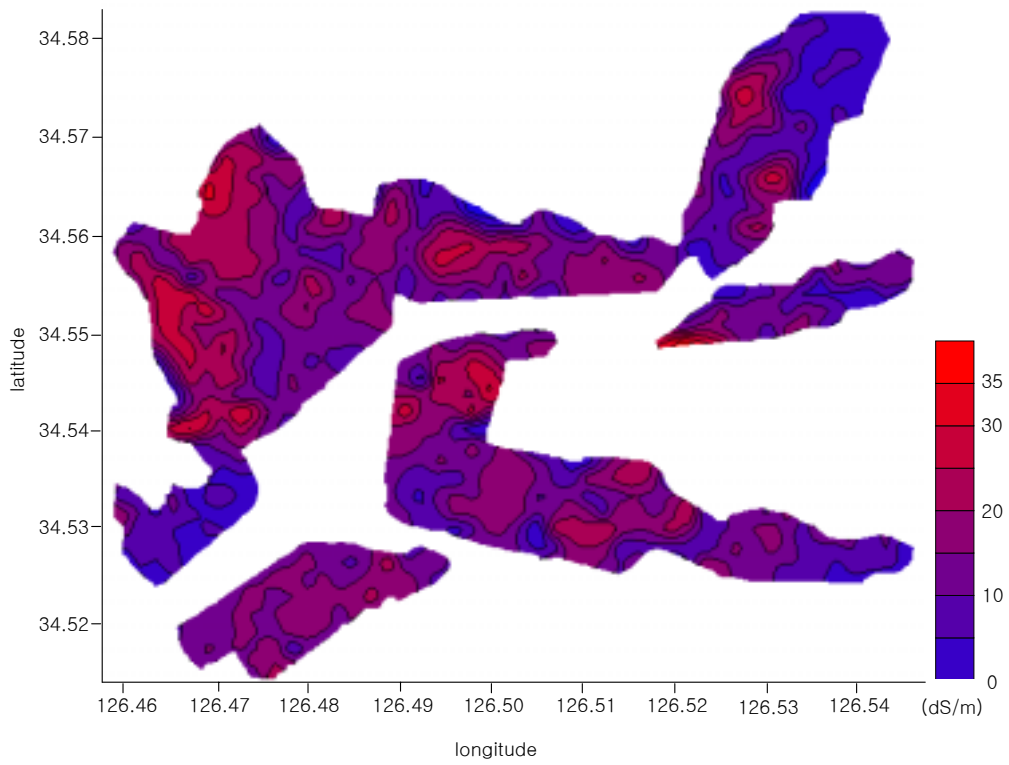


Fig. 5-17. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Haenam reclaimed land.

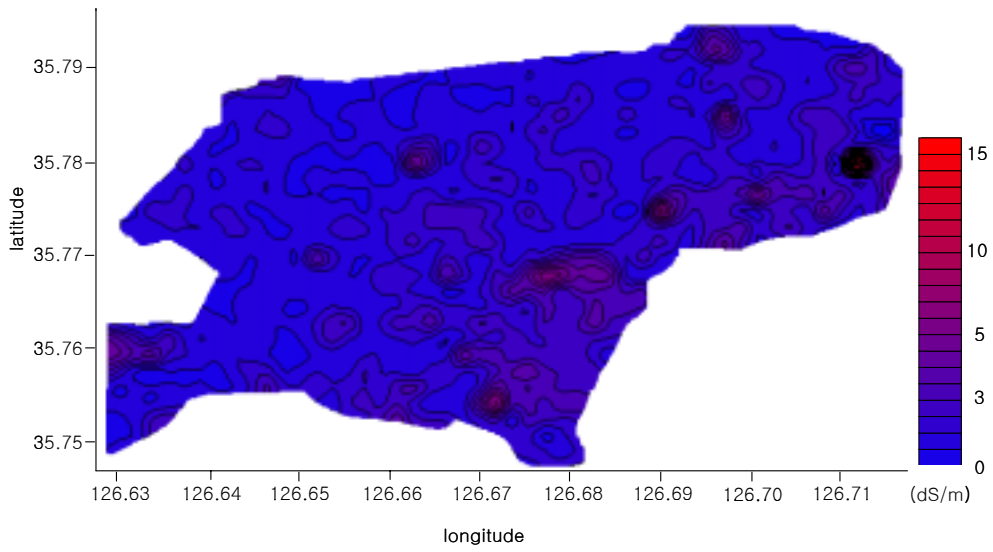


Fig. 5-18. Spatial distribution map of predicted ECe(0~10cm) using EM38 in the Gyehwa reclaimed land.

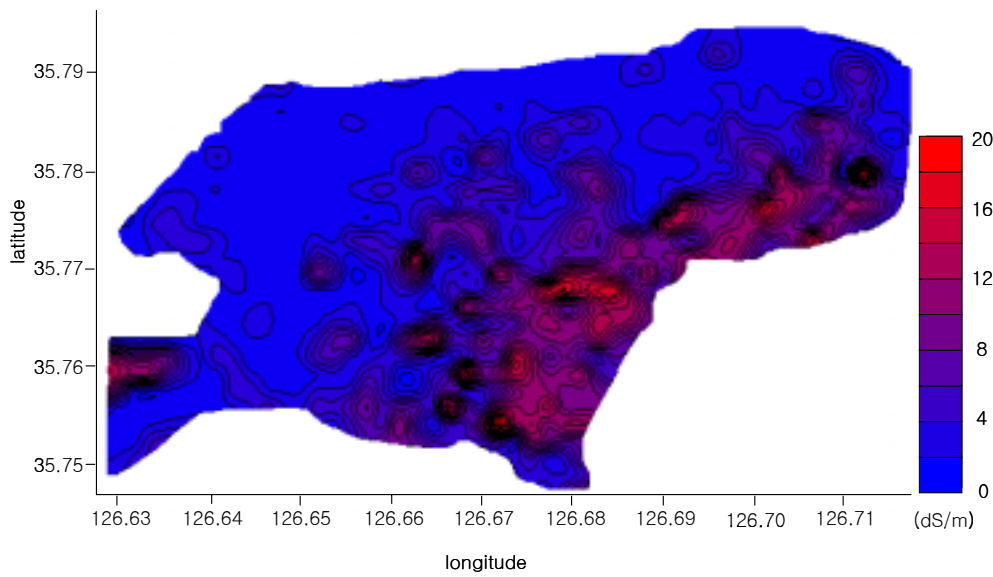


Fig. 5-19. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Gyehwa reclaimed land.

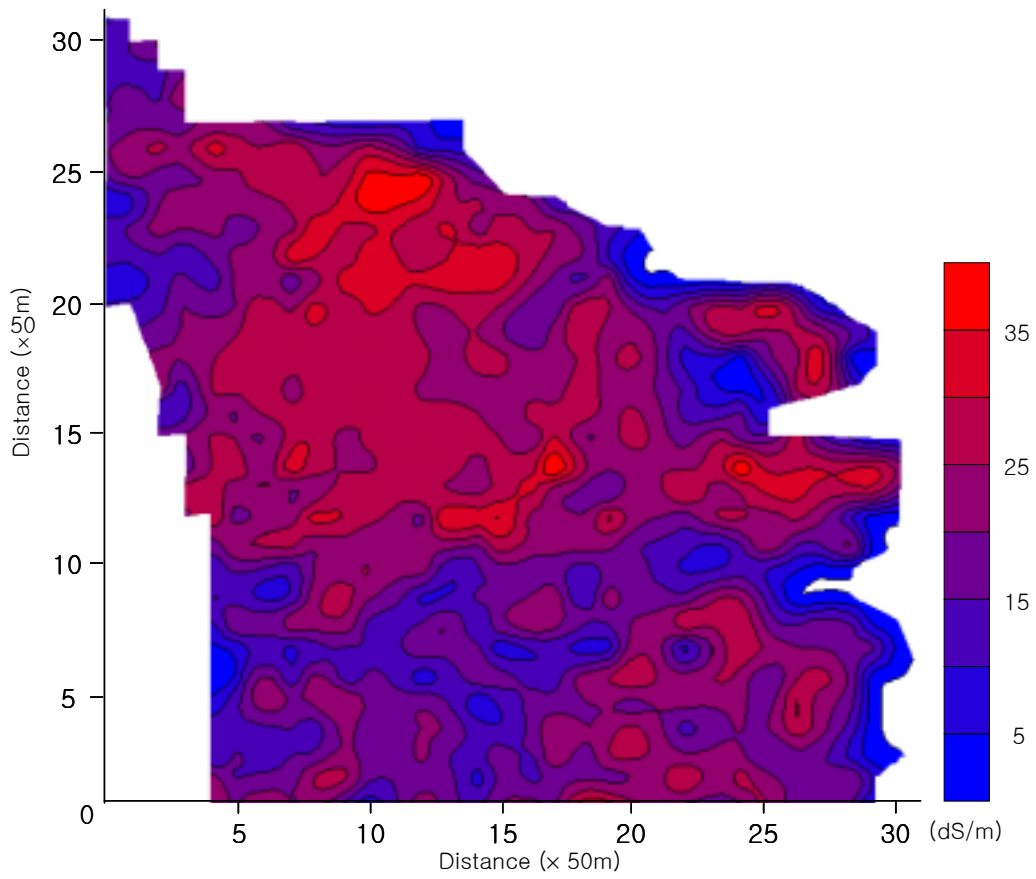


Fig. 5-20. Spatial distribution map of predicted EC_e(0~10cm) using EM38 in the Daeho reclaimed land.

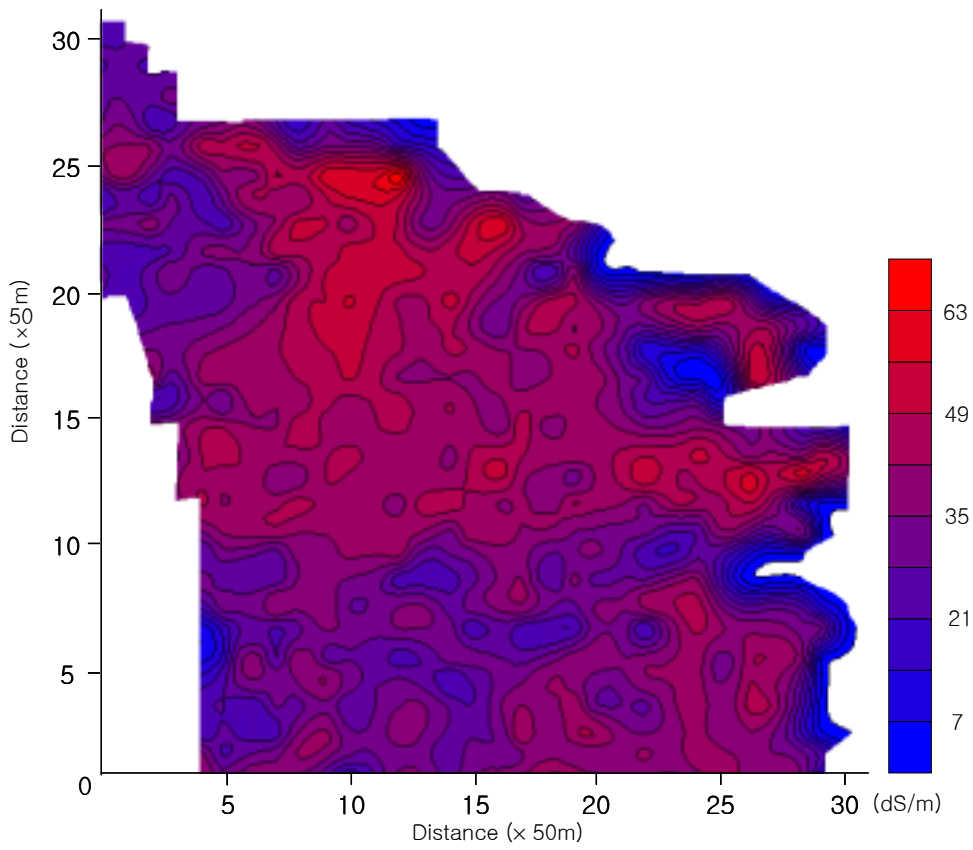


Fig. 5-21. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Daeho reclaimed land.

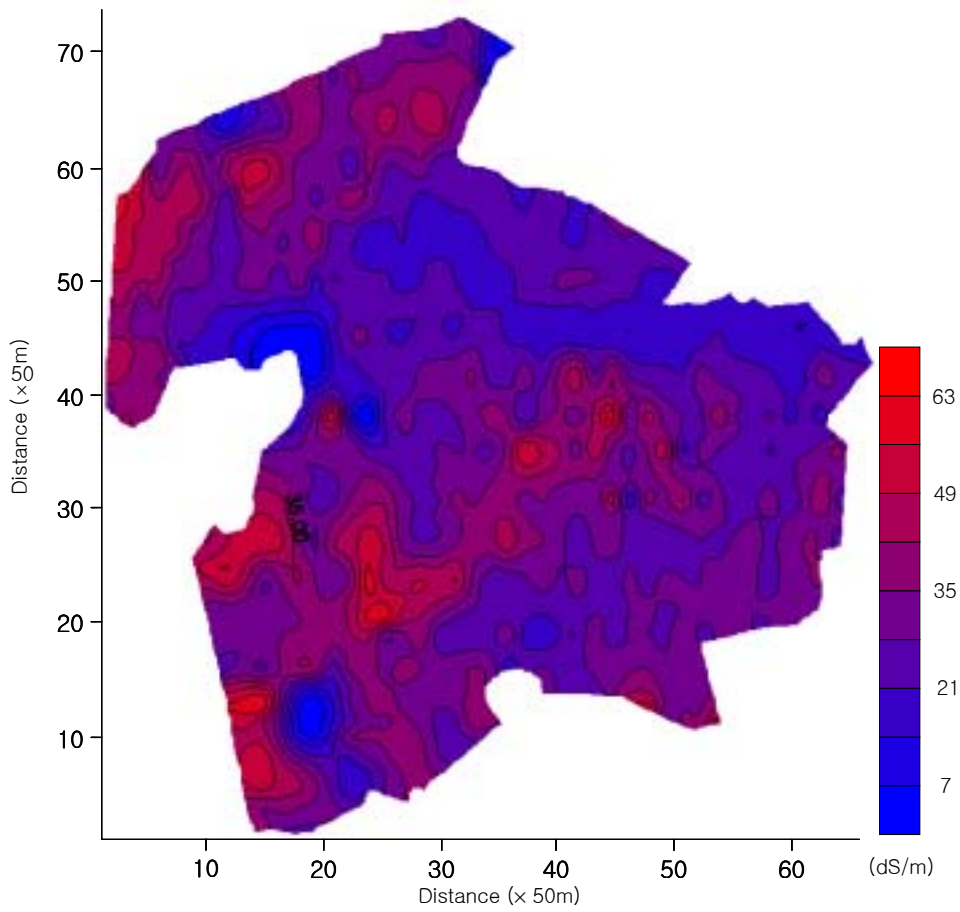


Fig. 5-22. Spatial distribution map of predicted ECe(0~10cm) using EM38 in the Kimpo reclaimed land.

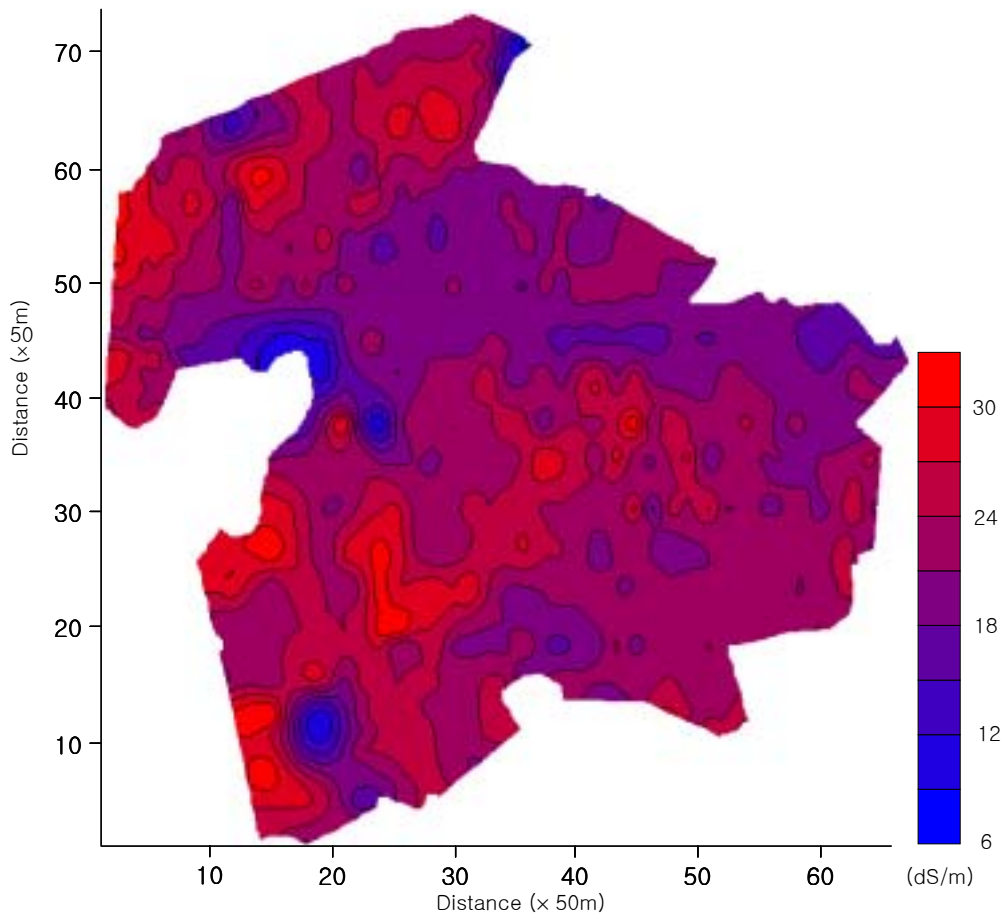


Fig. 5-23. Spatial distribution map of predicted ECe(60~80cm) using EM38 in the Kimpo reclaimed land.

제 6 장 식생발생 유형과 토양 염도

제 1절 서 론

간척지의 식생 발생 유형은 주로 토양수분과 염도에 의해 좌우되는 것으로 알려졌다. 갯벌이 간척되면서 토양환경에 나타나는 주요 변화는 수분량과 토양염도의 감소이다. 따라서 간척지에 나타나는 식생들은 수분과 토양염도의 함량에 따라 특정한 분포를 보이게 된다. 본 연구에서는 갯벌의 간척이라는 인위적인 환경변화에 따라 출현하는 식생들이 어떻게 분포하는지를 연구하였으며 이를 통해 토양환경 변화에 따른 식생들의 반응을 분석하고자 하였다.

제 2절 연구수행 방법

1. 조사 대상 지역

간척 경과 년 수가 다른 서해안 간척지 5곳을 조사 대상 지역으로 하였다.

연번	조사 대상 지역	간척 완료 시기	간척 경과 년수 (2002년도 기준)	비고
1	대호 간척지	1981. 4. 16~1984. 11. 16	18년	
2	행당 갯벌	·	·	대조군
3	석문 간척지	1987. 8.20 ~1995.	7년	
4	남양·화옹 간척지	1991. 9. 25~2002. 4.	1년 미만	
5	시화 간척지	1987. 6. 10~1993. 12. 23	9년	

2. 조사 방법

가. 식생

간척지에 출현하여 자생하는 식생의 모든 종을 분류하였다.

나. 토양염도 값

HANNA 토양 염도계로(g/L) 측정하고 이것을 ECe meter 값(dS/m)으로 환산 하였다. 토양염도 측정 장소는 식생이 없는 곳, 식생이 자라는 곳으로 구분하여 측정하였고 측정의 깊이는 표토(0~10cm)와 심토(10~23cm)로 구분하였다. 염도계가 삽입되지 않는 지

역은 표토만 측정하였다.

염도 측정은 포장상태에서 직접 측정하였고 이것은 토양 수분 함량 조건에 따라 각각 다르기 때문에 토양 수분 함량을 포장 용수량이라고 가정하면 토양 수분 함량이 포장 용수량 일 때에는 ECe 값이 두배가 된다. 사용한 토양염도계의 측정값을 ECe meter값으로 환산한 관계는 (그림6-1)과 같다.

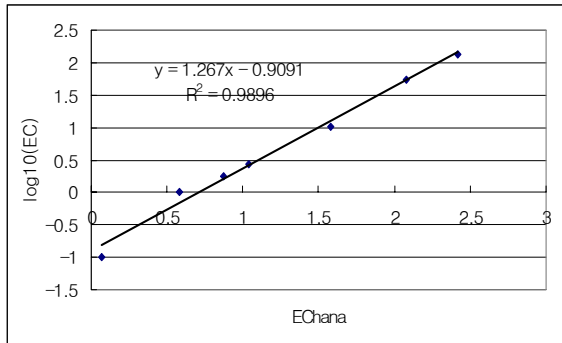


Fig. 6-1. Relationship between EC-HANNA and ECmeter.

제 3절 결과 및 고찰

간척 경과 년 수에 따라 발생하는 식생의 종류가 다르며, 식생의 생육상태 또한 다르게 나타났다. 경과 년 수가 오래 될수록 다양한 식생이 분포하며, 토양염도에 따라 식생 발생이 일정한 유형을 보여 간척지의 식생 발생 유형은 토양염도 조건에 좌우됨을 잘 나타내고 있다. 또한 식생 분포지역의 토양염도를 통해 토양염도에 대한 식생 별 적응 범위도 알 수 있었다.

1. 식생 발생 유형

가. 간척 경과 년 수가 오래 된 곳

간척 경과 년 수가 오래된 곳은 대호, 석문, 시화 간척지이며 이러한 곳에는 다양한 중성식물이 분포하나 염생식물도 분포하고 있으며 염생식물이 분포하는 지역의 토양염도는 중성식물이 존재하는 곳에 비해 높게 나타났다. 중성식물들은 다양한 것이 혼재하나, 염생식물은 토양염도를 따라 대상분포하는 것으로 나타났다. 염생식물의 생육상태는 지역에 따라 매우 다양한 양상을 보였는데 이는 토양수분, 이용 가능한 양분, 토양 염농도 등 생육조건이 다르기 때문인 것으로 분석된다.



Fig. 6-2. Type 1 of vegetation appearance in Daeho.



Fig. 6-3. Type 2 of vegetation appearance in Daeho.



Fig. 6-4. Type 1 of vegetation appearance in Seokmun.



Fig. 6-5. Type 2 of Vegetation appearance in Seokmun.

Table 6-1. The type of vegetation appearance in Daeho, Seokmun.

간척지	출현 식생	식생 발생 유형	조사 지역
대호	<p>총 32종 중성식물; 갈대 외 23종 대표적인 염생식물(8종); 통통마디 해홍나물, 나문재, 칠면초, 갯개미취, 갯개미자리, 갯꾸러미풀, 갯조플</p>	<p>①중성식물은 일정한 구분없이 전지역에 혼생. 배수로가 설치되어 탈염이 빨리 이루어진 곳은 중성식물이 왕성하게 번식. ②염생식물은 토양염도가 높은 곳에 총생군락을 형성하거나 일정한 순서대로 대상분포를 보임. 그러나 생육상태는 좋지 않음. 발생 양상으로는 1)식생이 없는 곳 2)염생식물 3)중성식물의 순 또는 1)염생식물 2)중성식물의 순을 보임. 남양골과 여러 중성식물이 혼생하는 지역은 식생의 생육상태가 미약한데 이는 이 지역의 토양염도 값이 높기 때문 인 것으로 분석됨. 염생식물은 지역별로 소규모 군락을 형성하거나 대상분포를 보이는데 발생 순서로는 1)칠면초, 해홍나물 2)통통마디 3)남양골, 갯개미취, 갯꾸러미풀 의 순을 보임</p>	<p>간척 후 자생식물 천이 상태분석을 위한 20×100m의 시범포</p>
석문	<p>총 64종 중성식물; 갈대 외 52종 대표적인 염생식물(11종); 해홍나물, 나문재, 칠면초, 갯개미취, 갯개미자리, 갯꾸러미풀, 가는갯쟁이, 큰옥매듭풀, 갯땀싸리, 갯질경, 갯조플</p>	<p>①경지 정리중인 지역은 갈대군락, 물피군락 과 같은 규모가 큰 군락 외에 중성 1)방조제 식물이 다양하게 전지역에 분포 함. 염생 밖 식물은 간간이 발견되며 생육상태는 좋지 않음. 일부지역에서는 토양염도를 따라 대상분포를 보임. 식생 발생 유형은 1)식생이 없는 곳 2)갈대와 이 외 모든 중성식물 혼재 지역 또는 1)식생없는 곳 2)방조제 2)갈대 지역 3)중성식물 혼재 지역으로 안 구분이 됨 ②매립되지 않은 지역은 토양 염도가 높 옆의 염생식물이 대상으로 분포하며 발생 매립되지 않은 곳 유형은 1)식생없는 곳 2)염생식물 순을 보임.</p>	<p>남쪽의 경지정리 중인 지역 석문호</p>

Table 6-2. The type of vegetation appearance in Sihwa.

간척지	출현 식생	식생 발생 유형	조사 지역
시화	<p>총 80 종 중성식물: 갈대 외 71종 대표적인 염생식물(8종): 갯개미자리, 갯뚝싸리, 갯 질경, 칠면초, 통통마디, 해 홍나물, 나문재, 갯조풀</p>	<p>㉑복토지역에서 중성식물은 일정한 구분없이 전지역에 혼생 ㉒염생식물은 매립되지 않은 갯벌이던 지역에 분포, 생육상 태가 양호함 ㉓안산천을 기준으로 하여 시화지역 전체를 상,중,하류로 나 눌 때 ①상류지역은 일부가 복토되었고 복토되지 않았어도 바닷 물이 일찍 끊긴 곳으로 다양한 중성식물이 혼재하고 있음 ▪ 시화호와 직접 인접한 뺨이었던 곳은 갈대가 군락. ▪ 복토지역은 다양한 소규모 총생군락이 산재하고 있음 ▪ 복토지역 중 흙이 많이 쓸려나간 곳에는 염생식물이 산발적으로 출현하거나 총생군락을 이루고 있음 이지역에서 가장 큰 군락은 1)갈대 2)갯조풀 3)가시상치 4) 쑥이며 복토지역에는 1)사데풀 2) 빗자루국화 3)달맞이꽃 4) 망초 등이 무성하게 혼재하고 복토지역 중 흙이 쓸려 나간 곳이나 복토되지 않은 곳은 1)갯뚝싸리 2)나문재 3) 통통마 디 4)해홍나물이 번식하고 있다. 갈대 밑에는 갯조풀, 사데풀, 갯개미취, 빗자루국화가 혼생. ②중류지역(신길천~시흥 8교 사이)은 복토되지 않았어도 하류지역보다 물길이 일찍 끊겨 염생식물 이후의 식생이 발 1)복토지역 달하고 있으며 식생의 분포는 상류보다 다양하지 않고 1)갈 과 대 2)갯개미취 3)장소에 따라 작은 규모의 해홍나물, 칠면 2)매립되지 초, 통통마디의 혼생 군락 4) 물피와 돌피의 단독 총생군락 많은 지역 또는 갈대와와 혼생 군락 5)세모고랭이의 소규모 총생군락이 뚜렷한 군락을 형성하고 있음. 시화호와 직접 인접한 곳은 갈대가 무성한 군락을 이 루고 있으나 하류쪽으로 내려가면서는 하류의 식생발생 양 상과 같은 유형을 보여 식생이 없는 지역이 확대되고 있음. 식생의 발생유형은 장소에 따라 다르나 대체적으로 1)식생이 없는 곳 2) 또는 식생고사지역 3) 해홍나물, 칠면초, 통통마디 혼생지역 4) 갯개미취 5) 갈대의 순으로 군락을 형성하고 있으며 갈대 밑에는 사데풀이나 갯개미취, 빗자루국화, 갯조풀 등 이 서식하고 있음 ③ 하류지역(시흥 8교 건너 오이도 방향의 갯벌이던 지 역)은 물길이 가장 늦게 끊긴 곳으로 시화호와 인접한 곳으 로부터 1)식생이 없는 곳 또는 고사지역 2)고사지역 3)칠면초, 해홍나물, 통통마디 혼생지역 4) 갯개 미취 5)갈대 군락의 순으로 뚜렷한 군락을 이루고 있음</p>	



Fig. 6-6. Type 1 of vegetation appearance in Sihwa.
(covered with another soils)



Fig. 6-7. Type 2 of vegetation appearance in Sihwa.
(not covered - the middle area of Sihwa)



Fig. 6-8. Type 3 of vegetation appearance in Sihwa.
(not covered - the middle area of Sihwa)



Fig. 6-9. Type 4 of vegetation appearance in Sihwa.
(not covered - the lower area of Sihwa)

나. 간척 경과 년 수가 짧은 곳

남양·화옹 간척지는 2002년 4월에 남양·화옹 방조제 물막이 공사가 완전히 끝난 곳으로 조사 대상지역인 남양 장덕1리 지역 갯벌은 이미 그 이전부터 조수가 원활히 들어 오지 않아, 조수에 덮이지 않는 지역에는 2001년도 5월 중순 이후부터 염생식물이 출현하기 시작하였다. 이 지역은 간척 경과 년 수가 오래된 지역에 비해 염생식물이 전지역에 걸쳐 분포하며, 중성식물은 육지와 연결되거나 인접한 곳을 제외하고는 없었다.

행당 갯벌지역은 조수가 정기적으로 드나드는 곳으로 식생의 발생은 갯벌 지역과 갯벌 끝 부분으로 나누어 명확하게 구분되어 있었다. 조수가 드나드는 갯벌 지역에는 칠면초가 단독 발생하여 분포하고 있고, 갯벌 끝 부분인 방조제 밑에는 염생식물들이 혼생 분포하고 있다.

Table 6-3. The type of vegetation appearance in Namyang · Hwaon reclaimed tidal land and Hangdang tidal land.

간척지	출현 식생	식생 발생 유형	대상 지역
남양 · 화옹	총 13종 중성식물: 갈대 외 6종 대표적인 염생식물(6종): 통통마디 해홍나물, 나문재, 칠면초, 갯뚝싸리(2개체), 지채	<ul style="list-style-type: none"> ①중성식물은 갯벌지역과 연결된 논이나 위의 육지 지역에서 수로를 따라 내려온 것으로 보이며, 극 소수임 ②염생식물은 갯벌이던 지역에 광범위하게 발생하기 시작하며 <ul style="list-style-type: none"> ①통통마디는 갯고랑을 중심으로 양옆에 발생하고 있으며 ②칠면초와 해홍나물은 갯벌 전지역에 혼재하고 있음 ③나문재는 갯벌지역에는 극소수 가 드문 드문 존재하고 있음 	장덕 1리 앞 갯벌 지역
행당 갯벌 (대조군)	총 27종 중성식물: 갈대 외 18종 대표적인 염생식물(8종): 해홍나물, 나문재, 칠면초, 갯개미취, 갯잔디, 통통마디, 가는갯는쟁이, 갯꾸러미풀	<ul style="list-style-type: none"> ①중성식물과 나문재, 가는갯는쟁이는복토된 지역에 출현 ②염생식물은 갯벌지역에 분포 <ul style="list-style-type: none"> ①칠면초는 조수가 드나드는 갯벌지역에 대규모 분포 ②해홍나물, 갯개미취, 통통마디, 갯잔디는 바닷물이 직접 닿지 않는 갯벌의 윗 지역에 혼생 분포 	갯벌지역으로 조수가 정기적으로 들어오는 지역과 복토된 지역



Fig. 6-10. Type 1 of vegetation appearance in Namyang · Hwaon (*Salicornia europaea* by the tidal stream)



Fig. 6-11. Type 2 of vegetation appearance in Namyang · Hwaon (*Triglchin maritimum* in wet area, *Suaeda japonica* and *Suaeda maritima* which covered tidal flat)



Fig. 6-12. Hangdang tidal flat



Fig. 6-13. Type 1 of vegetation appearance in Hangdang (*Suaeda japonica*)



Fig. 6-14. Type 2 of vegetation appearance in Hangdang (*Limnium tetragonum*, *Suaeda*)



Fig. 6-15. Type 3 of vegetation appearance in Hangdang (*Aster tripolium*, *Zoysia sinica*, *Salicornia europaea*, *japonica*, *Suaeda maritima* grow in mixed)

(1) 대호간척지 식생변화

가) 물관리의 영향에 따른 식생의 변화

대호 간척지 시험구 조성지의 식생을 논상태로 관리하였던 장소와 밭상태로 관리하였던 곳으로 나누어 식생의 변화를 조사한 결과는 다음과 같다.

일시적으로 담수하여 논상태로 관리하였던 곳(11종)

- 명아주과(1종) : 나문재,
- 화본과(4종) : 갈대, 바랭이, 강아지풀, 피
- 국화과(4종) : 갯개미취, 망초, 빗자루국화, 사데풀
- 방동사니과(1종) : 제주하늘지기
- 갯질경이과(1종) : 갯질경이

발상태로 관리한 곳(13종)

- 명아주과(1종) : 나문재
- 화분과(5종) : 갈대, 도랭이피, 강아지풀, 잔디, 툼페스큐,
- 국화과(3종) : 갯개미취, 빗자루국화, 사데풀
- 방동사니과(1종) : 제주하늘지기
- 콩과(2종) : 레드클로버, 클로버
- 갯질경이과(1종) : 갯질경

물관리 조건에 따라서 식생의 천이에 미치는 영향을 조사한 결과 종수에 있어서는 큰 차이가 없으나 논상태로 관리하였던 곳에서는 갯개미취가 우점종이었던데 반하여 발상태로 관리한 곳에서는 화분과 식물이 우점하고 있는 것으로 조사되었다.

나) 시간의 경과에 따른 식생의 변화

대호간척지가 조성되어 상당한 시일이 경과된 지금 간척지 조성시에 조사된 식생과 현재의 식생을 검토하여 보면 다음과 같은 차이가 발견된다.

Table 6-4. The process of vegetation shift after reclamation by the year.

과 명	1995년도	2000년도	2001년도	비 고
명아주과	통통마디,갯논쟁이 칠면초,나문재, 해홍나물(5종)	나문재,칠면초 (2종)	나문재,칠면초, 통통마디,갯논쟁이 (4종)	감소경향
국화과	갯개미취,개망초, 사데풀(3종)	갯개미취,사데풀, 빗자루국화,망초 (4종)	갯개미취,사데풀, 망초,개망초,빗자루 국화(5종)	증가경향
화분과	강아지풀,갈대, 갯잔디,툼페스큐 (4종)	갈대,툼페스큐, 바랭이,도랭이피, 피, 강아지풀 (6종)	갈대,도랭이피, 툼페스큐,갯잔디, 피,강아지풀(6종)	증가경향
콩과	클로버(1종)	클로버,레드클로버 (2종)	레드클로버(1종)	-
방동사니과	-	방동사니대가리 제주하늘지기(2종)	-	-
갯질경이과	갯질경	갯질경	갯질경	변화없음

Table 6-5. The change of vegetation appearance.

구	분	초	종	원	인
개체수가 증가한 초종	나문재, 칠면초, 통통마디, 사데풀, 갯질경이			-염농도에 강한 초종이 크게 증가하는 경향을 보였으며 나문재와 칠면초는 2000년도에 비하여 크게 개체수가 증가하는 경향이었으며 통통마디는 2000년도에 발생하지 않은 초종이었으나 금년도에 재발생을 보이고 있다. -이러한 경향은 금년도의 전반기 극심한 가뭄으로 인하여 토양의 염농도의 증가와 관련된 것으로 판단됨.	
개체수가 감소 또는 생육이 불량한 초종	갯개미취, 클로버, 레드 클로버, 제주하늘지기, 방동사니대가리, 갈대, 강아지풀			-콩과식물과 방동사니과 식물의 감소는 염농도의 영향보다는 가뭄의 영향으로 판단됨. -염에 강한 갯개미취의 전반적인 감소는 명아주과의 식물에 비하여 수분조건에 더욱 크게 영향받는 것으로 판단되었음.	
개체수 변동이 없는 초종	톨페스큐, 도랭이피, 빗자루국화, 망초, 개망초			-톨페스큐와 국화과 식물들은 수분조건에 비교적 강한 것으로 판단됨.	

이상의 결과에서 보는 바와 같이 간척지 농경지 조성후 시간의 경과에 따라 초종의 종수 및 다양성이 증대되는 것이 확인되었으며 특히 내염성이 강한 명아주과 식물의 수가 급격히 쇠퇴하고 화본과, 국화과로의 천이가 나타났다.

다) 제염에 따른 식생 분포

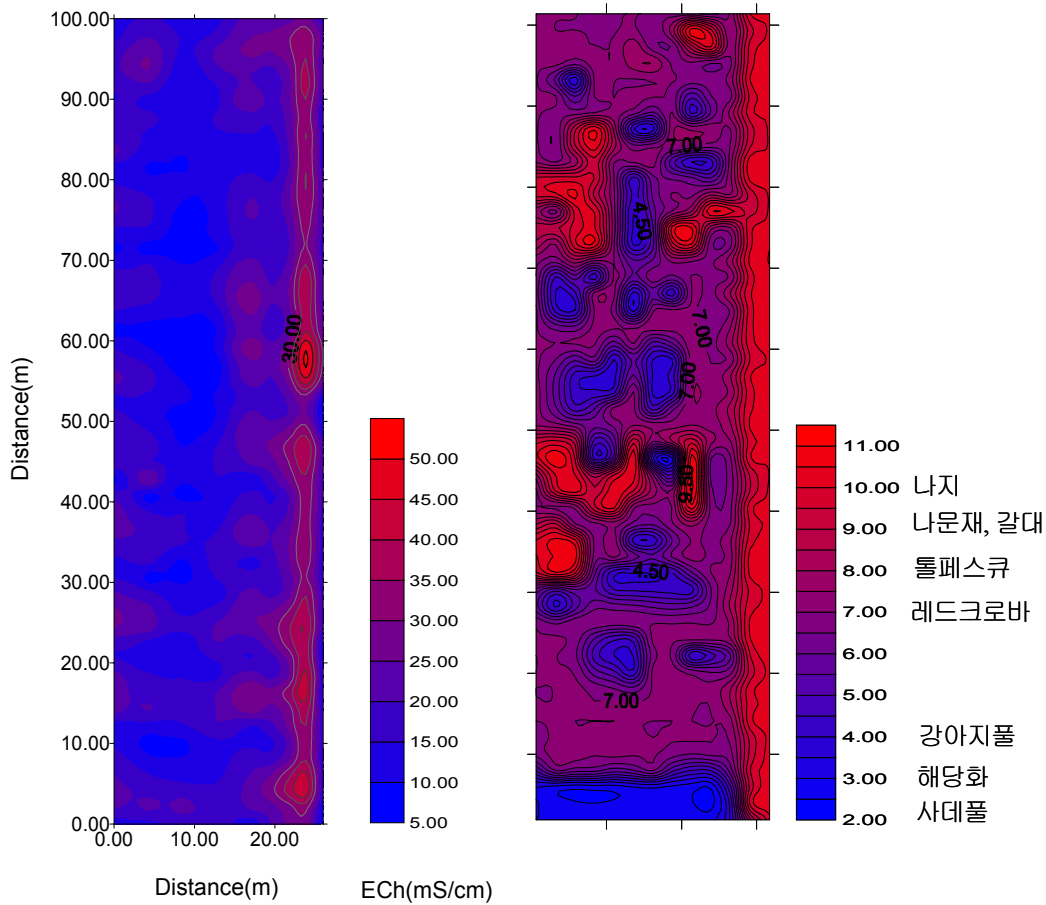


Fig. 6-16. The distribution of soil salinity and vegetation in Daeho.

10m 간격으로 설치된 암거 배수관 부근의 염농도가 낮게 분포하고 있으며, 염농도가 높은 곳은 나지상태로 있는 곳이다. 식물이 자라지 않는 오른쪽 부근은 염농도가 높았다. 염농도가 낮게 분포하는 곳에서의 식생은 강아지풀, 해당화, 사데풀이 자라고 있었다.

이상의 식생의 조사결과를 종합하여 보면 명아주과의 식물들은 간척으로부터 기간이 경과함에 따라 종수가 점차 감소하고 화본과와 국화과 식물로의 식생의 천이가 일어나는 경향이지만 가뭄과 같은 특수한 상황에 따라 토양의 염농도가 높아지면 개체수가 급격히 증가할 수 있음을 보여주고 있다.

특히 2000년도에 발견되지 않았던 통통마디가 2001년도에 다량 발생한 현상은 일시적인 가뭄에 의하여 토양의 염농도가 상승하면 사라졌던 염농도에 강한 초종이 재발생할 수 있

음을 보여주는 것으로 판단된다.

또한 염농도에 비교적 강하고 건조한 지역에서도 어느 정도 잘 견디는 갯개미취의 경우 2001년도 그 개체수가 급격히 감소하고 생육이 불량해 진 현상은 염농도의 문제이기 보다는 수분부족에 대한 저항력이 약함에 기인하는 것으로 판단된다.

2. 식생 발생 순서 유형별 토양 염도 값

가. 식생 발생에는 일정한 유형이 있음을 알 수 있었고 이것은 토양염도에 기인함을 잘 나타내고 있다.

나. 토양염도별 식생 분포 양상

토양염도와 식생의 분포 양상에 의해 토양염도에 따른 식생의 분포 양상을 확인 할 수 있었다. 식생이 없는 곳은 지역에 따라 발생 조건이 미비 된 측면도 있겠으나 일반적으로 염농도가 높게 측정되며, 식생이 고사한 지역도 높은 염농도를 나타내었다. 염생식물로 알려진 것들은 높은 토양염도 하에서 출현하며 생육상태도 양호하였다. 중성식물들은 높은 염농도 지역에서 발견되지 않았으나 중성식물로 알려진 물피, 돌피 등은 넓은 범위의 염 적응력을 가진 것으로 보인다. 높은 염농도 지역에 식생이 출현하였어도 토양 환경 조건에 따라 생육상태가 다양하여 이에 대한 생태학적인 연구가 더 필요 할 것으로 사료된다.

간척지 토양염도별 식생분포 양상은 그림과 같다.

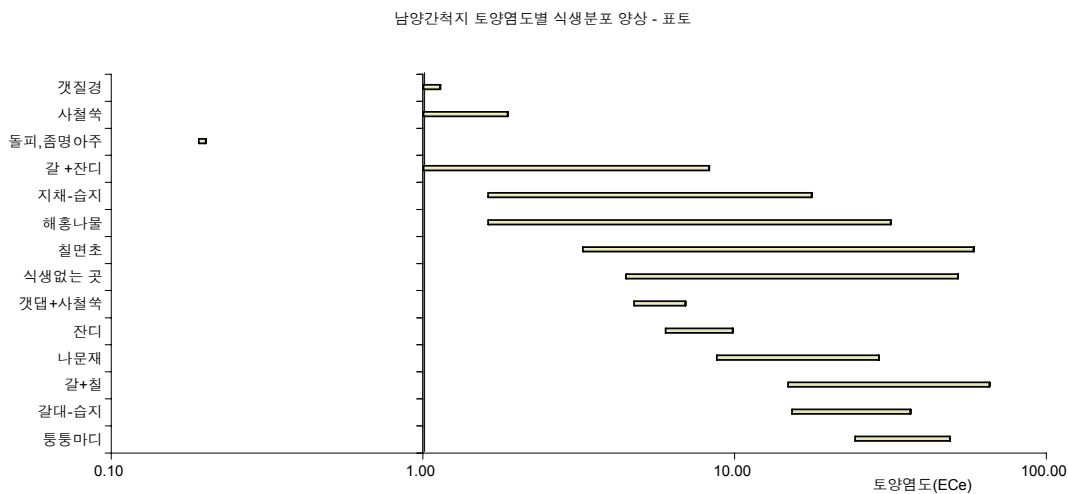


Fig. 6-17. The distribution of Vegetation upon the soil salinity in Namyong · Hwaong -surface soil.

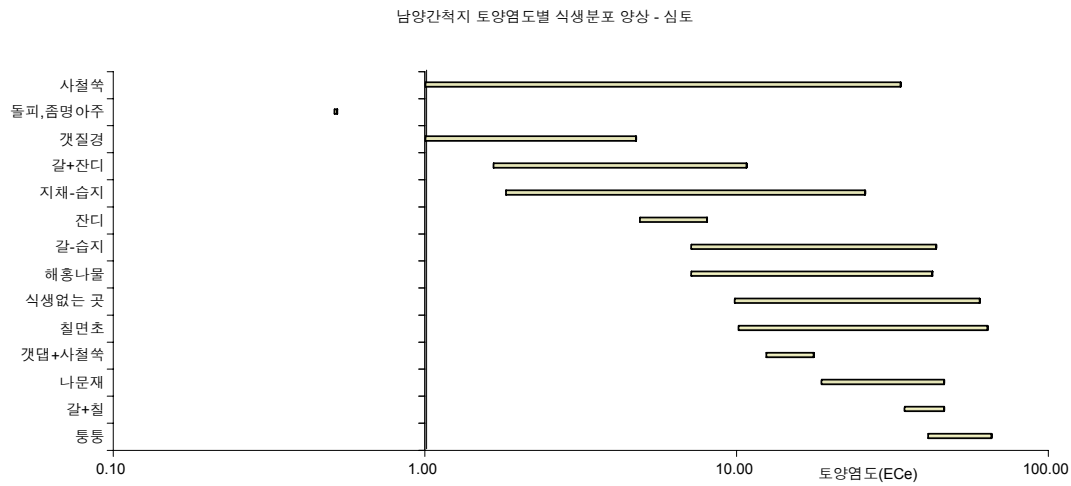


Fig. 6-18. The distribution of Vegetation upon the soil salinity in Namyong · Hwayong - subsoil.

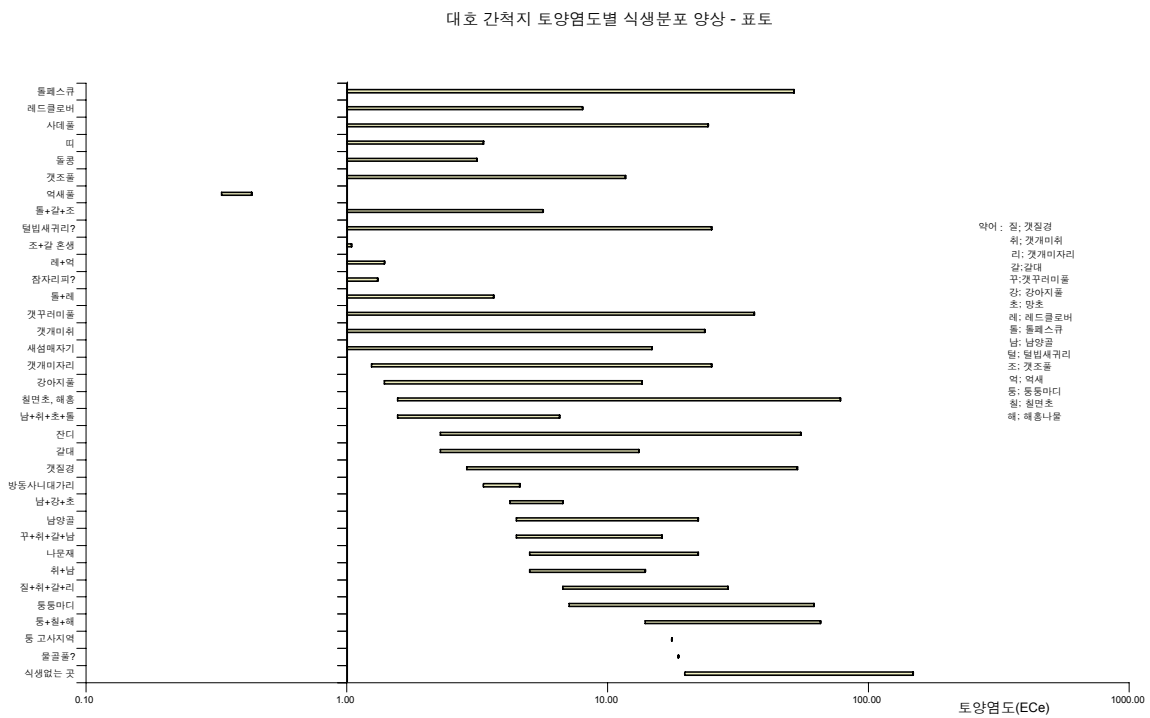


Fig. 6-19. The distribution of Vegetation upon the soil salinity in Daeho - surface soil.

대호 간척지 토양염도별 식생분포 양상-심토

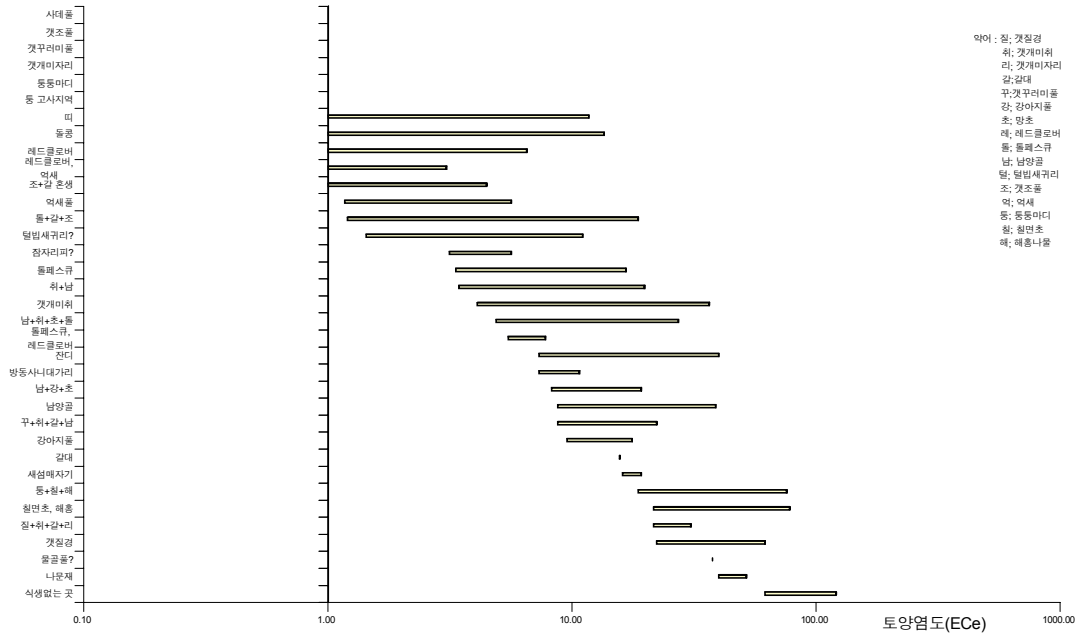


Fig. 6-20. The distribution of Vegetation upon the soil salinity in Daeho -subsoil.

석문간척지 토양염도별 식생분포 양상-표토

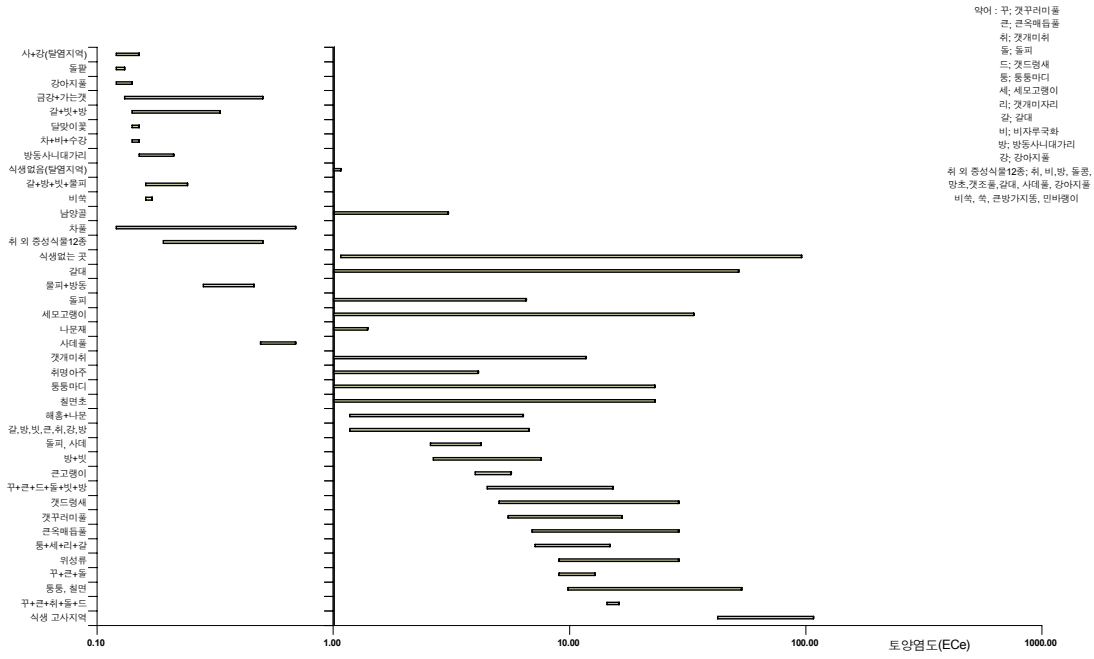


Fig. 6-21. The distribution of Vegetation upon the soil salinity in Seokmun - surface soil.

석문간척지 토양염도별 식생분포 양상-심토

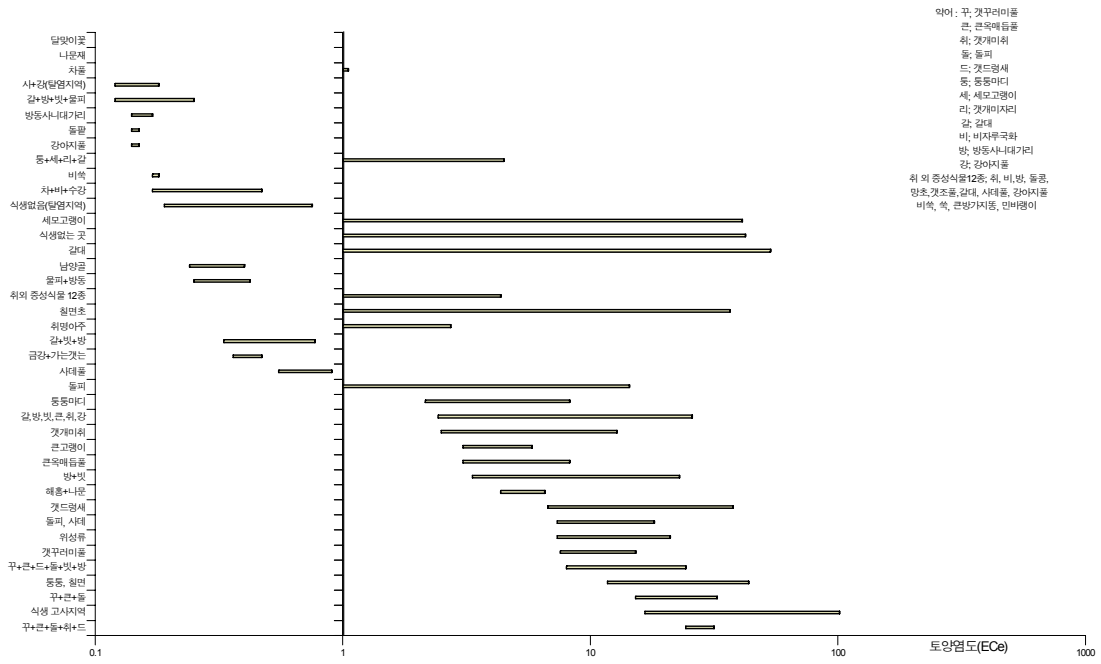


Fig. 6-22. The distribution of Vegetation upon the soil salinity in Seokmun -subsoil.

시화간척지 토양염도별 식생분포양상 - 복토지역(표토)

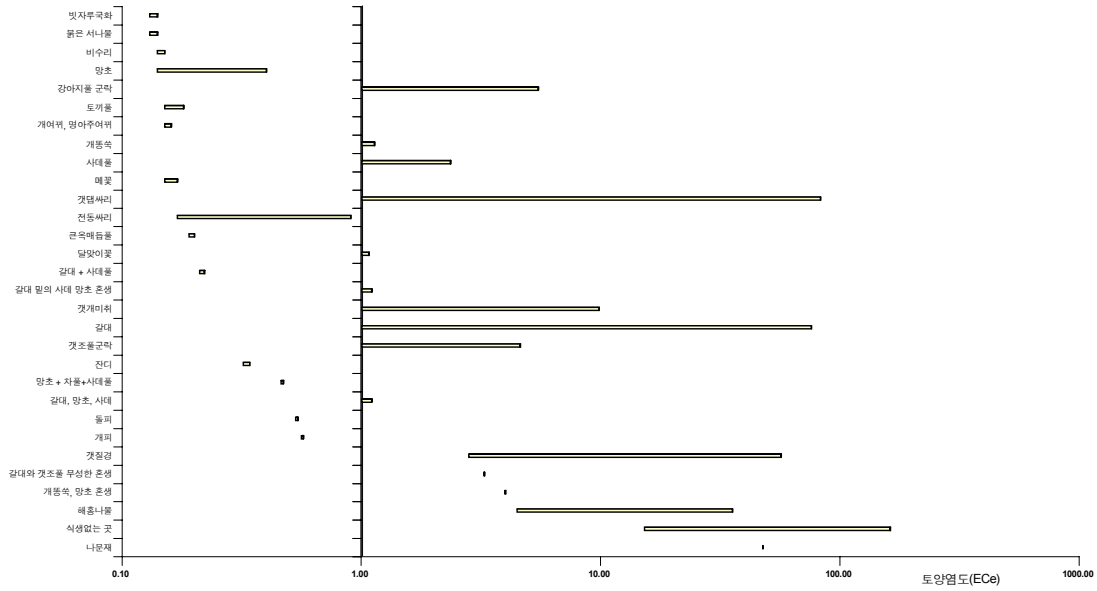


Fig. 6-23. The distribution of Vegetation upon the soil salinity in Sihwa - landfilled (surface soil).

시화간척지 토양염도별 식생분포양상 - 복토지역 (심토)

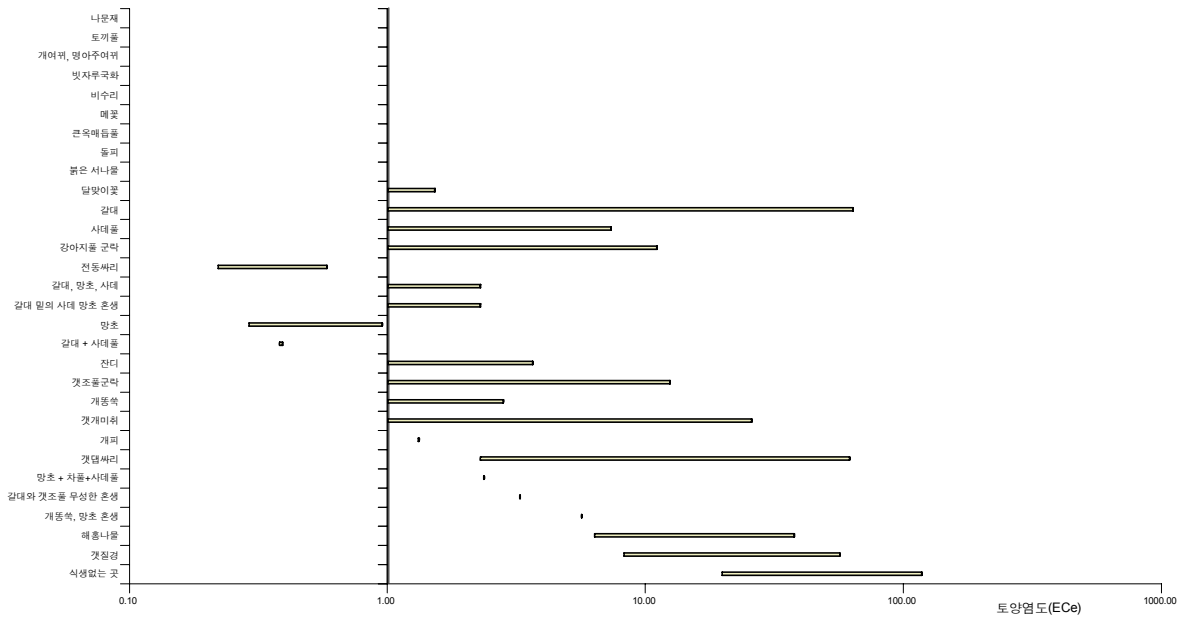


Fig. 6-24. The distribution of vegetation upon the soil salinity in Sihwa - landfilled (subsoil).

행당 갯벌 토양염도별 식생분포양상-표토

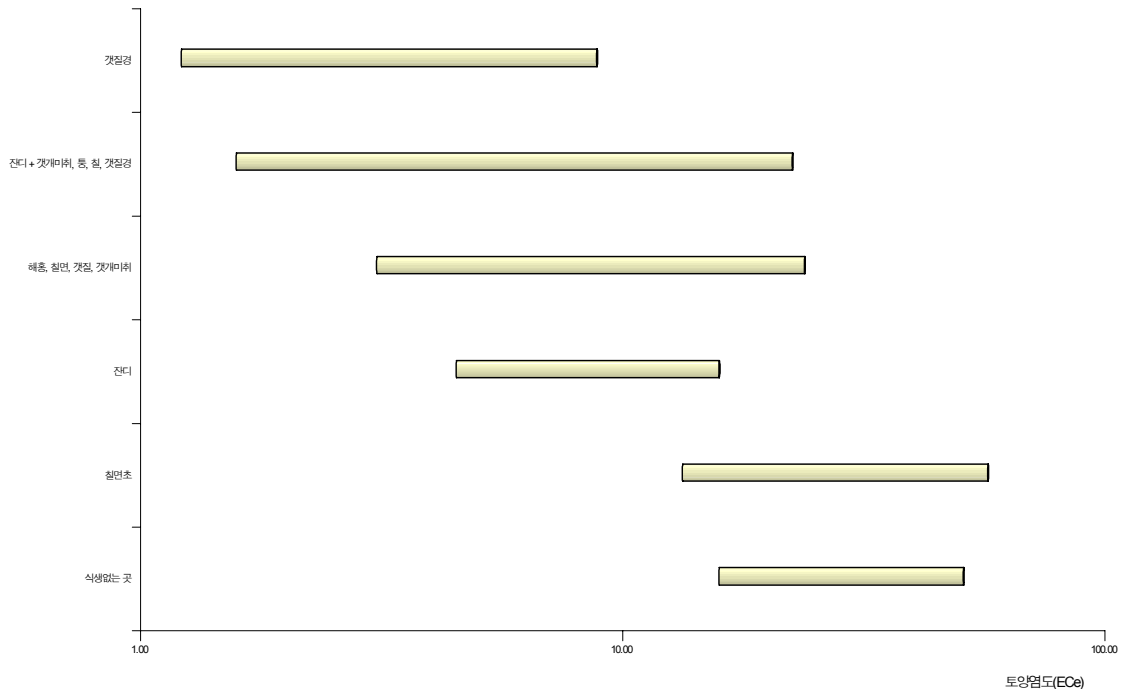


Fig. 6-25. The distribution of vegetation upon the soil salinity in Hangdang-surface soil.

행당 갯벌 토양염도별 식생분포 양상- 심토

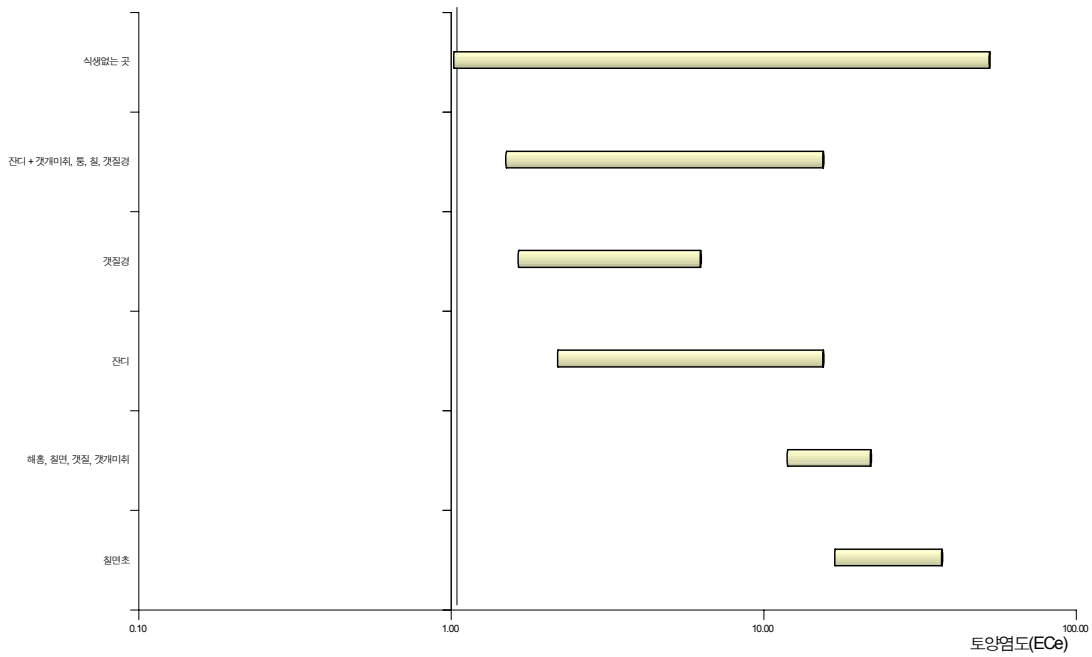


Fig. 6-26. The distribution of vegetation upon the soil salinity in Hangdang-sub soil.

본 연구에서는 출현하는 식생의 종만 분류하였고 식생의 생육상태에 대한 것은 연구되지 않았다. 그러나 간척지에 나타나는 식생의 생육상태는 토양환경 조건에 따라 다양한 차이를 보이고 있는바, 차후의 연구에는 생태적인 방법을 포함시켜 간척지의 토양환경(수분, 염농도, 미량원소)에 따른 식생의 분포 양상을 연구하여 토양환경 변화가 일으키는 식생 생태의 지속적인 추이분석과, 식생 생태의 추이 분석 결과를 응용할 수 있는 자료화 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다.

제 7 장 염류 토양과 관개수의 관리 지침서 개발

제 1절 서론

간척지 토양에서 염류도 관리의 핵심은 토양과 관개수의 염류 농도와 조성분의 관리에 있다. 간척 초기에는 염류 농도가 정상적인 영농이 불가능하므로, 조기 제염과 토양의 물리성 유지가 중요하다. 제염과 함께 작물의 재배가 가능해지면, 토양의 염류 농도에 따른 작물의 선택과 염류 피해 방지와 함께, 토양의 재염화 방지가 중요하다. 제염 과정이나 재염화 과정 모두에서 관개수의 역할이 중요성이 하다. 그러므로 토양 염류와 관개수 관리는 항상 동일시하게 마련이다.

관개수의 투입은 염의 투입을 의미한다. 관개수는 그 수질이 양호해도 수용성 염의 기본적인 공급원이다. 토양의 염류화를 피하려면, 이들 염이 투수에 의하여 근권 밖으로 배제되어야 한다. 투수수는 지하 수위를 높히는 원인이 되며, 지하수는 2차적인 염의 공급원이므로, 관개 지구 밖으로 배수되도록 해야 한다. 지하수는 염을 함유하기 쉬우므로, 약간의 지하 수위 상승도 근권의 염류도에 큰 영향을 줄 수 있다. 자연적이든 인공적이든 배수는 관개에 필수적인 보완책이다. 일반 토양에서 배수의 목적이 통기 개선을 위한 토양수의 제어인 반면, 간척지에서의 배수는 통기 조절과 함께 토양의 재염류화 방지가 목적이다.

우리 나라에서 간척지 토양 관리에 대한 연구가 오래 전부터 농촌진흥청과 농업기반공사를 중심으로 이루어져 왔으며, 이에 대한 국내 문헌이 정리되어 “간척 농업”으로 발간되었으며, 간척지에 관한 연구와 영농에 활용 크게 기여할 것으로 기대된다. 그러나, 이 책자에서 대규모 간척지 농업 관리에 핵심이라 할 수 있는 토양 염류도와 관개수 관리 문제 해결에는 다소 미흡한 부분이 있다.

이 연구에서 염류 토양 관리에 대한 기술적 방안을 제시하고자 간척지 등 함염토의 특징과 토양 관리 기술, 관수에 의한 염류 집적토의 토양 관리 기술, 및 비배 관리에 의한 염류집적 토양의 토양 관리 기술 등의 기술적 체계에 대한 국내외 문헌을 수집 정리하였다.

토양과 관개수 염류도 관리 지침에 대한 핵심 문헌으로 US Salinity Staff(1954)의 “Saline and Alkaline Soils”, FAO(1980)의 “Irrigated Agriculture”, 그리고, Tanji(1992)의 “Agricultural salinity assessment and management ” 등, 그리고, 염류도 관리와 배수 관리에 대한 문헌으로 Hoorn과 van Alphen(1994)의 “Salinity control” 등이 있으며, 그

밖의 수 많은 연구 문헌이 있다. 우리 나라에서 이루어진 연구 중 특히 우리의 관심을 끄는 최근의 연구로 안(1990)의 우리 나라 간척지 특성과 간척 후 토양의 이화학적 성질 변화에 관한 연구, (1998)의 연구, 구 등(2001)의 간척지 제염 예측 기법 개발에 관한 연구 등 국내외 연구 자료 수집가 수집되었다.

이 장에서 위 문헌들을 중심으로 토양과 관개수 염류도 관리를 위한 지침을 제시하고자 한다. 염해지의 기술 체계를 세우기 위해서는 첫째, 현장 조사를 통하여 식생에 대한 염해와 토양에 대한 염류도 평가가 이루어져야 하고, 둘째, 토양과 물 및 식물에 대한 정밀한 실험실 분석을 통해 염해의 원인이 규명되어야 하고, 셋째, 현장 조사와 실험실 분석 결과를 토대로 한 진단, 그리고 넷째, 이에 다른 기술 대책 수립이 이루어져야 한다(그림 7-1). 이 장에서, 먼저, 제2절에서 우리 나라 염류 토양의 특성, 그리고 제 3절에서 염류 토양의 본질과 염류도 평가에 대한 내용이 담겨져 있다. 제 4절에서는 관개 용수의 수질 기준과 염류도 관리 지침이 설명되어 있다. 제 5절과 6절에서는 용탈과 지하수 상승에 대한 실용적 문제가 다루어져 있으며, 마지막 제 7절에서 작물의 내염성과 염류 토양에서의 재배 관리 기술이 다루어져 있다. 더 자세한 내용은 별책 부록에 실었다.

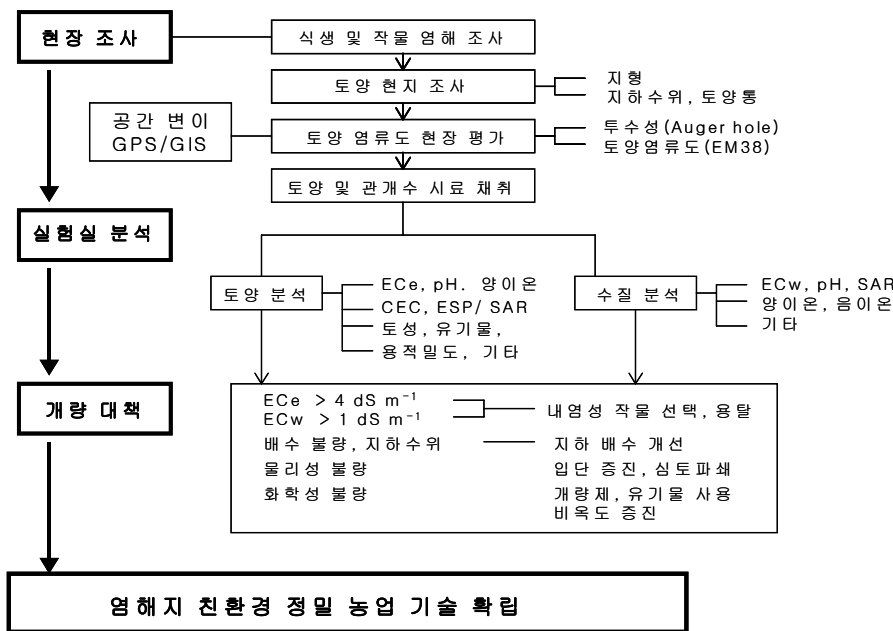


그림 7-1. 염류 토양 관리의 기술 체계 수립 흐름도

제 2 절 우리 나라 간척지 토양의 특성

1. 간척지의 특징과 분포

우리 나라의 서·남해안에 분포된 간척지는 수력에 의하여 운반된 모재가 해안 평탄지에 축적되거나, 조수에 의하여 해안이 침식되어 풍화된 모재가 해안을 따라 축적되어 형성된 간척지를 개간한 토양이다(류 등, 1998). 이들 간척지는 조석 간만의 차이가 큰 리아스식 만, 석호, 해안 사구의 배후지 등으로, 해저 경사가 비교적 완만한 해안에 잘 형성되어 있는 퇴적 지형에 위치한다. 이러한 특징 때문에 간척지는 해안선이 매우 복잡하고, 평탄하며, 만입을 이루고 있다. 따라서 이들 간척지는 만입된 지형과 섬을 연결하여 제방을 쌓기 쉬운 간척지로 개발하기 좋은 조건을 갖추고 있어, 일찍이 고려 고종 22년(1235년)에 강화도에서 영안 방조제를 축조하여 간척지를 조성한 기록이 있다(호남농업시험장, 2002).

1976년 농업진흥공사(현 농업기반공사)의 조사에 따르면, 우리 나라 서·남해안에 분포되어 있는 간척 가능한 간척지의 면적은 635천 ha에 달하며, 이중 간척 가능한 간척지는 442천 ha인 것으로 파악되었다(표 7-1).

표 7-1. 서·남해안의 간척 가능 간척지의 지형별 분포

지형	간척지 분포 면적(ha)				
	경기	충남	전북	전남	계
천해지		37,334	126,572	65,304	229,210
정규조간대	52,485	16,690	33,624	69,786	172,585
염수 습지	8,321	9,646	2,161	6,632	26,760
기타	8,441			5,004	13,445
계	69,247	162,357	162,357	146,726	442,000

천해지(Subtidal zone)은 평균 간조위 이하의 퇴적 지형으로, 정규 조간대의 하부에 접하고 있다. 수심이 수 m에 이르기 때문에 개발 후 기계 배수가 필요하다. 지역적으로 전북에 많이 분포하고 있다.

정규 조간대(Intertidal zone)은 평균 만조위와 평균 간조위 사이에 위치한 지형으로, 천해지 보다 육지 쪽에 자리하고 있고, 조수의 영향을 많이 받는다. 지역적으로 전남에 많이 분포하고 있다.

염수 습지(Salt Mash)는 대조의 평균 만조위 때에만 바닷물에 잠기는 지형으로, 염생 식물인 나문재(*Suaeda asparagoides* H.), 통통마디(*Salicornia herbacea* L.) 등이 자라고 있다

(안, 1990). 경기 지역에 많이 분포하고 있다.

간석지 토양의 일반적 특성을 조사한 농업진흥공사의 보고서(1989에 따르면, 우리 나라 간석지 토양의 토성은 미사질계 토양이 가장 많으며, 사토, 양질사토, 사양토 등 조립질 토양이 많다. 식질계 토양은 많지 않다.

표 7-2. 간석지 토양의 토성별 분포

토성	분포면적 (ha)	비율(%)	
사질 토양	사토	16,394	6.2
	양질사토	57,420	21.7
	사양토	40,629	15.3
	소계	114,443	43.2
미사질 토양	미사토	21,978	0.2
	미사질양토	124,862	47.1
	소계	125,329	47.3
식질토양	미사질식양토	21,978	8.3
	미사질식토	3,055	1.2
	소계	25,033	9.5

농업진흥공사(1989, 조사면적 264,805ha)

간척지의 배후지에 대한 토양 특성을 농업기술연구소의 정밀 토양 조사 결과인 하해 혼성 토양을 토성 중심으로 살펴보면, 미사질 토양인 조립 미사질토(coarse silty)와 세립 미사질토(fine silty)가 전체의 70.4%로 가장 많다. 세립 미사질토와 세립 양질토의 분포 비율은 간석지의 분포 비율과 비슷하다. 이에 비해 조립 미사질토의 분포 비율은 간석지에서 적은 반면, 조립 양질토와 사질토가 간석지에서 많다. 하해 혼성 평탄지의 세립질 토양은 80% 이상이 논으로 이용되고 있지만, 조립질 토양은 20% 이상이 논 이외의 목적으로 이용되고 있으며, 사질 토양의 경우에는 논으로 이용 비율이 50%에 불과하다. 이러한 간석지와 배후지의 토성 분포 차이가 의미하는 것은 앞으로 간척되는 간석지는 조립질 토양의 비율이 높아질 가능성이 있으며, 논 이외의 목적으로 사용되어야 할 부분이 많아질 가능성을 내포하고 있다. 예를 들어 우리 나라의 최대 간척 사업이 진행되고 있는 새만금 사업 지구의 토양도 조립질에 가까운 토양이 많아, 논 이외의 다목적 이용 가능성이 크다.

표 7-3 서남해안 간척지와 하해 혼성 평탄지의 토성별 분포와 논이용 비율

토성	간척지*		하해혼성 평탄지**		논면적 (ha)	논이용율 (%)
	면적 (ha)	비율 (%)	면적 (ha)	비율 (%)		
Sandy	90,531	20.5	9,235	3.4	4,688	50.8
Co. loamy	66,859	15.1	18,705	6.9	14,912	79.7
Co. silty	60,287	13.6	100,138	36.7	79,073	79.0
Fi. loamy	62,718	14.2	47,269	17.3	42,399	89.7
Fi. silty	161,605	36.6	91,769	33.7	80,277	87.5
Fi. clayey		0.0	5,542	2.0	5,277	95.2
계	442,000	100.0	272,658	100.0	226,626	83.1

* 안(1990)

** 농업기술연구소(1992) 자료 재정리

2. 간척지 토양의 분류와 화학적 특성

간척지 토양의 특성을 농업기술연구소의 토양 정밀 조사 결과를 통하여 살펴보면, 주로 하해 혼성 또는 해성 충적토인 가포, 광포, 광활, 문포, 염포, 포승통과 일부 해안 사구의 퇴적토인 하사와 해리통 등 49개 토양통이 간척지와 이에 연결한 해안에 분포하고 있다(표 7-4).

간척지 및 이에 연결한 하사, 문포, 염포, 광활, 포승통이 바다와 면한 간척지로부터 토양 카테나를 형성하고 있다(그림 7-2). 해안에 가까운 염포, 문포, 하사, 광활통은 Soil Taxonomy상에서 Entisol, 그리고 포승은 Inceptisol에 속하는 토양이다.

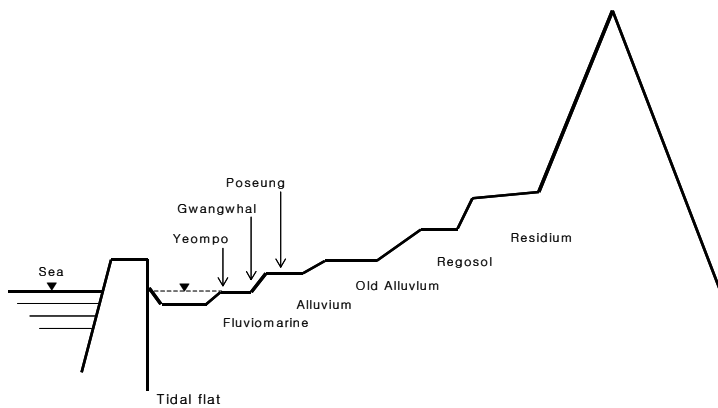


그림 7-2 간척지 토양 카테나(류 등, 1998)

이들 토양 단면의 형태적 특성을 그림 7-3에서 살펴보면(호남농업시험장, 2002), 지하 수위의 고저와 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 지하수의 영향을 많이 받는 토양의 기층은 심히 환원되어 토색은 청회색 내지 암회색을 나타내고, 토양 중 반문은 거의 형성되지 않는 것이 특징이다. 지하 수위의 상층 부위와 작토층은 등색, 회갈색, 암회색을 나타내며, 또한 대부분 황갈색의 반문이 형성되어 있어, 일부 산화환원의 영향을 받음을 알 수 있다. 이와 같이 토양의 형태적 특성에 큰 영향을 미치는 지하 수위는 염포통이 20~30cm로 가장 높으며, 광활, 포승통은 50~60cm, 문포통은 50~80cm이며 하사통은 90~100cm로 가장 낮다. 또한 지하 수위에 따라 토양의 배수 상태가 다르며, 지하 수위가 가장 높은 염포, 광활, 포승통은 배수가 매우 불량하고 지하 수위가 중간인 문포통은 약간 불량하다. 지하 수위가 가장 낮은 하사통은 배수가 약간 양호하다.

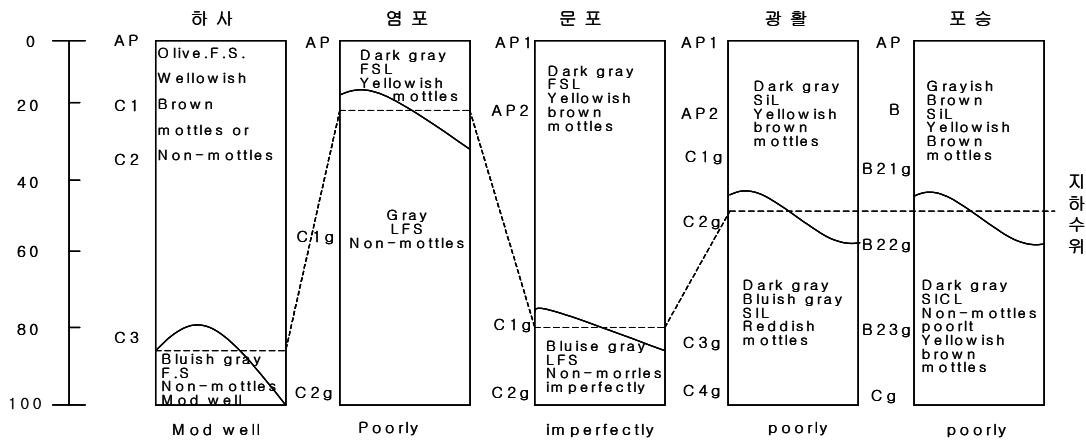


그림 7-3. 간척지 토양단면 특성(호남농업시험장, 2002)

염포통은 Soil Taxonomy에 의하면, mixed, mesic family of Typic Psammaquepts에 속하는 세사양토 또는 양질사토이다. 지하 수위가 지표로부터 20~40cm 깊이로 지표 부근에 있어, 배수가 불량하고, 토심이 낮다. 표토는 암회색이다. 심토는 회색이며, 반점이 없고, 구조의 발달이 없다. 토층의 분화가 약하며, B층의 발달이 없다. 광활통은 coarse silty, mixed nonacidic mesic family of Typic Endoaquepts에 속하며, 표토는 암회색 농암회색 또는 농암갈색의 미사질 양토 양토 혹은 극세사양토이다. 지하 수위는 40~60cm로 염포통보다 깊고, 배수는 불량하지만, 약간의 배수가 이루어져 황갈색 또는 적색 반점이 있다. 포승통은 fine silty, mixed nonacid mesic family of Typic Endoaquepts에 속하는 토양으로, 표토는 암회색, 농암회색 미사질양토이며, 암활갈색, 올리브색 반문이 있다. 심토는 암회색 미사질양토이며, 암회갈색 반문이 있고, B층의 분화가 이루어져 있으며, 발달이 약한

각주상 구조를 갖는다. 문포통은 coarse loamy, mixed, nonacid, mesic family of Typic Fluvaquents로 지하수위가 광활통이나 포승통보다 깊은 토양이며, 심토의 토성은 세사토이다. 하사통은 mixed mesic family of Aquic Quartzisamments로 사구에 가까운 토양이다.

이들 대표적인 간척지 토양의 이화학적 특성을 살펴 보면, 미사 함량이 2~70%, 점토 함량은 3~24% 범위였으며, 포승>광활>문포>염포>하사통의 순서로 내륙에 가까울수록 미사 및 점토 함량이 증가하였으며, 해면에 가까울수록 모래 함량이 많았다. 또한 유기물 함량은 표층에 0.2~0.8%로 낮았으며, 특히 점토 함량이 낮은 하사통 및 염포통에서 0.2~0.8%에 불과하였다. 염기교환용량(CEC)은 점토 함량이 낮은 염포 및 하사통에서 2.9~6.5 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 로 매우 낮은 반면, 점토 함량이 많은 포승통은 12.5 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 로 비교적 높았다.

이와 비슷하게, 간척지 토양에서 Ca, Mg, K 및 Na 등의 양이온 함량은 조립질 토양에 비하여 중립질 토양에서 높아지는 경향이였다. 토양의 pH는 표토에서 4.6~7.4이었으나, 깊이 80 cm 이하에서는 염포통을 제외하고는 7.1 이상을 보였고, 염 농도는 1~2.3%로 높았다.

간척지 토양에서 지하 수위가 높은 토양에서 염농도가 높은 경우가 많다. 이는 염농도가 높은 지하 수위가 지면 부근에 있으면, 이의 영향을 받아 염농도가 높고, 특히 지면에서 증발에 따라 염이 상승하기 때문이다. 또한 지하 수위가 높으면, 제염이 늦어진다. 제염이 되려면, 배수가 필수적이다. 배수가 이루어지는 것은 지면으로부터 침투된 물이 내려가는 수직 배수와 배수수 배출구로 나가는 수평 배수로 이루어지는 데, 토양의 수리전도도가 큰 사질토에서 수직 배수가 빠르다 해도, 지하수위가 높으면, 수평 배수가 매우 느리게 된다. 이에 따라서 제염이 느려지게 된다.

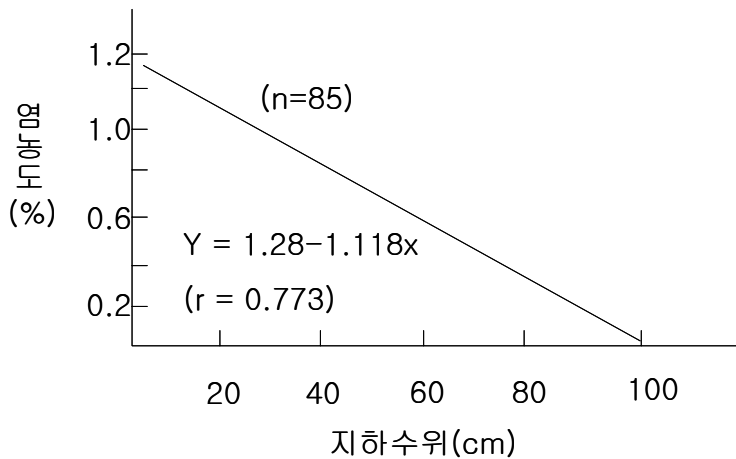


그림 7-4. 지하 수위에 따른 염농도(호남시험장, 2002)

표 7-4. 간척지 토양의 분류

목 (order)	아목 (Suborder)	대군 (Great Group)	아군 (Sub Group)	토성속 (Texture Family)	토양통 (Series)
Entisols	Aquepts	Psammaquepts	Typic Psammaquepts	Sandy	염포(Yeompo)
			Typic Fluvaquepts	Coarse loamy	문포(Munpo)
				Loamy skeletal	가포(Gapo) 율포(Yulpo)
Inceptisols		Endoaquepts	Typic Endoaquepts	Fine silty	포승(Poseung)
			Typic Endoaquepts	Coarse silty	광활(Gwanghwal)
Entisols		Hydraquepts		Typic Hydraquepts	Coarse loamy
				Fine silty	포두(Podu)
	Fluvents	Udifluvents	Typic Udifluvents	Coarse loamy over sandy	북평(Bugpyeong)
	Psammets	Quartzipsammets	Typic Quartzipsammets	Sandy	비천(Bicheon)
			Typic Udipsammets	Sandy skeletal	대본(Daebon) 일평(Ilpyeong)
				Aquic Udipsammets	Sandy over loamy
			Aquic Quartzipsammets	Sandy	백수(Baegsu) 하사(Hasa)
Inceptisols	Aquepts	Endoaquepts	Typic Endoaquepts	Coarse loamy over sandy	동호(Dongho)
				Coarse loamy	금진(Geumjin) 학포(Hagpo)
				Fine loamy over Coarse loamy	다평(Dapyeong)
				Fine loamy	평해(Pyeonghae)

목 (order)	아목 (Suborder)	대군 (Great Group)	아군 (Sub Group)	토성속 (Texture Family)	토양통 (Series)
Inceptisols	Aquepts	Endoaquepts	Typic Endoaquepts	Fine loamy over clayey	승주(Seungju)
				Fine silty	복천(Bogcheon) 향호(Hyangho)
				Fine	포리(Pori)
				Fine silty	전북(Jeonbug)
				Fluvaquentic Endoaquepts	광포(Gwangpo)
				Coarse loamy	만경(Mangyeong)
				Coarse silty	학성(Hagseong)
			Fluvaquentic Endoaquepts	Fine silty over sandy	춘포(Chunpo)
				Fine loamy over Coarse silty	등구(Deunggu) 덕하(Deogha) 봉림(Bongrim) 김해(Gimhae)
				Fine silty over sandy	달동(Daldong)
				Coarse silty	해척(Haecheog)
				clayey over	김제(Gimje)
				Fine silty	공덕(Gongdeog) 봉남(Bongnam)
				Fine	
Entisols			Lithic Endoaquepts	Coarse loamy	태안(Taean)
			Vertic Endoaquepts	Fine	서탄(Seotan)
Alfisols	Aqualfs	Endoaqualfs	Typic Endoaqualfs	Fine	부용(Buyong)
Mollisols	Udolls	Hapludolls	Fluventic Hapludolls	Sandy	명지(Myeongji)
Histosols	Hemists	Haplohemists	Terric Haplohemists	Fine	용호(Yongho)

*호남농업시험장(2002)

표 7-5. 염류 토양의 물리 화학적 특성

토양통	층위	깊이 cm	입경분포			토성	pH (1:5)	O.M %	CEC	Ex.cation				염농도 %
			모래 -	미사 %	점토 -					Ca	Mg	Na	K	
									cmol _c kg ⁻¹					
하사	AP	0~13	94.8	1.8	3.4	FS	6.8	0.24	2.9	1.2	0.45	1.4	0.08	0.3
	C ₁	13~21	92.4	3.0	4.6	FS	7.7	0.31	2.0	1.5	0.33	1.4	0.10	0.2
	C ₂	21~38	93.8	3.0	3.2	FS	6.9	0.10	1.9	1.4	0.27	1.3	0.08	0.5
	C ₃	38~83	64.9	2.8	2.3	FS	7.0	0.07	1.6	1.1	0.22	1.4	0.08	0.8
	C ₄	83~100	94.2	2.6	3.4	FS	7.1	0.19	1.3	0.9	0.16	1.5	0.06	1.0
염포	AP	0~10	69.7	25.3	5.0	FSL	5.6	0.56	4.0	1.2	1.41	4.0	0.23	1.0
	C _{1g}	10~55	75.9	20.9	3.2	LFS	5.5	0.47	4.2	1.3	1.31	3.9	0.11	0.6
	C _{2g}	55~100	91.2	6.7	2.1	FS	5.9	0.38	3.8	1.0	1.20	4.2	0.08	1.5
문포	AP ₁	0~8	47.0	46.5	6.5	FS	6.7	0.8	6.5	1.5	3.60	2.4	0.26	0.6
	AP ₂	8~18	51.7	42.0	6.3	FS	8.1	0.24	6.5	1.5	3.50	3.2	0.39	0.8
	C _{1g}	18~70	87.0	10.5	2.5	FS	8.1	0.19	5.9	1.6	2.84	3.6	0.50	1.3
	C _{2g}	70~100	76.8	19.0	4.2	LFS	9.4	0.95	9.0	1.5	3.17	2.9	0.71	1.8
광활	AP _{1g}	0~12	26.6	68.1	5.3	SiL	7.4	0.81	6.9	3.5	4.40	2.9	0.55	0.7
	AP _{2g}	12~22	36.7	54.8	8.5	SiL	8.1	0.35	5.8	2.9	5.30	4.4	1.14	0.9
	C _{1g}	22~35	19.3	60.6	20.1	SiL	8.0	0.63	8.4	1.9	5.60	2.7	1.20	0.9
	C _{2g}	35~56	24.9	64.5	10.6	SiL	7.7	1.04	7.2	3.0	3.67	1.9	1.16	1.5
	C _{3g}	56~85	25.1	62.5	12.4	SiL	7.6	0.56	6.3	1.9	5.87	5.2	1.08	1.7
	C _{4g}	85~150	24.0	64.2	11.8	SiL	7.8	0.37	9.9	3.5	3.05	2.8	1.10	2.3
포승	AP	0~10	7.3	69.1	23.6	SiL	4.6	2.01	12.5	5.3	2.30	2.5	2.46	0.8
	B ₁	10~25	4.6	64.3	31.6	SiCL	5.8	1.39	11.6	4.4	2.68	1.6	0.18	0.6
	B _{21g}	25~35	10.4	58.7	30.9	SiCL	6.7	0.89	12.6	2.8	3.40	1.9	0.26	0.6
	B _{22g}	35~50	5.4	68.2	26.4	SiL	6.6	1.22	12.9	5.4	2.99	2.0	1.84	0.7
	B _{23g}	50~80	3.4	71.7	24.9	SiL	6.5	0.73	13.2	5.1	3.17	2.1	1.10	1.0
	Cg	80~140	10.6	61.8	27.6	SiCL	7.1	0.60	14.7	6.1	3.63	1.3	0.11	2.2

*호남농업시험장(2002)

3. 경작지로서 간척지 토양의 일반적인 문제점

간척지는 평탄하며, 면적이 넓어 농업 용지로 일맞다(류 등, 1998). 그러므로, 우리나라에서는 오래 전부터 간척한 토지를 농경지로 이용해 왔다. 특히, 간척지는 물이 공급될 수 있는 곳에서 제염을 하여 논으로 사용해 왔다. 논 농사의 특징은 알맞은 관개수를 계속 담수하면서 제염이 이루어지는 과정에서 재배할 수 있다는 점에서 대부분의 간척지는 논농사에 의존하게 되었다.

간척지는 이러한 유리한 입지 조건에도 불구하고, 토양의 염의 함량이 높아 재배 작물이 제한되는 데다가, 토양과 물관리가 어렵다. 또한 간척지는 저지대에 위치하고, 지하수위가 높아 배수가 불량하며, 지형적인 영향으로 홍수기에 침수될 우려가 있으며, 지역에 따라서는 농업용수가 부족한 곳이 있어 영농에 어려움이 있다. 간척지 토양의 토성은 양질사토 내지 미사질식양토이며, 토양의 구조 발달이 없이 토양 입자가 분산되어 있어, 투수성과 통기성이 나쁘고, 지내력이 약하다. 이러한 여러 가지 토양 조건에 의하여, 제염이 어렵고, 작물 뿌리의 활착과 신장이 나쁘며, 비배 관리도 어렵다. 특히 새로 조성되고 있는 간척대상지의 토양은 조립질 토양이 대부분이어서, 밭으로 이용할 경우 해안의 강한 바람에 의하여 풍식이 일어날 가능성이 있다. 따라서 간척지의 효용성을 높이기 위해서는 토양의 특성을 정확히 알아내고, 이에 따른 합리적인 토양 관리 대책을 강구해야 한다.

제 3절 토양의 염류도와 나트륨 염성

1. 염류 문제의 본질

토양의 염류 문제는 토양 용액 중 수용성 염류의 이온 활동도에 의하여 일어난다. 활동도 개념은 이온이 용액 중에서 실제 활동은 농도가 무한히 낮은 이상 조건에서의 활동과 다르다는 데 근거를 하고 있다. 수용액 중 어떤 이온의 활동도는 이온의 농도와 이온 세기로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a_i = \gamma_i m_i \quad (7-1)$$

여기서 γ_i 는 화학종 i 의 활동도 계수이고, m_i 는 몰랄농도(mols/kg 용매)이다. 염류 농도가 매우 높은 경우를 제외하고, m_i 는 몰농도(mol/L)로 가정할 수 있다. 활동도 계수는 이온 강도 I 와 관련이 있으며, I 는 용액 중 화학종 i 의 이온가와 몰랄 농도로부터 다음과 같이 계산된다.

$$I = 0.5 \sum m_i z_i^2 \quad (7-2)$$

결국 수용액 중 모든 이온의 활동도는 묽은 용액에서 화학종의 이온 농도와 이온가에 의해서 결정되며, 활동도 총합이 같으면, 같은 성질을 나타내게 된다. 이를 용액의 총괄성이라 한다. 용액의 총괄성은 어느 점과 끓는 점의 강하, 전기 전도 특성 등이 대표적이다. 수용액의 전기 전도 특성은 전기전도도(Electrical conductivity, EC)로 표시한다.

EC와 이온 세기 사이의 실험식은

$$I = 0.0127 EC \quad (7-3)$$

이다(Griffin과 Jurinak, 1973).

수용액에서 염류의 총괄성으로 나타나는 또 하나의 중요한 성질은 삼투압 포텐셜이다. 즉, 토양 중 염류의 총 농도가 높아지면, 물의 삼투압 포텐셜이 낮아져, 작물이 토양으로부터 물을 흡수하기 어려워진다. 작물에 대한 염 저항성은 삼투압 포텐셜(ψ)의 함수이다. 삼투압 포텐셜 (ψ , kPa)는 다음과 같이 계산된다.

$$(7-4)$$

여기서 ϕ_i 는 화학종 i 의 삼투압 계수이고, n_i 는 염에 의해 생성된 이온의 화학량 수이다. ϕ_i 는 그림 3.2에서와 같이 염의 총농도를 이용하여 구할 수 있다. ψ 와 25°C에서의 EC사이의 관계는 식 7-5와 같다.

$$(7-5)$$

일반적으로 사용되고 있는 ψ 에 대한 계수 36은 0°C에 대한 값이다(US Salinity Laboratory, 1954).

염류 토양의 주 양이온은 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 그리고 양은 적지만 K^+ 이다. 주 음이온은 Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , 그리고 pH가 높은 조건에서 있는 CO_3^{2-} 이다. HCO_3^- 와 CO_3^{2-} 는 합쳐서 탄산염 알칼리도로 표시한다. 혐기 조건에서 존재하는 NH_4^+ , NO_2^- , 유기산 등은 흔히 무시된다.

염류 농도가 높은 관개수 중에서 문제가 되는 성분으로 B, Sr, Li, SiO_2 , Rb, F, Mo, Mn, Ba, Al 등이 있다. 이들 중 일부는 미량 원소로 작물의 생육에 꼭 필요한 성분이기도 하다.

2. 염류도의 척도

염류도(Salinity)의 척도로 염류의 농도와 전기전도도가 사용된다. 토양 용액과 토양 추출액의 전기전도도는 염류 농도와의 밀접한 관련성 때문에, 토양의 염 함량에 대한 총괄

적 지표로 EC로 표현된다. 표준 온도 25 °C에서 EC는 dSm^{-1} 로 표시한다. 과거에 사용되던 단위는 mmho/cm 이었다($1 \text{ mmho/cm} = 1 \text{ dSm}^{-1}$). 관개수의 EC는 $\frac{\text{Scm}^{-1}}{\mu} (= \frac{\text{mho/cm}}{\mu})$ 를 사용하기도 한다.

용액의 염 농도는 일반 단위 gL^{-1} , mgL^{-1} (=ppm), meq L^{-1} 또는 SI 단위 kg m^{-3} 또는 mol m^{-3} 으로 표시된다. 밀리당량(milli equivalent; me)은 1 mg 수소 이온을 치환할 수 있는 이온의 당량이며, 원자량 또는 몰 질량을 이온가로 나눈 값이다. 현재 사용되는 단위는 $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$ (mlli mol charge per litre)이다. 그림 7-5는 EC(dSm^{-1})와 염농도($\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$)간의 관계이다.

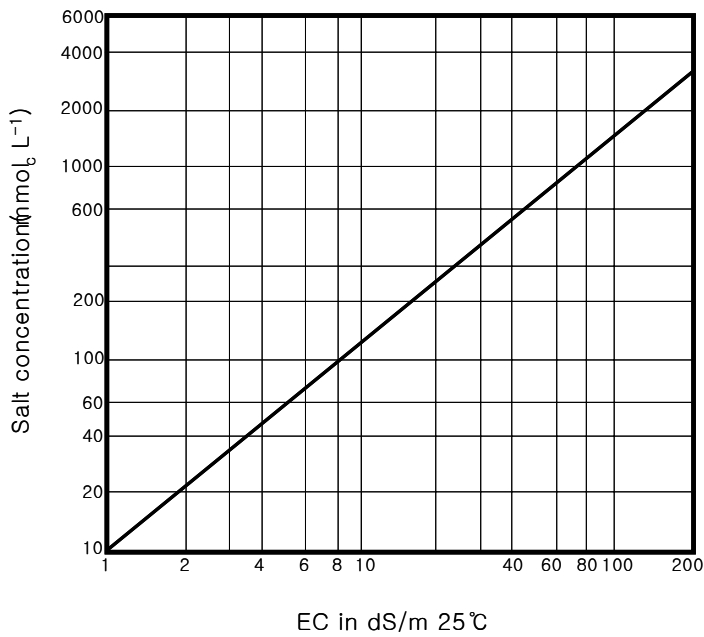


그림 7-5. EC와 염농도의 관계

전기전도도(dS/m)와 총수용성 염류의 농도(TSS in $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$)와 이온의 농도(C in $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$)와의 실험적 관계식은 식 7-6이다(Marion과 Babcock, in Tanji, 1992). 여기서 이온의 농도 C는 이온쌍에 대하여 보정한 것이며, 이온의 착화합형성이 없다면 $\text{TSS} = C$ 이다. 유도된 관계식은 토양의 추출액, 강물, 순수 염용액 등 여러 자료를 근거로 만들어진 것이다. 범용으로 사용될 수 있는 식은

$$\log C = 0.955 + 1.039 \log EC \quad r^2 = 0.997 \quad (7.6)$$

$$\log TSS = 0.990 + 1.055 \log EC \quad r^2 = 0.993 \quad (7.7)$$

이다.

개략적으로

$$TSS(\text{mmol}_c/\text{L}) = 10 EC(\text{dS/m}) \quad (7.8)$$

또는

$$1 \text{ dS/m} = 10 \text{ mmol}_c/\text{L} = 640 \text{ mg/L}$$

로 대치될 수 있다(US Salinity Laboratory, 1954).

낮은 농도에서 EC 1 dSm⁻¹인 용액의 염농도는 10 mmol_cL⁻¹이며, 높은 농도인 EC 10 dSm⁻¹인 용액의 염농도는 120 mmol_cL⁻¹이다. 1 mmol_c에 대한 mg 수의 비율이 높은 농도에서 낮아지는 이유는 낮은 농도에 비해 Cl⁻가 차지하는 비율이 SO₄²⁻ 및 HCO₃⁻ 이온이 차지하는 비율보다 커지기 때문이다. 그리고, 1 dSm⁻¹에 대한 mmol_c의 비율이 커지는 이유는 농도가 높아짐에 따라서 이온 활성도가 낮아지기 때문이다. 낮은 농도에서는 EC에 10을 곱하면 mmol_cL⁻¹로 표시된 염농도를 알 수 있으며, 높은 농도에서는 12에서 15를 곱해야 한다.

3. 토양의 전기전도도 측정

토양 염류도를 평가하기 위해서, 여러 가지 토양 용액 추출액에 대한 염농도를 측정한다. 가장 신뢰할 수 있는 평가 방법은 포장 용수량 상태의 토양 용액에 대한 염농도 측정이다. 이 방법을 통해야 포장 조건에서 토양 수의 실제 염농도를 알 수 있고, 이 상태의 염농도가 직접 작물 생육과 관련이 있다. 실험실에서, 포장 용수량 상태의 토양 수 시료를 충분히 얻기 대단히 어렵다.

가장 흔히 염류도 평가에 사용되는 방법이 포화침출액법이다. 건조 토양 시료에 증류수를 가해 포화 반죽을 얻는다. 포화 반죽으로부터 감압 추출하여 분석 시료를 얻는다. 사토와 양질 사토 등을 제외한 대부분의 토양에서 포화 반죽의 수분 함량은 포장용수량의 2배이다. 그러므로, 포화 반죽은 불교란 포장 상태에서의 포화 조건보다 과포화 상태인 경우가 있으며, 포화 추출액은 포장 상태의 토양수에 비해 희석된 것이다.

염류도의 변화를 알아내기 위하여 동일한 토양에서 시료를 채취할 경우, 건조한 토양에 동일한 양의 물을 가하여 추출해야 한다. 그렇지 않으면, 수분 함량의 차이가 ECE의 차이를 유발할 수 있다.

측정된 EC 값은 용액의 온도에 민감하다. 용액의 온도 범위가 15에서 35℃일 때, 온도

1°C 상승에 EC는 2% 높아진다. 따라서 모든 EC값은 25°C를 표준으로 한다. 이 값을 EC₂₅로 표시하면,

$$EC_{25} = EC_t - 0.02 (t-25) EC_t \quad (7.9)$$

이다. 여기서 EC_t는 온도 t에서의 EC 값이다.

NaCl 염과 같이 수용성이 큰 염의 경우에, EC는 거의 토양 수분 함량에 반비례하며, 다음과 같이 개략적으로 환산할 수 있다.

$$EC_{fc} = 2 \times EC_e \quad (7.10)$$

포화 침출액 조제가 힘들 경우 토양과 증류수의 비율을 1:1(100 g 토양에 100 ml 증류수 혼합), 1:5, 또는 그 밖의 일정 비율로 희석된 시료에 대한 분석을 할 수 있다. 희석된 토양 용액에 대한 EC로부터 EC_e를 환산할 수 있다. 이 때, 희석 계수(DF; dilution factor)는 포화토양수분함량과 희석 배수의 단순한 비율이 아니라, 토성과 CEC에 따라서 다르다(정 등, 2001). 표 7-7은 EC_e와 EC_{1:5}간의 희석 배수에 따른 희석 계수(DF)이다. 최근, 안 등(2002)은 염농도가 낮을 때(EC_e<2dSm⁻¹)에는 DF가 4.5-5.6이지만, 염농도가 높아질수록 DF는 커져, EC>16dSm⁻¹에서는 DF가 9.55-11.58을 보인다고 하였다.

표 7-6 CEC를 고려한 EC_e와 EC_{1:5}의 희석 계수

토성	점토함량 (%)	유기물함량 (%)	CEC (cmol _c /kg)	희석계수 DF
사토(S)	4.08	13.47	5.11	12.29
사양토(SL)	10.26	26.11	7.74	11.03
미사토(SiL)	19.92	49.42	11.80	9.08
양토(L)	18.47	40.49	11.33	9.30
미사질식토(SiCL)	33.41	54.77	13.09	8.46
식양토(CL)	30.52	42.21	15.37	7.36
식토(C)	43.34	51.60	17.70	6.44

(Jung 등, 2001)

탄산 석회나 석고와 같이 수용성이 비교적 낮은 염이 존재할 경우, 희석된 침출액의 염 농도 또는 EC를 환산할 때 유의하여야 한다. 탄산석회나 석고가 주염인 경우에 토양과 물의 혼합 비율 또는 희석 배수에 상관 없이 비슷한 값을 보일 수 있다. 토양에서 고형 성분은 표면에 음전하를 띄고 있다. 음전하의 크기는 토양의 점토와 유기물 함량, 그리고 점토 광물의 종류에 의존된다. 음전하 자리는 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, H²⁺ 등 양이온에 의하여 채

위져 있다. 이들 양이온은 흡착되어 있거나, 서로 대치될 수 있는 상태 또는 교환될 수 있는 상태로 있다. 예를 들어, 칼슘(Ca^{2+}) 염을 함유하는 용액이 토양을 통과할 때, 흡착된 Ca 이온의 증가는 토양에 들어 있던 다른 이온은 감소되었음을 의미한다. 나트륨(Na^+) 염을 함유하는 용액이 가해졌을 때도 마찬가지로 Na 이온이 교환되어 흡착된 Na 이온이 증가된다. 일반 토양에서 칼슘에 의해 흡착된 부분이 더 많다. 그러나, 염해지에서는 Na 이온이 차지하는 부분이 더 많다.

흡착된 양이온의 조성은 토양 용액의 여러 가지 양이온의 농도와 관련된다. Na^+ , Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 만으로 구성된 단순한 계에서, 다음 Gapon 식에 적용된다.

$$(7-11)$$

여기서 $\frac{F}{V}$ 및 $\frac{F}{V}$ 는 흡착된 양이온 나트륨, 칼슘, 그리고 마그네슘의 양(cmol kg^{-1})이며, $\frac{F}{V}$ 은 토양 용액 중 이들의 농도(cmol L^{-1})이다. K_G 는 교환 상수($(\text{cmol L})^{-0.5}$)이며, 점토 광물과 토양 수에 존재하는 양이온의 조성에 따른다.

식 7-11의 마지막 항을 나트륨 흡착 계수(sodium adsorption ratio, SAR)라 한다.

$$(7-12)$$

흡착된 나트륨은 흔히 양이온 교환 용량에 대한 퍼센트로 표시하는 데, 이를 교환성 나트륨 퍼센트(exchangeable sodium percent, ESP)라 한다.

염해지에서 $\frac{F}{V}$ 는 양이온 교환 용량(CEC)과 같다.

그러므로 식 7-12는 다음과 같이 쓸 수 있다.

또는

$$(7-13)$$

염류토양의 ESP와 SAR간에는 $\text{SAR} > 0.85$ 에 대해

$$(7-14)$$

의 관계에 있다.

ESP 결정에 흡착된 나트륨 함량과 CEC를 측정해야 한다. 이는 매우 번거롭기 때문에 SAR로부터 추정된다. 포화 침출에 대한 Na, Ca 및 Mg에 대한 분석은 함께 이루어질 수 있으므로, 이로부터 SAR이 계산되고, 이로부터 ESP가 식 7-14에 의해 추정될 수 있다.

4. 토양 물리성에 대한 나트륨의 영향

앞 절에서 언급한 바와 같이 고품 성분의 음하전 자리는 주변 용액의 양이온과 평형을 이루고 있다. 음하전과 양하전의 공간적 분포는 “전기 이중층”이라고 불리는 판으로 설명된다. 양이온(또는 상대 이온)은 액상에서 다음 두 가지 서로 반대되는 힘에 놓이게 된다. 즉, ① 전기장에서 고체의 표면으로 끌린다. ② 확산에 의해 용액 내에서 균등하게 분포하려 한다.

이에 따른 결과로 양이온은 확산 이중층(Diffuse double Layer, DDL)으로 알려진 확산 집적 영역에서 분포한다. 확산 이중층에서 양이온은 음하전 표면에 끌려와 집적되며, 이에 반해 음이온은 배척된다. 고품 성분에서 어느 정도 떨어진 거리 밖에서 양이온과 음이온은 서로 평형을 이룬다.

확산이중층의 범위를 결정하는 요인은 상대 이온의 이온가와 평형 용액의 농도이다. 2가 이온(Ca^{2+})은 1가 이온(Na^+)보다 음하전 고품성분의 표면에 보다 가까이 끌린다. 그러므로, 토양 수계에서 Ca/Na 비를 높이면, 확산이중층이 얇아지며, 이 비율이 낮아지면 확산이중층의 두께가 두꺼워진다. 마찬가지로, 평형 상태의 용액의 염농도가 높아지면(염류화), 확산 이중층의 두께는 얇아지고, 용탈되어 희석되면, 확산이중층의 두께가 두꺼워진다.

확산 이중층의 범위는 토양의 물리적 거동에 매우 큰 영향을 준다. 확산 이중층 내의 어느 점에서 양이온과 음이온의 하전이 상대 이온과 등전을 이루지 못한다. 그러므로, 그러므로, 두 점토 입자가 확산 이중층의 두배 거리 이내로 접근하게 되면, 이들은 반발하여 분리되려 한다. 점토 입자들은 거리가 가까워지면 인력이 커져 서로를 이끈다. pH 7 이하에서, 점토 광물의 변두리의 일부는 양으로 하전된 곳이 있게 된다. 이중층의 두께가 얇으면, 양하전된 점토의 변두리는 다른 점토 표면의 음하전 표면으로 끌린다. 이들이 아주 가까이 접근하게 되면, 점토판들이 엉기게 된다. 이를 응집이라한다. 유기물과 석고의 존재는 응집의 안정성을 높인다.

토양 수분이 충분한 포장 용수량 상태에서는 확산 이중층의 두께가 최대로 확장된다. 건조한 상태에서, 토양수분의 양은 이중층에 저장되는 범위 이하로 떨어지게 될 수 있다. 그러면, 확산 이중층은 떨어져 나가게 된다. 다시 습윤한 조건이 되면, 확산 이중층은 다시 팽윤된다. 교환성 칼슘이 많은 토양의 경우, 확산 이중층의 팽윤 두께는 교환성 나트륨이 많은 토양보다 얇다. 팽윤은 입단 내부 공극을 매우게 되어 수리전도도가 낮아지게 된다. 더욱이 팽윤에 의해 생기는 팽창 압력은 점토 입자를 서로 떨어지게 한다. 이 힘에 의하여 토양 입자는 분산되며, 토양 입단은 붕괴된다. 분산된 세립들은 물을 따라 이동하면서 공극을 메워, 투수성과 통기성을 악화시킨다. 관개수와 강수에 의해 공급된 물은 토양 표면에 오랜 동안 머물러 있게 되고, 건조하면, 분산되어 현탁된 점토 입자는 토양 표면에서 말라 얇은 피각으로 떨어져 나온다.

염류 토양은 교환성 나트륨의 함량이 높아도 토양의 구조가 좋은 상태를 보일 때가 있

다. 용탈에 따라서, 염농도가 낮아지고, ESP가 높으면, 확산이중층은 확대되고, 토양 구조는 파괴된다. 이 경우 교환성 나트륨을 칼슘으로 치환하여야 한다.

교환성 나트륨의 토양 구조에 대한 악영향은 잘 알려져 있다. 아직 확실하지 않은 것은 교환성 나트륨 퍼센트가 얼마일 때 악영향을 주는가 하는 점이다. ESP 10-15가 한계 수준으로 알려져 있다. 사토에서 ESP 25에서도 토양 구조에 아무런 영향을 주지 않는다. 반대로 식토에서는 ESP 5에서 토양 구조에 영향을 받으며, 특히 스펙타이트, 몽모리로나이트 등 2:1형 토양 광물의 경우 더 큰 영향을 받는다. 네델란드에서 1945년과 1953년 해수의 침입에 의한 영향을 조사한 경험에 따르면, 식토에서 교환성 나트륨이 1-1.5 cmol/kg이 ESP 4-8에 해당하였다(Hoone과 Alphen, 1993)

교환성 나트륨의 수준이 높을 때, 염류도가 낮으면, 토양 구조가 쉽게 깨지게 된다. 그러나, 교환성 나트륨이 많은 토양에서 토양 구조를 깨뜨리는 궁극적인 원인은 기계적 타격이다. 이 기계적 타격은 토양을 질척거리게 하여 분산시키는 비와 관개수의 힘에 의한 것이다. 건조하게 되면 단단한 피각이 형성된다. 이는 작물의 발아와 생육을 저해한다. 쟁기와 서래질 등 토양 경운 작업은 표토의 압밀을 가져와 투수성을 악화시킬 수 있다. ESP가 높은 심토는 토양 구조 파괴로부터 덜 위협받는다. 토양의 깊이가 깊어지면, 건조의 반복에 의한 영향이 표토보다는 적고, 경운에 의한 영향도 덜 받는다.

5. 토양의 염류도와 나트륨 염성의 분류

토양의 염류도를 기준으로 염류 토양은 다음과 같은 기준에서 정의된다. 즉, 수용성 염류의 농도가 작물의 생육에 악영향을 줄 수 있는 수준이며, 교환성 나트륨 퍼센트가 토양 구조에 영향을 줄 수 있는 수준일 때 염류 토양이라 한다.

염류 토양을 분류하는 기준은 분류 체계에 따라서 다르다.

가. 미국 염류토 연구소법

미국 염류토 연구소(US Salinity Laboratory)에서 제시한 방법(Richards, 1954)이 가장 널리 이용되고 있다. 염류 토양의 개간을 목적으로 개발된 분류 체계로서, ECe로 대표되는 토양의 염류도와 교환성 나트륨 퍼센트를 기준으로 삼는다. 분류의 단순함으로 인해, 자연에서 발생하는 수 많은 변이를 모두 고려할 수는 없으며, 따라서 절대적인 것으로 적용해서는 안된다.

이 방법에서 염류 토양은 다음과 같이 분류된다.

① 염류 토양 : $EC_e > 4dS/m$, $ESP < 15$

토양의 pH는 일반적으로 8.5 이하이다. 주 음이온은 Cl^- 과 SO_4^{2-} 이다. HCO_3^- 는 적은 양이 존재한다. NO_3^- 는 매우 적다. Na^+ 은 일반적으로 수용성 양이온의 50% 이하이다. 탄

산칼슘과 석고가 토양에 존재하는 경우도 있다.

② 나트륨 염성 염류 토양 : $E_{Ce} > 4 \text{ dS/m}$, $ESP > 15$

토양의 pH가 8.5를 넘는 경우는 매우 드물다. 중성에 가까운 경우가 많다. 토양 용액 중 Na^+ 는 중성염인 NaCl 또는 Na_2SO_4 상태로 존재한다. pH가 8.5 이상이면, 토양 용액에 HCO_3^- 또는 CO_3^{2-} 가 존재함을 의미한다. 이러한 토양은 개량하는 데 많은 문제가 있다.

③ 나트륨 염성 토양 : $E_{Ce} < 4 \text{ dS/m}$, $ESP > 15$

pH는 보통 8.5 이상이며, 10 이상이 경우도 있다. 토양 용액 중 Na가 주 양이온이다. 토양에 탄산칼슘이 함유되어 있는 경우가 많지만, 용해도가 낮아 pH를 낮추지 않는 한, 토양 중 교환성 Na를 치환하는 데 유용하지 않다. 나트륨 염성 토양의 구조는 불량한 것이 보통이다. pH는 7 이하인 비염류성 나트륨 염성 토양의 표토에는 탄산칼슘이 없는 경우가 많다. 따라서 토양의 교환성 수소가 차지하는 비율이 높다.

표 7-7. 염류토양의 분류 기준

토양	pH	E_{Ce} (dS/m)	ESP (%)	SAR
일반 토양	6.5~7.2	<4	<15	<13
염류 토양 (Saline soil)	8.5<	>4	<15	<13
염류-나트륨 염성 토양 (saline and sodic soil)	<8.5	> 4	>15	>13
나트륨 염성 토양 (sodic soil)	>8.5	<4	>15	>13

류(2000)

나. USSR 염류 토양 분류 체계

USSR 분류 체계에서는 염류토를 토양 생성학 원리, 염의 지구화학적 특성, 식물 생리학적 특성 등을 조합하여 다음과 같이 구분한다(Kovda/FAO 1988).

- 솔론차 토양: 염류토. 표토 0.3m의 수용성 염이 2% 이상인 토양이다. 자연 식생은 다즙성 염생 식물이 위주이며, 식생이 없는 나지인 경우도 많다. 일반 농작물의 생산성은 없다. 염의 형태에 따라서 여러 가지 토양으로 나뉜다. Na_2SO_4 를 함유하는 솔론차는 푸석 솔론차, 흡습성 MgCl_2 또는 CaCl_2 를 많이 함유하는 토양은 습윤 솔론차(사바크 토양), 그리고, 나트륨 솔론차, 염소 솔론차 등이 있다.

하위 분류는 지하 수위 깊이를 기준으로 삼는다. 지하 수위가 얕으면 활성 솔론차, 지하 수위가 깊으면 잔류 솔론차이라 한다.

-의사 솔론차 토양 : 근권 깊이 1.0-1.5m의 염 함량이 0.5에서 1.5%(E_{Ce} 10-45에 해당)

인 토양이다. 일반적으로 농작물의 생산성이 낮다.

하위 분류는 존재하는 염의 형태와 지하수위 깊이를 기준으로 삼는다. 예를 들어, 염류성 목초지 토양은 지하수위가 얇고, 잔류 의사 솔론착 토양은 지하수위가 깊다.

- 솔로네츠 토양: 교환성 나트륨의 함량이 높은 토양이다. 토양 생성에 대한 교환성 나트륨의 영향으로 점토가 집적되고 주상 구조를 갖는 B층이 발달되어 있다.

하위 분류는 지하수위와 단면의 발달 상태 그리고 염의 존재를 기준으로 삼는다.

다. FAO-Unesco 분류법

FAO-Unesco 세계 토양도의 범례에 염류 토양은 토양 분류의 상위 체계의 하나로 자리 잡고 있다. 솔론착과 솔로네츠로 분류한다.

솔론착 : 염류도가 높은 토양이다. 1년 중 일정 시기에 조립질 토양에서는 깊이 1.25m까지, 세립질 토양에서는 깊이 0.75m까지 토양의 ECe가 15 dS/m 이상을 보이는 토양이다. 표토 0.3m의 ECe가 4dS/m 이상이고, pH가 8.5 이상인 토양도 솔론착으로 분류된다.

솔로네츠 : 나트릭 B층이 있는 토양이다. 이 토양은 원주상 또는 각주상 구조를 갖는 점토 집적이 있는 B층이 발달되어 있다. 교환성 나트륨 퍼센트는 15% 이상이다.

라. Soil Taxonomy 분류법

US Soil Conservation Service의 Soil Taxonomy에서는 염류 토양의 특수 형태가 대토양군 수준인 3차 분류 단계에 도입되어 있다. 염류토양은 Entisol, Inceptisol, Alfisol, Mollisol, Aridisol목에 포함되어 있다. Soil Taxonomy에서 염류토의 형태적 진단 특징은 다음과 같다.

- 나트릭 층의 존재. 교환성 나트륨의 포화도가 15% 이상인 아질릭 층을 가지고 있다.

- 살릭 층이 존재. 두께가 0.15 m 이상인 석고보다 용해도가 높은 염의 집적층을 가지고 있다. 염 농도는 2% 이상이며(ECe>60dS/m), 염농도(%)와 두께(cm)를 곱하여 60 이상인 층이다.

6. 작물의 재배를 중심으로 한 염류도 기준

농업의 관점에서 염류도 분류의 핵심은 원하는 작물의 생육이 가능하며, 목적하는 수확 물질을 얻어낼 수 있는가 하는 것이다. 염류도의 기준은 작물의 종류와 재배 방법에 따라 달라지게 된다. 그러므로, 수 많은 작물에 모든 지역에서 일괄되게 적용할 수 있는 기준을 정하기는 대단히 어렵다. 그림 은 토양의 염도에 따른 상대 수량의 모식도이다. 염류에 약한 오이는 ECe가 2.5dS/m만 되어도 수량 감소가 시작되며, 6 dS/m에서는 50%의 수량이 감소한다.

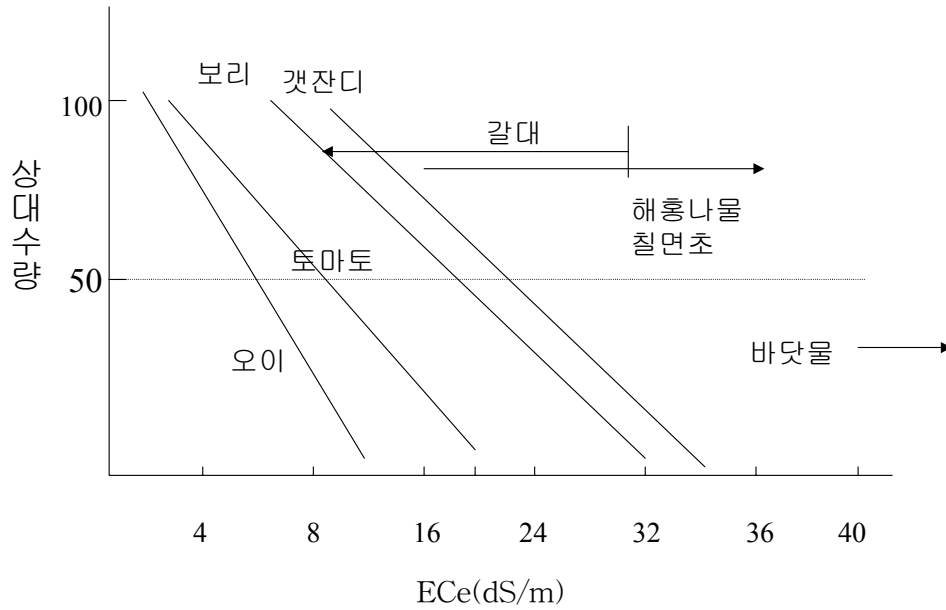


그림 7-6. 토양의 염도에 따른 식생 생육 모식도

표 7-8은 ECe를 기준으로 한 염류도 분류이다. 이 표에서 염류도와 그림 7-8의 토양의 토성이 중립질 또는 세립질 토양을 기준으로 한 것이다. 이들 토양에서 포장 용수량의 토양수분 함량은 포화 토양 수분의 반 정도이므로, 포화침출액 전기전도도(ECe)는 포장용수량 상태에서의 EC의 1/2, 즉 $ECe=0.5EC_f$ 로 가정된 것이다. 사토와 양질사토에서는 ECe는 약 $0.25EC_f$ 에 해당한다. 그러므로, 사토에 대해서는 이 표의 ECe의 반으로 해석해야 하며, 그렇지 않으면 염류도가 낮게 평가된다.

표 7-8. 작물 재배를 중심으로 한 토양의 염류도와 ECe

토양의 염류도	ECe	작물
비염류성	<2.0	대부분 작물 재배 가능
약염류성	2.0~4.0	내염성 약한 작물 수량 감소 과수 작물 재배 제한
중염류성	4.0~8.0	많은 작물 수량 감소 채소 작물 재배 제한
강염류성	8.0~16.0	내염성 작물 수량 유지 곡류 작물 재배 제한
극염류성	>16.0	대부분 작물 생육 한계 내염성 매우 강한 작물에 한함 내염성 작물 재배 제한

작물 생육에 대한 염류도의 영향은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

① 삼투압 효과 : 용액의 염류도가 높아질수록 삼투압도 커지며, 작물에 대한 물의 이용성이 감소된다. 예를 들어, 토양의 ECe가 4 dSm⁻¹인 경우, 토양 용액의 삼투압 포텐셜은 -160 kPa (식 7-5)이다. 토양 수분이 포장용수량 상태에 있다면, 토양 용액의 삼투압은 이의 두배인 -320kPa이 된다(식 7-10). 토양 수분 포텐셜 -320 kPa은 토양 수분이 부족한 상태로 배추 등과 같은 채소 작물은 정상적인 생육이 어렵다.

② 특정 이온 효과 : 특정 이온의 농도가 높으면, 이온 흡수에 불균형이 일어나며, 다른 이온의 흡수를 저해하여 수량을 감소시킨다. 어떤 이온은 독성을 나타내며, 작물에 농축되었을 때 장해현상을 보인다. 나트륨과 염소의 과다 흡수에 따라 과수의 잎이 황변하거나 말라죽는다.

작물의 내염성은 다음과 같이 평가된다.

① 정상적인 상태 또는 비염류 토양에서 재배된 작물의 수량에 대한 상대 수량. 이는 작물간의 비교를 하기 좋으며, 농업적 활용도가 높다.

② 염류 토양에서의 절대 수량. 염류 토양 조건에서 경제성을 평가하는 데에는 절대 수량의 평가가 필요하다.

작물의 내염성에 관한 문헌이 많다. 일반적으로, 내염성은 기후, 품종, 작물 재배 방법 등에 따라서 다르다. 내염성에 대한 기후의 영향으로, 저온일 때 재배되는 작물은 고온이며, 습도가 낮은 시기에 재배되는 작물보다 내염성이 크다.

작물의 수량과 염류도의 관계는 수량 감소 평가에 중요한 부분인 상대 수량 0.95에서 0.25범위를 직선으로 표현하는 것이 보통이다. 그림 7-6은 여러 가지 작물의 염류도에 대

한 수량 반응 모식도이다. 여기서 ECe는 토양의 깊이 0-0.80m의 평균 염류도이다(Unesco, 1970). 많은 작물에 있어서, ECe 2dS/m까지는 영향이 없지만, 4dS/m에서 20-25%의 수량이 감소된다.

표 7-9 작물의 내염성과 염도 한계

내염성	작물의 종류	염도 한계 (dSm ⁻¹)
작물		
매우 약함	완두콩, 양파, 강남콩	4-6
약함	오이, 배추	6-11
보통	토마토, 브로콜리, 호박, 시금치	8-16
강	보리, 밀, 아스파라거스	13-20
목초		
약함	클로버	5-10
보통	톨페스큐, 오차드그라스	12-23
강	위트그라스, 하이브리드	16-28

7. 교환성 나트륨율과 토양의 물리성

교환성 나트륨은 작물의 영양과 토양 구조의 불량 두 가지 측면에서 작물에 영향을 준다. 나트륨 염성 토양의 토양 용액에서는 칼슘보다 나트륨의 함량이 많다. 이러한 토양에서 양이온 흡수의 불균형이라는 영양학적 문제에 봉착하게 된다. 나트륨 염성 토양에서 재배된 작물은 정상적인 토양에서 재배된 작물에 비해 나트륨 함량이 칼슘 함량보다 높다. 감귤과 핵과류와 같은 과수는 염에 매우 민감하다. ESP가 5-10인 토양에서 나트륨이 이들 수목의 체내에 집적된다. 이 수준은 토양학적으로는 나트륨 염성 토양이 아니다. 대부분의 작물은 교환성 나트륨에 대해 과수 보다 강하다.

토양 구조에 영향을 주기 시작하는 ESP가 얼마인지 정확하게 말할 수 없다. 일반적으로 ESP 10에서, 토양의 구조 불량 문제가 발생한다. 토양 구조가 파괴되면, 작물의 생육은 통기성 악화에 의한 영향을 받게되며 물빠짐이 나빠진다. 이에 따라, 뿌리의 생육에 장애를 받게 된다. 관개수와 비에 의한 건습의 반복으로, 토양은 압밀되어 단단해지며, 토양 표면에서 분산된 세립이 피각을 형성하며, 일부는 휘어진 판조각처럼 떨어져 나온다. 단단한 피각은 작물의 발아와 출아를 저해한다. 일부 팽창성이 큰 점토를 갖는 세립질 토양에서는 ESP 5에서도 문제가 발생하며, 조립질 토양에서는 ESP 25에서 분산성 문제가 커진다.

제 4절 관개수의 염류도와 수질

1. 농업 용수의 수질

표 7-10은 농업기반공사(2000)에서 조사된 농업용수수질 측정망 조사 보고서의 수질 자료를 경기, 충남, 전남, 전북을 대상으로 간척지에서 사용되는 농업 용수와 일반 농경지의 농업 용수로 구분하여 수질의 차이를 비교한 것이다. 이 표에 의하면, pH를 비롯한 대부분의 수질 지표가 일반 농경지에 비해 높으며, 특히 EC와 Na 등 양이온의 함량에서 커다란 차이를 보인다. 일반 농경지 농업용수의 EC는 평균이 131 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이며, 27~407 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위에 있다. 이에 비해 간척지 농업용수의 EC는 평균 1,337 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이며, 최고 11,946 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 보인다. 일반 농경지 농업용수의 Na 함량은 0.40 mmol/L로 낮지만, 간척지 농업용수의 Na함량은 7.77mmol/L로 높다. 이에 따라서 SAR비도 높다.

표 7-10. 간척지와 일반 농경지 농업 용수의 수질

수질 지표	간척지 농업용수		일반 농경지 농업용수	
	평균	범위	평균	범위
pH	8.2	6.5~9.5	8.0	6.0~10.1
EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,337	58~11,946	131	27~407
BOD(mg/L)	4.6	0.3~43.0	4.0	0.3~16.7
COD(mg/L)	9.8	3.8~35.2	6.6	1.4~19.2
TN(mg/L)	2.9	0.27~17.10	1.9	0.5~9.3
TP(mg/L)	0.14	0.01~1.47	0.08	0.01~1.20
SS(mg/L)	17.2	1.90~17.12	11.4	0.12~11.38
K(mmol/L)	0.41	0.02~2.38	0.11	0.01~0.66
Na(mmol/L)	7.77	0.10~75.86	0.40	0.05~2.22
Ca(mmol/L)	1.21	0.18~4.13	0.57	0.11~2.03
Mg(mmol/L)	2.11	0.10~19.68	0.24	0.05~1.50
SAR	4.69	0.17~22.0	0.62	0.17~1.67

* 농업기반공사(2000) 자료 재정리

관개수의 SAR 값과 EC의 관계를 그림 7-7에서 보면, log-log 함수 상에서 고도의 유의성이 있는 직선 상관을 보인다. 이에 따르면, EC가 1,000 μ S/cm이면 SAR 값은 4.2이고, EC가 4,270 μ S/cm일 때 SAR 값은 13이 된다.

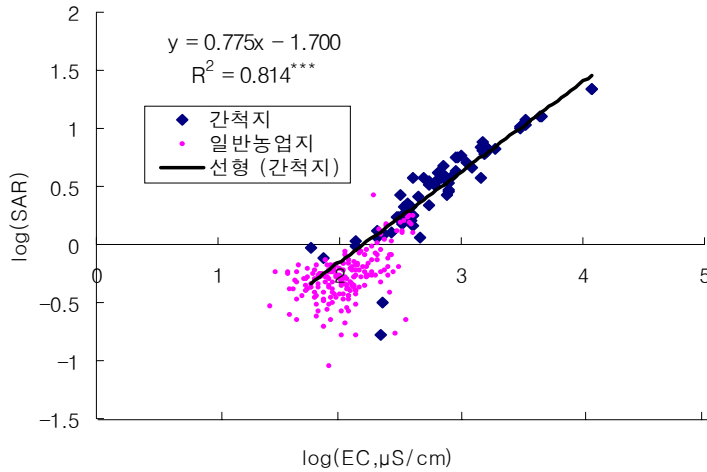


그림 7-7. 간척지와 일반 농업지 농업 용수 중 EC와 SAR의 관계

2. 수질의 평가

가. 수질 문제

간척지에서 영농을 위한 수질 문제의 핵심은 염해에 있다. 특히 간척지에서의 관개 농업은 사용할 수 있는 질을 갖춘 적절한 양의 관개수 공급에 성패가 달려 있다. 이제까지 농업용 수질 문제는 아직 심각하게 다루어져 오지 않았는데, 그 이유는 양질의 물을 충분히 쉽게 확보할 수 있었기 때문이다. 그러나, 양질의 관개수는 이미 집약적으로 이용되고 있기 때문에 새로운 관개 사업 계획 지구나 기존 관개 사업 지역 모두 새로운 또는 보조 수자원을 찾게 되는 데, 이들은 기존의 수자원의 수질 조건보다 나쁜 조건에 있을 가능성이 높다. 수질이 낮은 관개수를 사용하였을 때 발생하는 문제를 피하기 위하여 가용할 수 있는 수자원의 질을 확보할 수 있는 합당한 방안이 모색되어야 한다.

개념적으로, 수질은 특정한 목적을 위한 적합성에 영향을 줄 수 있는 물 공급 특성, 즉, 사용자의 요구에 질이 어떻게 부합되는 가라 할 수 있다. 질은 어떤 물리적, 화학적, 생물

학적 특성으로 정의된다. 맛과 같은 어떤 사람의 기호도 수용될 수 있는 간단한 평가 방법이다. 예를 들어, 질이 좋은 두 가지의 음용수가 있을 때, 사람은 한 공급자의 물을 다른 공급자의 물보다 선호할 수 있다. 좋은 맛을 가진 물이 소비자에게 선호된다. 관개수를 평가함에 있어서, 물의 화학적 물리적 특성을 강조하며, 다른 요인의 비중은 적다.

나. 수질 기준

관개를 위해 사용된 물은 녹아 있는 염의 형태와 양에 의하여 크게 결정된다. 관개수에 염은 비교적 적게 녹아 있지만, 유의할 필요가 있는 양이 존재한다. 이들의 암석과 토양의 풍화와 용해에서 오며, 석회, 석고에서 오며, 그 밖의 녹기 어려운 토양 광물에서도 온다. 이들 염은 물을 사용하는 곳으로 이동된다. 관개의 경우, 물과 함께 염이 공급되며, 물이 작물에 의해 흡수되거나 증발되면, 염은 남게 된다.

관개를 위한 물의 적합성은 존재하는 염의 양 뿐 아니라, 염의 종류에 의해서도 결정된다. 총 염류의 양이 증가되면서 여러 가지 토양과 작물에 문제를 일으키며, 작물의 수량을 유지하기 위하여 여러 가지 대책이 요구된다. 수질이나 적합성은 오랜 기간동안 사용하였을 때 발생할 것으로 예상되는 문제의 심각성에 따라서 결정된다.

문제의 결과는 종류와 심도 양쪽에서 다양하며, 물을 사용하는 기술과 지식과 함께 토양, 기후, 작물의 종류에 따라서 달라진다. 결과적으로, 수질 기준 대상에 제한이 없으며, 물의 조성분의 집적과 수량에 영향을 주는 조건에 의하여 물의 적합성이 결정된다. 토양 염류도, 침투속도, 독성, 그리고 관련된 여러 가지 토양 문제가 수질 결정에 중요한 요소로 작용하게 된다.

관개를 위한 수질 평가의 지침은 표 7-11에 있다. 이는 작물 생산, 토양 조건과 관리에 대한 수질의 장기적 영향의 평가를 강조하고 있다.

이 지침은 지표수, 지하수, 배수수, 배출폐수 등에 공통적으로 적용할 수 있는 수질 조성 평가를 위한 것이며, 관개 농업에 실용적 적용이 가능한 것이다. 이 지침의 기준 중에는 표 에 명기된 것과 같은 작물과 토양에 대한 영향에 근거한 것이다. 이 영향은 명확히 이해될 수 있어야 하지만, 어떤 고착된 전제가 되어서는 안된다. 실제 사정이 이 영향과 크게 다르다면, 이에 따른 지침의 수정이 가능하다.

표 7-11 영농을 위한 관개수 수질 지침

관개 문제의 가능성	단위	사용 제한 정도			크 (IV)
		없음 (I)	조금 있음 (II)	있음 (III)	
염류도(작물의 물이용에 영향)					
EC	dSm ⁻¹	<0.7	0.7 - 1.0	1-3	3<
TDS	mgL ⁻¹	<450	450 - 650	650-1,850	1,850<
침투율(토양 구조에 영향)					
SAR = 0 - 3일 때 EC	dSm ⁻¹	> 0.7	0.7 - 0.2		<0.2
= 3 - 6		> 1.2	1.2 - 0.3		<0.3
= 6 - 12		> 1.9	1.9 - 0.5		<0.5
= 12 - 20		> 2.9	2.9 - 1.3		< 1.3
= 20 - 40		> 5.0	5.0 - 2.9		< 2.9
특정 이온 독성 (감수성 작물 영향 기준)					
나트륨(Na)	SAR	<3	3 - 9		>9
	mmolcL ⁻¹	<3	>3		
염소(Cl)	mmolcL ⁻¹	<4	4 - 10		>10
기타 요소 (감수성 작물 영향 기준)					
질산성 질소 (NO ₃ -N)	mgL ⁻¹	< 5	5 - 30		>30
암모늄성질소 (NH ₄ -N)	mgL ⁻¹	<1	1 - 6		>6
pH		6.5-8.4			

사용 제한 없음에 해당하는 관개수를 사용하였을 때, 토양이나 작물에 피해가 없거나 인지할 수 있는 정도의 문제가 발생하지 않는다. 사용 제한 약간 있음 범위의 관개수는 작물의 선택에 주의해야 하며, 만족할 만한 수량을 내기 위해서는 관리 대안을 찾아야 할 필요성이 있다. 반면, 사용 제한 심함에 해당하는 관개수를 사용할 때에는, 작물과 토양에 많은 문제가 나타나며, 작물의 수량이 감소할 우려가 있으며, 작물 재배가 나쁜 수질에 대처하기 위해 설계되었어도, 세심한 관리를 하지 않으면 안된다. 그러므로, 수질이 이 범주에 속하게 되면, 대형 관개 프로젝트를 진행하기 전에, 알맞는 재배 방법을 찾기 위한 시험 농장 운영이 이루어져야 한다.

표 7-11은 영농 관리 기준이다. 이 기준은 농업용 목적으로 제시된 것으로, 사용자는 실험실에서 분석된 자료와 지침에 전적으로 의존하는 것은 바람직하지 않고, 포장 조건을 정확히 검토하고, 현장 중심의 포장 시험을 통해 방법을 찾아야 한다.

사람의 음용수 기준은 농업 용수의 범주에서 벗어나지만, 대형 관개 프로젝트에서 관개수가 음용수로 이용되는 경우가 있으므로, 이 경우 음용수 기준을 참고하여야 한다.

다. 수질의 영향

1) 염류도

근권에 염이 작물의 수량에 영향을 줄 수 있는 농도로 집적되면 염류도 문제가 존재하게 된다. 이들 염은 함염 관개수, 높은 지하수위 또는 관개된 물에서 오는 염 등이다. 수량감소는 작물이 상당 기간 토양으로부터 물을 흡수하지 못할 정도로 염이 토양에 집적하여 일어난다. 물의 흡수가 제한되면, 작물의 생육은 저해된다. 작물에 나타나는 증상은 가뭄과 유사하여, 위조되며, 엽색이 짙어지며 잎이 두꺼워진다. 어떤 경우에는 약한 염해가 포장 전체에서 일어나면, 생육 전체가 지연되거나 작아져 잘 모르고 지나칠 때가 있다.

염 문제를 일으키는 염은 수용성이며, 물에 의해 이동되기 쉽다. 앞선 관개에서 집적된 염의 일부는 작물 재배 기간 중 관개수의 투수에 의하여 용탈될 수 있다. 용탈은 수질과 염류와 관련된 ns제를 제어하는 데 있어 관련이다. 기간을 통해, 용탈에 의한 제염은 관개에 의해 가해지는 양과 같거나, 이보다 많아야 한다. 용탈 요구량은 관개수의 수질과 재배되는 작물의 내염성에 달려 있다.

근권에서 염의 함량은 근권의 깊이에 따라서 달라진다. 토양 표면에서는 관개수의 염농도에 가까우며, 근권 하단부에서는 이의 몇 배에 이른다. 염 농도가 깊이가 깊어질수록 높아진다. 왜냐하면, 남겨진 염은 다음 관개에 의하여 밑으로 밀려 내려가 근권 밖으로 용탈되기 전까지 계속 집적되기 때문이다. 근권 하부의 염농도는 용탈 여부에 의해 결정된다.

관개 후에, 가장 쉽게 이용되는 물은 근권의 상부에 있는 토양 수분이다. 작물이 물을 이용하여, 상부의 물이 소진되면, 다음으로 쉽게 이용될 수 있는 물이 있는 곳은 심토로 옮겨 간다. 심토의 염류도는 더 심한 경향이다. 작물의 물이용은 근권의 극단적으로 염류도가 낮은 부위나 높은 부위에 반응하는 것이 아니라, 전체적인 유용성에 따른다. 이 유용성은 총물포텐셜에 의존한다. 그러므로, 관개 시기는 토양 수분 유용성을 유지하고, 심토의 염류도에 의해 수분의 유용성의 감소에 의해 발생하는 문제를 줄이는 것이 중요하다. 양호한 작물 생산을 위해서, 토양 수분 이용성을 높히는 것과 똑같이 근권에 집적된 염을 용탈시킬 수 있는 물관리도 중요하다.

자주 관개되지 않는 작물을 위해, 작물 수량은 근권의 평균 염류도와 가장 상관이 크지만, 매일 관개되는 작물의 수량은 근권의 물 흡수 가중 염류도와 가장 상관이 깊다 (Rhodes, 1982). 차이는 크지 않지만, 염류도가 높을 때 중요해진다. 이 책에서 평균 근권 염류도에 대한 작물의 응수에 근거한다.

관개 농업에서, 많은 염류도 문제가 지표 2m 이내의 높은 지하수위와 관련이 있다. 지하수에 집적된 염류는 근권으로 상승하는 염의 근원이 된다. 그러므로, 관개 농업의 장기적인 관점에서 염류를 제어하기 위해서는 지하수위를 제어해야 한다. 고농도 함염 관개수를

사용하기 위해서는 많은 물이 용탈되어야 하는 데, 용탈을 위해 배수되는 물은 지하수위 상승의 부하로 작용한다. 배수가 적절하다면, 염류도 관리를 위해 작물에 알맞는 물을 항상 공급할 수 있어야 하고, 용탈에 의해 작물의 내염성 수준으로 토양 수분이 유지될 수 있도록 해야한다.

2) 물의 침투율

수질과 관련된 물의 침투 문제는 공급된 물 또는 강수의 침투율이 감소되거나 물이 지면에 너무 오래동안 머물로 있거나, 침투되는 속도가 너무 느려 작물의 생육에 필요한 물을 제때에 공급할 수 없는 상태에서 일어난다. 물의 침투율이 수질과 관련이 있지만, 토양 구조, 압밀도, 유기물 함량 등 토양 요인과 밀접한 관계가 있으며, 화학적 개량에도 영향을 받는다.

정상적인 침투율에 영향을 주는 두 가지 가장 공통적인 수질 요인은 염류도와 칼슘 및 마그네슘 함량과 관련된 나트륨의 비율이다. 고염류 관개수는 침투율을 증가시킨다. 저염류 관개수 또는 나트륨 비율이 높은 관개수는 침투율을 감소시킨다. 두 요인 모두 동시에 작용한다. 부차적인 문제는 적절한 침투가 달성되기 위해 관개가 장기간 유지되면 생기기 된다. 이는 미세지형이 낮은 지점의 묘상의 피각 형성, 과도한 잡초 발생, 양분의 불균일 등을 포함한다. 침투율 문제의 한 가지 심각한 부차 효과는 병과 모기와 같은 매개충 서식처의 가능성이다.

수질과 관련된 침투율 문제는 대부분의 경우 토양의 표면 수 cm에서 일어나며, 표토의 구조 안정성과 연결되어 있으며, 나트륨에 대한 낮은 칼슘의 비율과도 관련이 있다. 고 Na 관개수를 토양에 관수하면, 토양의 구조가 약해진다. 토양 표면의 입단이 파괴되어 분산되고, 분산된 입자는 투수되는 물을 따라 내려가면서 공극을 메꾼다. 입단의 분산 문제는 토양 중 낮은 칼슘 함량에도 있다. 저 함염 관개수의 경우, 물은 칼슘을 포함한 대부분 수용성 무기물을 용해한다.

관개된 물이 토양 내부로 잘 침투해 들어가지 않고, 지면에 오랜 동안 남아 있어 작물 재배에 어려움을 줄 정도로 느리면, 침투율에 문제가 있는 것으로 판단하여, 이를 해결해야 한다. 침투율이 느려지면, 관개수의 수질에 따라 다르지만, 표층 수 cm에서 문제되지만, 대로는 심토에 까지 영향을 준다. 결국, 작물에 대한 물 공급이 원활하지 못하여, 작물의 생육이 영향을 받게 된다. 이 경우에 염류 농도가 높아 생기는 염류해와는 해의 원인이 다르다. 침투는 토양으로 물이 들어가는 것을 말한다. 물이 토양으로 들어 가는 속도를 침투율이라 한다. 투과 계수는 침투된 물이 토양을 통과하는 속도이다. 수질 문제가 물이 토양을 들어가 표토 수cm를 통과하는 동안에 일어나는 문제와 밀접하게 관련되므로, 투과계수 문제보다 침투율의 문제를 다루는 것이 보다 적합하다. 침투율이 $3 \text{ mm/hr} (=0.83 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1} =0.72 \times 10^{-2} \text{ m day}^{-1})$ 이하이면 느리며, $12 \text{ mm/hr} (=0.33 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1} =0.29 \times 10^{-1} \text{ m day}^{-1})$ 이상이면 비교적 빠른 것으로 본다. 이는 수질 문제 이외의 토성과 같은 토

양의 물리적 특성, 점토의 종류, 교환성 양이온을 포함한 토양의 화학적 특성 등 여러 요인에 의하여 영향을 받는다. 침투율 문제에 관련한 표 7-11의 지침은 관개수의 수질에 의해 발생된 토양 화학성의 악화에 직접 연관된 것이다. 이들 문제는 관개수의 염류도와 나트륨의 조성비에 의한 것이다. 그림 7-9는 관개수의 염류도(E_c)와 나트륨 흡수율(SAR)의 침투율에 대한 영향을 동시에 보여 주고 있다.

염류도가 높아지면, 토양의 침투율은 높아지며, 염류도가 낮아지거나 칼슘과 마그네슘에 대한 나트륨의 비율이 높아지면 침투율은 낮아진다. 그러므로, 침투율 문제를 다룰 때에는 염류도와 SAR을 동시에 다루어야 한다.

염류도가 0.5 dSm^{-1} 이하로 낮은 관개수, 특히 0.2 dSm^{-1} 이하인 관개수는 부식성이 있으며, 특히 칼슘 등 수용성 무기물과 염을 용탈하며, 이에 따라서 토양 입단과 토양 구조에 영향을 준다. 염류가 적고, 칼슘이 없으면, 토양은 분산되며, 분산된 입자는 작은 공극을 메워 토양 표면에 피막을 형성하여 투수를 방해한다. 토양 피각의 형성과 작물 출아 문제가 자주 발생하게 되며, 이에 따라서 주어진 시간에 토양으로 침투하는 물이 적어져, 관개 효율이 떨어지게 된다.

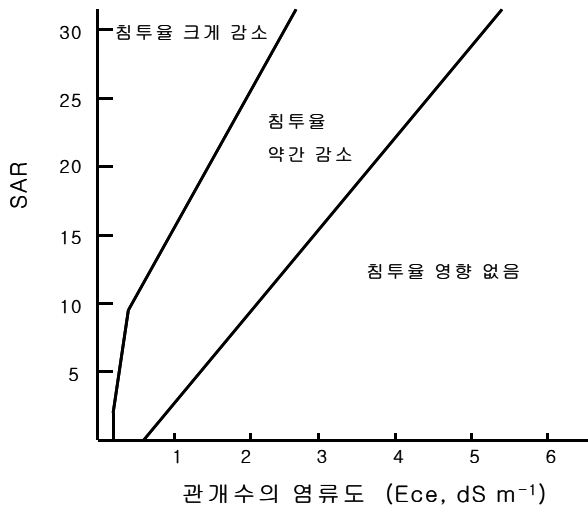


그림 7-9. 관개수의 염류도와 SAR에 따른 토양 침투율 영향

염류도가 매우 낮은($E_c < 0.2$) 관개수는 SAR비에 상관 없이 침투율 문제가 발생한다. 강수는 염류도가 대단히 낮으며, 관개 지역에서 강수의 침투가 매우 느린 것은 흔히 볼 수 있는 현상이며, 유거율이 높아진다.

관개수 중 과잉의 나트륨은 토양의 분산과 구조의 파괴를 촉진하는 데, 나트륨과 칼슘비가 3:1을 넘을 때 일어나게 된다. 나트륨 함량의 비율이 높을 때(>3:1) 토양의 분산과 작은

공극의 막힘 현상으로 인해 염류도가 매우 낮은 관개수의 사용에서 일어나는 것과 같은 심각한 침투율 문제를 일으킨다. 이는 나트륨의 분산 효과를 상쇄할 수 있는 칼슘의 부족에서 온다. 과잉의 나트륨에 의한 낮은 침투율은 작물에 충분한 물을 원활하게 공급할 수 없게 한다. 침투율 불량과 관련한 다른 문제는 토양 피각 형성, 작물의 출아 방해, 통기 부족, 작물과 뿌리의 병해 발생 조장, 잡초와 모기 등 해충의 제어 문제 등이 있어 작물 관리를 어렵게 한다.

SAR은 칼슘 및 마그네슘과 관련된 과잉 나트륨으로 인해 발생하는 침투율 문제를 둘러싸고 있는 문제를 이해하는 데 도움이 된다. 이는 관개 동안 또는 그 후, 침전이나 용해로부터 오는 칼슘의 용해도 변화 때문에 일어나는 토양수 중 칼슘의 변화는 고려하고 있지 않다. 나트륨은, 염류도의 중요한 부분으로써, 수용성으로 남아 있으며, 항상 토양의 교환성 나트륨과 평형을 이루고 있다. 관개와 관개 사이에 작물이 물을 흡수하여 농축되든지, 관수하여 희석되든지 또는 배수되어 용탈되든지, 외부 조건은 나트륨의 용해도와 침전에는 아무런 영향을 주지 않는다. 칼슘은 이와 달리 항상 수용성만으로 존재하거나, 용액으로의 공급이 늘 일정한 것이 아니다. 외부에서 변화가 오면, 평형이 이루어질 때까지 계속하여 용해와 침전 반응이 진행된다. 칼슘의 변화는 토양 무기물에서 토양 용액으로 녹아 들어가 농도를 높이거나, 토양용액에서 탄산 칼슘 등으로 침전하여 토양 무기물로 바뀐다. 용해는 희석되거나 토양수에 녹아 있는 탄산에 의하여 일어난다. 침전은 탄산, 중탄산 또는 황산 이온이 충분한 상태에서 칼슘이 충분히 있어, 탄산칼슘(석회) 또는 황산 칼슘(석고)의 용해도를 초과할 때 침전이 일어난다. 관개 직후에 용해와 침전이 일어나며, 칼슘의 공급 변화와 새로운 평형 농도의 성립은 관개수에 따라 달라진다. SAR식은 이 변화를 고려하지 않기 때문에, 약간의 오류가 있지만, 현재까지 관개수의 나트륨 염성 평가에 SAR이 가장 많이 사용된다.

3) 독성

독성 문제는 토양 또는 물의 어떤 조성이 작물에 의해 흡수되어 체내에 집적되면, 작물은 해를 입거나, 수량이 감소된다. 해의 정도는 흡수량과 작물의 감수성과 관련이 있다. 과수 등 수목과 같은 영년생 작물의 감수성이 가장 크다. 피해증상으로 잎의 끝이 타거나 엽맥 사이에 황화가 일어난다. 더 심해지면, 수량이 감소한다. 내성이 큰 일년생 작물은 낮은 농도에서는 피해가 나타나지 않지만, 한계가 넘으면, 피해가 일어난다.

독성을 나타내는 이온은 염소, 나트륨 그리고 붕소이다. 이들의 독성 문제는 낮은 농도에서도 나타나지만, 토양의 염류도 및 침투율과 관련될 때, 더 복잡해진다. 독성은 이들 이온이 뿌리를 통해 흡수된 체내에 집적되어 일어난다. 이온의 집적은 잎 끝과 잎의 변두리 등물 손실이 큰 곳에서 심하게 일어난다. 독성이 나타나는 농도에 도달하는 데에는 시간이 걸리며, 따라서 육안으로 관찰할 수 있는 증상은 늦다. 해의 정도는 독성에 노출된 시간과 농도, 작물의 감수성, 그리고, 작물의 증산량에 따라 결정된다. 고온 기후 또는 고온

기에 집적이 빠르며, 해도 크게 나타난다. 온도가 낮으면, 피해도 적다.

4) 기타

그 밖의 여러 가지 관개수질 문제가 일어난다. 예를 들어 질소의 문제인데, 관개수 중에 질소가 과다하면, 작물에 질소과다에 의한 과번무 문제가 발생한다. 과번무 작물체는 약하며, 병해충에도 약하다. 스프링클러 관개를 하였을 때 칼슘, 철분 등이 작물의 잎 또는 수확물에 달라 붙어 품질을 떨어뜨리기도 한다. 농작업 기계의 부식에도 수질이 영향을 주며, 관개수 중 철분이나 칼슘이 지나치게 많은 물을 사용하게 되면, 관석이 생겨 막히기도 하며, 관개수로 유지에도 영향을 준다. 투수가 불량하여 물이 장시간 괴어 있으면, 각종 병원균이나 매개 해충의 서식지가 되는 것도 수질의 일부로 작용한다. 부유 유기물은 영양물질로 이들 생물의 서식에 영향을 주며, 관개 시설의 입구나 관에 끼어 막히게 되어 관개 시설 유지와 운영에 영향을 준다.

제 5절 제염과 용탈요구량

염해지에서 염류 제거의 가장 중요한 수단은 용탈이다. 관개수는 자연적으로 존재하는 염의 혼합물이므로, 이 물로 관개되는 토양은 비슷한 조성을 갖게 되지만, 관개되는 물보다 일반적으로 높은 농도를 보인다. 토양에 집적하는 염의 양과 면적은 관개수의 수질, 관개 방법, 배수 적정성 등에 의하여 결정된다. 염이 과도하게 되면, 수량이 감소된다. 수량 감소를 막기 위해, 토양의 염은 수량에 영향을 주는 수준 이하로 유지되어야 한다.

관개에 사용되는 대부분의 물은 심각한 염류에 의한 제한성이 없는 수질이 좋은 물이다. 그러나, 수질이 나쁜 물을 관개하게 될 때 염류도 제어가 어려워진다. 물의 염류도가 높아지면, 염이 집적하여 작물의 수량에 영향을 주지 않도록, 근권 밖으로 염을 용탈시킬 수 있게 세심한 주의를 기울여야 한다. 대안으로, 다음 단계로 고려되어야 할 것은 예상되는 근권의 염류도에 적합한 작물의 내염성이다. 용탈의 빈도는 수질과 작물의 염에 대한 감수성에 있다.

간척지에서의 제염은 간척 조성 초기의 제염과 영농 과정 중의 물과 토양의 염 관리를 위한 제염 두 가지로 나뉘어진다. 이 장에서는 염류도에 대한 관개수의 수질 문제이며, 염류도가 어떻게 토양 수분의 유효도를 감소시키는가에 대한 것을 다루고자 한다. 그리고, 어떻게 용탈시켜야 하고, 작물을 선택해야 염류 제어가 쉬우며, 이를 위한 다른 관리 기술은 어떤 것이 있는지 등을 서술하고자 한다.

1. 초기 제염을 위한 용탈

가. 제염을 위한 일반적 고려 사항

염류 토양의 제염을 위한 개간을 시작하기 전에 고려해야 할 사항이 있다. 즉, 첫째, 토양에 가용성 염이 존재하고 있는지와 교환성 나트륨의 양이 얼마인지를 알아야 한다. 둘째, 토양 염류화의 원인이 무엇인가를 확인하여야 한다. 얕은 지하 수위, 관개수질 불량, 또는 해안 퇴적물의 존재 등의 원인이 확인되어야 한다. 셋째, 토양의 물리성은 어떠한지를 확인하여야 한다. 토성이 조립질, 중립질 또는 세립질인지를 알아야 하며, 점토의 종류는 무엇인지를 알아야 한다. 표토와 심토 그리고, 기반 토양의 수리 전도도를 알아야 한다. 용탈 후 토양 물리성의 변화는 어떠한런지에 대한 예측이 가능해야 한다.

염류 토양에서, 지하 수위가 얕은 경우가 많다. 이러한 경우, 지하수위를 조절하기 위한 배수 체계의 설치에 대한 조치가 우선적으로 이루어져야 한다. 두 번째로 토양으로부터 염류를 용탈시키기 위한 관개수의 사용이 이루어져야 한다. 이를 위하여

- ① 배수 체계가 기술적으로 가능하고, 경제적으로 타당성이 있는가?
- ② 용탈에 가용한 관개수가 있으며, 수질은 어떠한지, 그리고, 지속 가능한 농업이 가능한지에 대한 철저한 분석이 이루어져야 한다.

염류 토양에서 또 하나의 해결해야 할 문제는 교환성 나트륨의 과량 존재와 함께 토양의 물리성과 구조 불량과 관련된 문제이다.

나. 용탈 용수량과 용탈 효율

염류 용탈의 효율은 사용된 물의 단위 부피 당 용탈된 가용성 염의 양으로서 정의될 수 있다. 용탈이 짧은 기간내 또는 높은 증발 조건 하에서 진행된다면 시간의 요인도 고려되어야 한다. 염류 용탈의 효율 결정 요인으로는 토양의 초기 염류도, 용탈에 사용되는 물의 양, 유체역학적 분산, 공간적 변이, 그리고 적용시기와 배수체계의 계획 등이 있다.

용탈은 기본적으로 수직 배수에 의해 이루어진다. 초기 염농도에 의한 염류 용탈 효율은 토양의 수분 함량이 용탈되는 동안 감소함에 따라 증가된다. 토양 공극 크기의 범위도 염류 이동의 효율에 영향을 끼친다.

Hoffman(1980)은 세계 각지로부터 얻은 포장 실험 자료를 기초로 하여 1차원적 용탈하의 염류이동 효율에 대한 경험 방정식을 제시하였다.

$$C/C_0 = K/(D/D_s) \qquad 7-15$$

- 여기서, C = 토양 중 염의 농도
- C₀ = 토양의 초기 염 농도
- D = 용탈수가 공급된 깊이
- D_s = 용탈되어야 할 토양이 깊이
- K = 실험적 계수

실험적 계수 K 는 그림 7-9에서와 같이 담수되어 있는 물의 용탈하에서는 사양토는 0.1, 식토는 0.3 범위의 값을 갖는다. 이들은 미사질 사양토, 식양토에서도 역시 0.3의 계수가 적용될 수 있다고 하였다. 이들의 보고에서 또한 물 사용량 당 5cm에서 15cm로의 간헐적인 담수조건 하에서 토양의 형태와 관계없이 약 0.1정도의 실험계수를 갖음을 알아내었다. Oster등(1972)은 미사질식토에서 스프링클러에 의한 관개에서도 비슷한 계수를 갖는다고 하였다. 위의 공식은 실제로 배수가 진행되었거나 $D/D_s > K$ 의 범위에서 적용된다.

식 7-15는 초기 염류도와 요구하는 염류도, 토양의 원하는 특정 깊이로부터 염류를 용탈 시키기에 필요한 물의 양을 계산하는데 쉽게 이용될 수 있다. 염류 용탈 효율은 D/D_s 비율이 사양토에서는 0.5, 식양토, 식토에서 0.75를 초과할 때 급격히 감소한다.

물 요구량을 보다 더 줄이기 위한 조절을 한 후에도 스프링클러 관개에 의한 용탈은 연속적인 담수보다 더 장기간 진행될 수 있다. 이것은 용탈수가 포화 수리전도도(HC)이하의 비율로 관계되었기 때문이다. 이것은 용탈 시간과 증발을 증가시키고, 다시 말해 용탈수의 염류도를 증가시킨다. 배수 조건은 토양용액과 염분의 재분배에 영향을 준다. 배수 양호한 토양에서 침입한 물은 높은 지하 수위를 갖는 배수 불량 토양에서 보다 깊은 깊이로 침투하며, 염분은 보다 깊이 용탈된다.

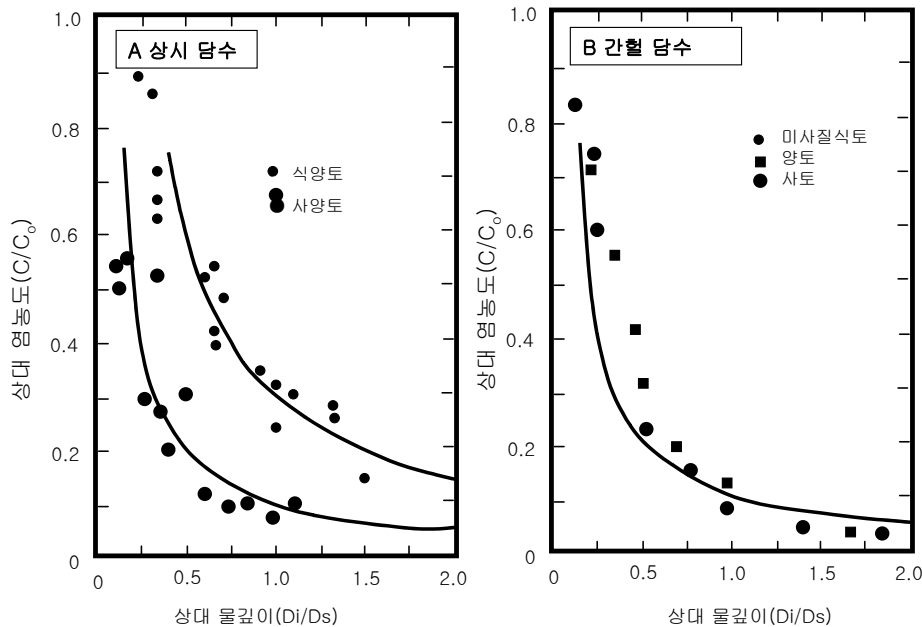


그림 7-9. 상시 담수와 간헐 담수시 제염 효과(Hoffman, 1980)

다. 용탈 방법

(1) 상시 담수

농업 용수가 풍부하고, 수질이 양호한 지역에서 광범위하게 사용되며, 가장 경제적으로 할 수 있는 방법이다. 투수성이 느린 곳에서는 환수를 통하여 제염을 촉진할 수 있다. 그림 7-9A는 상시 담수하여 수직 배수를 시켰을 때 제염율로(Hoffman, 1980), 초기 염농도에 대한 용탈 후 염농도의 비(C/C_0)를 토양을 통과한 물 깊이와 그 토양의 깊이의 비(D_i/D_s)에 대해 나타낸 것이다. $D_i/D_s = 0.5$ 일 때, 즉, 제염하고자 하는 토양 깊이의 반에 해당하는 물 깊이가 통과되었을 때, 토양 내 염분은 사양토에서 80%, 식양토에서 30%가 제거된다. $D_i/D_s = 1$ 일 때에는 사양토에서 90%가 식양토에서는 50%의 염분이 제거된다. 미사질토양은 사양토와 식양토의 중간으로 볼 수 있으며, 미사질 식양토는 식양토와 비슷하거나 제염율이 다소 낮을 것으로 보인다. 이에 따르면, 초기 염농도가 32 dSm^{-1} 인 간척지 토양에 600mm를 관수하여 통과시키면, 사양토에서는 토양의 깊이 60 cm 까지의 염을 4 dSm^{-1} 이하로, 식양토에서는 8 dS/m 이하로 낮출 수 있다는 계산이 된다. 우리나라에서 배수가 불량한 논외 투수 속도를 2 mm/day 로 보면, 비 담수 기간 중 염의 상승을 막는다면, 300일의 상시 담수로 제염이 가능하다. 포장의 투수 속도와 토양의 성질에 따라서 제염율과 제염 속도가 달라지게 되고, 제염화 속도 역시 중요한 변수이므로, 위 계산이 일률적으로 적용되지 않겠으나, 제염 지침의 하나로 유용할 수 있다(류 등, 1994).

우리 나라 간척지는 초기 투수 속도가 매우 낮으므로, 간척 후 3~5년간 방치하여 갈대등이 자랄 수 있도록 하여, 토양을 숙성시킨 뒤, 용탈 전 건조시킨 후 담수 하면, 효과가 기대된다. 투수속도가 낮은 곳에서는 심토 파쇄나 심경 등으로 투수를 도와야 한다. 이상적으로, 토양은 용탈 전 건조해야 한다.

(2) 간헐 담수

일정량의 물이 투수된 다음 방치하여 과잉의 물이 배제된 다음, 다시 담수하는 방법으로, 특히 암거 배수를 갖는 포장에 적합하며, 수면을 하강시킴으로서 용탈 효율은 상당히 높아진다(그림 7-9B). 토양의 표면이 막혔을 때 간헐 담수는 토양을 갈라지게 함으로써 물의 투과성을 좋게 한다. 그러나 젖은 토양의 노출기간이 길면 증발이 증가한다. 간헐 담수 시 멀칭을 하면 담수의 효과를 높일 수 있다. 특히 낮은 배수 속도와 지하수위가 높은 경우에 적합하다.

(3) 스프링쿨러에 관수에 용탈

이 방법은 담수 용탈의 여건이 안된 포장에서 유리하게 사용될 수 있다. 이것은 바람부는 날처럼 증발조건이 좋은 경우 외에는 용탈 효율이 높다. 그러나 에너지와 비용이 많이 든다. 이것은 특히 용탈수가 부족하고, 지형이 불균일한 사질토양에서 밭 작물을 재배할 때 적합하다.

(4) 고랑 관개에 의한 용탈

고랑 관개는 염류 지역에서 경작지의 염류를 최소화하기 위해 사용된다. 이랑을 높게 만들고, 모든 도랑은 물이 흐르게 한다. 이것은 관개되지 않은 옆 도랑으로 염류를 이동시킨다. 서서히 확산된 물은 높은 지하수위 때문에 멀리까지 표면 배수될 수 있다. 염류가 집적된 과수원 등지에 사용되는 또 다른 방법은 교차 고랑 용탈법이다(Miyamoto 1988). 나무의 각 줄을 따라 두개의 테두리가 위치한다. 용탈수는 좁고 긴 땅의 테두리에 공급되며, 줄 사이의 좁고 긴 지역에는 공급되지 않는다. 이것은 나무 근처에서 빠른 용탈을 일으키며, 줄 사이의 메마른 좁고 긴 지역으로 염류의 일부가 확산된다. 줄 사이에 집적된 염류는 지하수위가 낮아진 후 용탈 될 것이다. 이 방법은 배수가 완성될 때까지 나무를 살아있도록 유지한다.

(5) 지표면 염류 제거 및 생물학적 제염

고농도의 가용성 염은 지표 부근에 농축되므로, 지하 수위가 높은 토양에서 지하 용탈이 어려운 경우에는, 토양 단면 내부로 용탈시키는 대신에 표면에 축적된 염류를 세척에 의하여 제거하는 것이 필요하다. 그러나 면상 흐름에 의한 세척법은 염류 제거에 효과적이지 못하다(Reeve 등, 1955)

기계적 수단을 통한 물리적인 염류 제거는 또 다른 대안이다.

간척 초기에 일반 작물의 재배가 불가능한 지역에서 제염의 한 방법으로 해안에 분포하는 염생 식물의 이용이 가능하다(류등, 1998). 일부 염생 식물은 식물체내에 다량으로 염분을 흡수하며, 염분 농도가 높은 조건에서도 번무한다. 이들 염생 식물을 인공으로 파종하여 번무하도록 한 다음, 이들 지상부를 거두어 처리하면, 제염이 가능하다. 이들의 번무는 지하부의 발달로 토양의 물리적 성질을 개선하는 데 도움을 준다. 건조기에 지면이 노출되어 있을 경우 풍식이 우려되는 곳에서는 지면 피복 효과를 거둘 수 있다.

라. 대규모 개간 계획을 의한 용탈

대규모 개간 계획에 접근하는 가장 좋은 방법은 대상 지역 현장에서 포장 시험을 수행하는 것이다. 이러한 용탈 시험은 대형 라이시미터 또는 10 m² 규모의 시험구를 만들어 수행되는 시것이 보통이다. 규모는 물공급 등 시설 가용성에 의해 결정된다. 시험 결과는 용탈 효율을 예측하고 용탈 요구량을 계산하는 데 사용하기 위한 것이다.

일반적으로, 0.3 m 깊이의 토양을 제염하는 데 0.3 m의 물이 요구된다. 염류의 농도가 매우 높은 토양을 개간을 위한 포장 시험 결과는 일반 원칙과 다를 수 있다.

용탈에 필요한 물과 용탈에 걸리는 시간은 장소에 따라서 다를 것이라는 것은 의심할 여지가 없다. 그 차이는

① 토양 조건 : 토성, 토양 구조, 토양 공극 기하 구조, 균열 형성, 점토 광물, 그리고 점토의 물리적 화학적 행동

② 초기 염농도와 수용성 염류의 조성

- ③ 용탈에 사용되는 관개수의 염 농도와 화학적 조성
 - ④ 용탈 기술과 개간 중 내염성 작물 재배 전망
- 등에 달려 있다.

토양의 구조 파괴를 방지하고, 개간을 촉진하기 위해, 화학 토양 개량재의 사용이 바람직하다. 이 목적의 토양 개량재는 수용성 칼슘원을 함유하거나, 토양에 존재하는 탄산 칼슘의 용해도를 높힐 수 있어야 한다.

석고는 염류 토양과 나트륨 염성 토양의 개량에 가장 많이 사용되는 토양 개량재이다. 석고는 산업 부산물이다.

석고의 소요량은 다음과 같이 계산된다(van Hoorn과 Alphen, 1994). 즉,

$$S_D = \frac{8.61 \times (ESP_a - ESP_f) \times CEC \times D \times \rho_b}{1000 \times f} \quad 7-16$$

이며, 여기서

- S_D = 토심 D m에 필요한 석고의 양(ton/ha)
- D = 개량 대상 토양의 깊이(m)
- ρ_b = 토양의 용적밀도(kg/m³)
- ESP_a = 토양의 교환성 나트륨 퍼센트
- ESP_f = 개량 후 목표 교환성 나트륨 퍼센트. 보통 5-10임
- CEC = 양이온 교환용량(cmol/kg)
- f = 석고 시용 효율(%)

석고 시용 효율은 다음 요인에 의해 결정된다.

- ① 시용된 석고 모두가 교환성 나트륨의 치환에 이용되는 것이 아니다. 일부는 Mg와 K를 치환한다.
- ② 토양 중 석고의 시용이 불균일하다.
- ③ 시용된 석고 중 일부는 심토로 투수되는 물을 따라 이동된다.
- ④ 석고의 입도
- ⑤ 토양 용액에 존재하는 수용성 염이 종류

석고 살포 효율은 40-70% 수준이다. 네델란드에서 개간 중인 간척지 토양에 대한 계속적인 모니터링을 통해 석고 효율은 50%이다(van der Molen, 1957).

식 7-16에 의해 계산된 석고 요구량은 하나의 지침이다. 석고 요구량이 많으면, 한번에 전량 시용하는 것은 용해도 때문에 비효율적이다. 예를 들어, 석고 시용량이 20 ton/ha인 경우, 이를 녹이기 위해 10,000 m³의 물이 필요하다. 이는 1,000mm의 물에 해당하며, 이는

한 작기의 관개수 전량보다 많은 양이다. 아직 석고를 모든 토양에서 혼입해야 하는지에 대한 의견은 일치하지 않고 있다. 아직은 표면 시용이 추천되고 있다.

석고의 표면 시용에서 특히 입도가 0.25mm 이하로 가는 입자를 사용하였을 때, 관개수에 의해 낮은 곳으로 몰릴 수 있다. 그러므로, 석고는 토양이 건조한 상태에서 표토 0.05-0.10 m 깊이 토양과 잘 섞어 주는 것이 가장 효과적이다.

나트륨 염성 토양의 개간은 매우 어려우며, 개간에 시간과 경비가 많이 든다. 이러한 토양에서는 우선 양어장이나 벼 재배를 고려할 수 있다. 벼 이외에 교환성 나트륨에 내염성을 갖으면서, 심토의 토양 구조가 불량한 토양에서 자랄 수 있는 목초들이 있다. 이들 목초의 뿌리 활동으로 토양의 물리성이 개선될 수 있다. 뿌리의 활성과 유기물은 토양 내 존재하는 탄산칼슘의 용해도를 증가시켜 교환성 나트륨이 치환될 수 있도록 한다. 그러나, 나트륨 염성 토양을 개량하기 위한 이들 방법은 수년 이상의 많은 시간을 요구한다.

염류 농도가 높은 나트륨 염성 염류토는 토양 구조가 불량하지 않은 경우가 있다. 그러나, 배수와 초기 제염에 따라서 토양 구조가 파괴되기 쉽다. 토양 구조가 파괴되면 침투율이 현저히 감소한다. 제염 속도는 느려지며, 개간에 걸리는 기간이 길어진다.

또 다른 토양 개량재 범주로 유기물, 황, 황산철, 또는 산 생성 물질 등이다. 이들 산생성 물질은 토양에 탄산칼슘이 존재하는 토양에 제한된다. 황과 황산철은 미생물 활동에 의해 산화하여, 중간 생성물로 황산 이온이 생긴다. 황산 이온은 탄산칼슘과 반응하여 용해도가 이보다 더 큰 석고(황산칼슘)로 된다. 인산 석고(phosphor-gypsum)는 인산 제조 과정에서 생산되는 부산물로 분말상 물질이다. 이는 염류 토양에 매우 효과적인 토양 개량재로 알려져 있다(Metha, 1983).

2. 염류화 방지를 위한 제염과 용탈 요구량

염은 매 관개할 때마다 가해지게 된다. 이들 염은 근권에 가해 가능한 농도로 집적될 경우 작물의 수량을 감소시키게 된다. 작물은 관개된 물을 토양으로부터 증발산의 형태로 소모하지만, 염은 대부분 토양에 농축되어 남는다. 가해진 염의 일부는 근권으로부터 농도가 작물에 영향을 주기 전에 용탈되어야 한다. 용탈은 충분한 양의 물을 공급하여 토양을 수직으로 통과하여 배수시킴으로 이루어진다. 근권을 통과하여야 하는 물의 분율을 용탈율(LF)이라 한다.

$$LF = \frac{\text{근권아래로 용탈되어야 하는 물의 양}}{\text{지표에 관개되는 물의 양}} \quad 7-17$$

연속되는 관개 다음에, 염의 집적은 관개된 물의 염류도와 용탈율 사이에 이루어지는 일종의 평형 농도에 접근하게 된다. 용탈율이 높을 때(예를 들어 $LF=0.5$), 용탈율이 낮을 때보다($LF=0.1$) 염의 집적이 적다. 관개수의 염류도(EC_w)와 용탈율(LF)가 알려져 있다

면 배수수의 근권밖으로 투과되는 염류도와 평균 근권 염류도를 추정하는 것이 가능하다. 배수되는 물의 염류도는 다음과 같다.

$$EC_{dw} = \frac{EC_w}{LF} \quad 7-18$$

여기서 EC_{dw} 는 근권 밖으로 배수되는 물의 염류도로 근권 하단의 토양 염류도 EC_{sw} 와 같다.

관개수의 수질과 용탈율로부터 배수수의 염류도를 예측하는 계산의 한 예이다. 작물은 근권의 하단 끝에서만 이 염류도에 직면하게 되므로, 작물 근권의 평균 염류도는 이보다 낮다. 포장에서 작물의 염류도에 대한 반응은 근권의 평균 염류도에 의해서 주로 영향을 받으며, 최상부 또는 최하부 국부적인 염류도에 의해서만 결정되는 것이 아니다.

식 7-17은 근권에서 깊이별 물이용 비율을 알 수 있다면, 근권 토양 용액의 평균 염류도 (EC_{sw})를 예측하는 데에도 사용할 수 있다. 표 1의 지침에 의하면, 근권을 4 깊이로 등분하면, 물이용 비율이 40, 30, 20, 10 퍼센트라 하였다. 이 비율은 현장에서 흔히 적용될 수 있는 것이다. 예 2는 이러한 조건에서 깊이별 염류도를 추정하는 계산한 예이다.

용탈율 LF 가 15 퍼센트이고, 물 이용비율이 근권의 4등분 깊이별로 40-30-20-10일때, 근권 토양 용액 염류도(EC_{sw})의 평균은 관개수의 염류도 EC_w 의 3.2배가 되며, 용탈율 LF 가 20 퍼센트일 때, 토양 용액의 평균 염류도(EC_{sw})는 관개수의 염류도 EC_w 의 2.7배가 된다. 표 7-11의 지침은 용탈율 LF 이 15에서 20 퍼센트를 가정하면, 배수수의 염류도는 관개수 염류도의 약 3배가 되는 것을 가정하고 있다.

토양 용액 염류도(EC_{sw})는 작물의 뿌리가 접하고 있는 근권의 평균 염류도이다. 이는 측정하기 어렵다. 토양 염류도는 토양의 포화 침출액에 대해 측정되며, 이를 토양의 포화 침출액 염류도(EC_e)라 한다. 이는 토양 용액 염류도(EC_{sw})의 약 반이다. 일반 원칙으로, 15-20 퍼센트 용탈율에서, 공급된 물의 염류도(EC_w)로부터 토양 용액 염류도(EC_{sw}) 또는 토양의 포화침출액 염류도(EC_e)를 추정하는 데 다음과 같은 식이 적용된다.

$$EC_{sw} = 3 \times EC_w \quad 7-19$$

$$EC_e = 1.5 \times EC_w \quad 7-20$$

$$EC_{sw} = 2 \times EC_e \quad 7-21$$

관개 방법에 따라서 용탈율 15-20 퍼센트보다 크거나 작으면, 위의 예에서 같은 과정으로 새로운 보정 농도 계수를 계산할 수 있다. 표 7-12는 0.05에서 0.80 범위의 LF 에서 농도 계수를 보여준다. 예측된 토양의 평균 염류도(EC_e)는 관개수의 염류도(EC_w)에 이 값을 곱하여 얻어질 수 있다. 이 값은 같은 관개수를 장기간 사용하였을 때 도달 될 수 있는 염류도이며, 단기간 또는 한 작물 기간 중에 도달되는 것이 아니다.

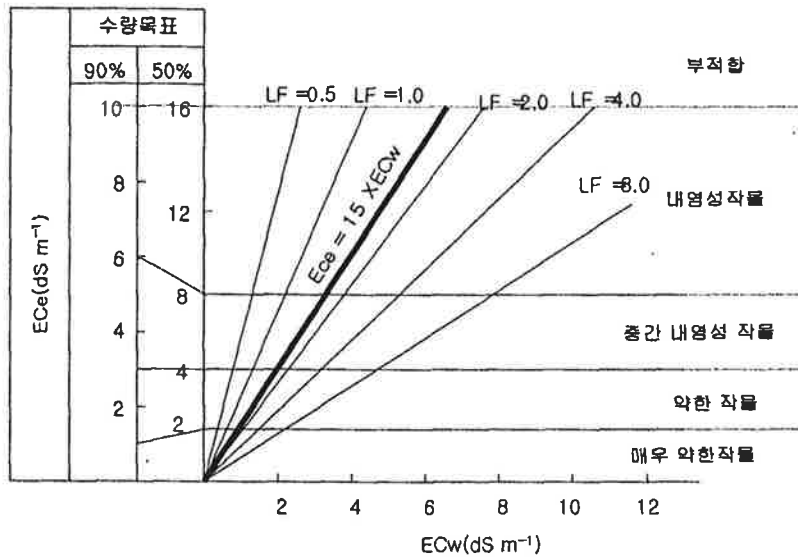


그림 7-10 용탈 계수에 따른 토양의 E_c와 관개수 E_w 관리

예 1. 근권 하단부에서의 염류도 계산

염류도가 1 dSm⁻¹인 관개수로 어떤 작물을 재배한다고 하자. L_F이 0.15인 상태로 작물을 재배한다고 할 때, 근권 하단에서의 염류도는 어떻게 계산되겠는가?

풀이 :

근권 밖 토양 용액의 염류도 (E_{sw})는 배수수의 염류도 (E_{dw})와 평형을 이룬다. 배수수의 염류도는 식 7-17에 의하여

$$E_{dw} = E_{sw} = \frac{E_c}{L_F}$$

$$= \frac{1}{0.15} = 6.7 \text{ (dSm}^{-1}\text{)}$$

즉, 근권을 통과하여 빠져 나가는 물의 염류도는 6.7 dSm⁻¹이다.

표 7-12 관개수의 염류도와 용탈율로부터 토양 염류도(EC_e)
예측을 위한 농도 계수

용탈율(LF)	증발산량 대비 공급 요구 물량(%)	농도 계수(X)
0.05	105.3	3.2
0.10	111.1	2.1
0.15	117.6	1.6
0.20	125.0	1.3
0.25	133.3	1.2
0.30	142.9	1.0
0.40	166.7	0.9
0.50	200.0	0.8
0.60	250.0	0.7
0.70	333.3	0.6
0.80	500.0	0.6

예2 - 평균 근권 염류도 계산

근권의 평균 염류도는 근권 깊이의 5개 지점을 사용하여 다음과 같은 과정에 의해 계

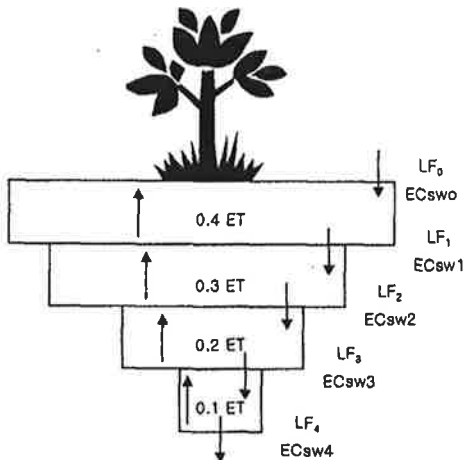


그림 7-11. 4분 근권의 염류도 평가를 의미한다.

- 1) 공급된 물의 염류도(EC_w)는 1 dSm^{-1} 이다.
- 2) 작물의 물 소모량(ET)는 1000 mm이다.
- 3)작물의 물 소모 형태는 40-30-20-10이다. 이는 토양 근권의 4등분 상부층에서 40 퍼센트, 두 번째 층에서 30, 세 번째 층에서 20, 최 하부 층에서 10 퍼센트의 물을 이용한다는 것을 의미한다. 작물의 토양 수분의 이용에 따라서, 그 층에서 다음 층으로 용탈되는 물의 염류도(EC_{sw})는 높아진다.
- 4) 요구되는 용탈율(LF)은 0.15이다. 이는 관개된 물의 85 퍼센트는 증발산에 의해 소모 되고, 15 퍼센트는 근권 밖으로 용탈됨

<해>

① 근권의 평균 염류도 계산을 위하여 5개 지점이 선택되어야 한다. 이 점들은 토양 표면, 근권을 4 등분한 세 깊이, 그리고 근권 최하단부 등이다. 각 점에서 토양 용액 염류를 각각 EC_{sw1} , EC_{sw2} , EC_{sw3} , EC_{sw4} , EC_{sw5} 라 하며, EC_{sw5} 는 배수수의 염류도 (EC_{dw}) 와 같다. 즉, $EC_{sw5} = EC_{dw}$ 이다.

② 용탈율 0.15로부터, 공급된 물(AW)은 ET와 배수수(DW)를 충족하여야 한다. 그러므로,

$$AW = \frac{ET}{1-LF} = \frac{1000}{1-0.15} = 1176 \text{ (mm)}$$

이다.

③ 모든 물은 토양으로 침입하여, 토양 수분으로 보지되거나, 용탈된다. 용탈되는 물은 효과적으로 토양의 과잉염을 배제한다고 가정한다면, 토양 표면에서의 토양 용액 염류도 (EC_{sw0})는 관개수의 염류도(EC_w)와 같고, $LF_0 = 1.0$ 이다.

$$EC_{sw0} = EC_{sw0} = \frac{EC_w}{LF_0} = \frac{1}{1} = 1 \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$$

④ 각 4 등분 깊이에서 배수되는 물의 염류도는 다음과 같이 계산된다.

$$LF = \frac{\text{배제된물량}}{\text{공급된물량}}, \quad EC_{sw} = \frac{EC_w}{LF}$$

그러므로, 첫째 4등분 깊이에서

$$LF_1 = \frac{\text{배제된물량}}{\text{공급된물량}} = \frac{1176 - 0.4 \times (1000)}{1176} = 0.66,$$

$$EC_{sw1} = \frac{EC_w}{LF_1} = \frac{1}{0.66} = 1.5 \text{ dS m}^{-1}$$

두 번째 4등분 깊이에서

$$LF_2 = \frac{\text{배제된물량}}{\text{공급된물량}} = \frac{1176 - 0.4 \times (1000) - 0.3 \times 1000}{1176 - 400} = 0.61$$

$$EC_{su2} = \frac{EC_{w1}}{LF_2} = \frac{1.5}{0.61} = 2.5 \text{ dS m}^{-1}$$

세 번째 4등분 깊이에서

$$LF_3 = \frac{\text{배제된물량}}{\text{공급된물량}} = \frac{1176 - 0.4 \times (1000) - 0.3 \times 1000 - 0.2 \times 1000}{1176 - 700} = 0.58$$

$$EC_{su2} = \frac{EC_{su2}}{LF_3} = \frac{2.5}{0.58} = 3.75$$

근권 하단부에서

$$LF_4 = \frac{\text{배제된물량}}{\text{공급된물량}} = \frac{1176 - 0.4 \times (1000) - 0.3 \times 1000 - 0.2 \times 1000}{1176 - 900} = 0.64$$

$$EC_{su4} = \frac{EC_{w3}}{LF_4} = \frac{4.3}{0.64} = 6.7 \text{ dSm}^{-1}$$

⑤ 근권의 평균 토양 용액 염류도(EC_{sw})는

$$EC_{sw} = \frac{EC_{su0} + EC_{su1} + EC_{su2} + EC_{su3} + EC_{su4}}{5} = 3.2 \text{ dSm}^{-1}$$

⑥ 근권의 평균 토양 염류도는 관개수 염류도의 3.2배가 되며, 배수수의 포화침출액 염류도는 관개수의 3.2배가 된다.

나. 용탈 요구량

토양에 수용성 염의 과잉 집적이 시작되거나, 예상될 때, 염은 작물 재배 기간 중 생육에 필요한 물보다 더 많은 양을 공급하여, 용탈시키는 것이 필요하다. 이 과잉 수는 심층으로 투과되어 용탈에 의한 배제가 이루어져야 한다. 용탈은 관개수에 의하여 유입된 염을 배제하는 주요 수단이며, 염류도 관리의 관건이다. 장기적으로, 용탈에 의한 염제거가 공급된 물에서 유입되는 염의 양과 같거나 이보다 많아야 집적된 염을 제거하고, 염의 재집적을 막을 수 있다. 문제는 얼마나 많은 물이 용탈되어야 하는가이다. 용탈 요구량(Leaching requirement; LR)을 추정하기 위해서, 관개수의 염류도(EC_w)와 토양 염류도(EC_e)의 관리 목표 또는 토양 염류도에 대한 작물의 내염성을 알아야 한다. 수질 염류도는 분석에 의하여 알아낼 수 있지만, 작물의 내염성은 2.4.3의 표에서 찾을 수 있다. 이 표들은 각 작물에 대해 수량 목표에 따른 토양 염류도 기준이며, 대부분 10 퍼센트 수량 감소를 기준으로 삼는다.

필요한 용탈요구량(LR)은 일반 작부 조건에서 식 7-22로부터 계산 할 수 있다(Rhoades, 1974; Rhoades와 Merrill, 1976).

$$LR = \frac{EC_w}{5 \times EC_e - EC_w} \quad 7-22 \text{ 이며,}$$

여기서, LR은 일반 지표 관개에서 작물의 내염성 지표 토양 염류도 EC_e 이내로 토양 염류도를 유지하기 위한 최소 용탈량이다.

용탈 요구량을 충족시키기 위한 연중 필요한 물량은 식 7-23에서 계산될 수 있다.

$$AW = \frac{ET}{1 - LR} \quad 7-23$$

예 3. 용탈 요구량 계산

토양은 양토이며, 수자원은 하천수이며, 염류도 EC_w 는 1.2 dS m^{-1} 이다. 작물의 증발산량은 재배 기간 중 800mm 이다. 관개 효율은 65 퍼센트이다. 용탈을 위해 얼마나 많은 물이 공급되어야 하는가?

조건

$$EC_w = 1.2 \text{ dS m}^{-1}$$

$$EC_e = 2.5 \text{ dS m}^{-1} (\text{수량 } 90\% \text{ 유지})$$

$$EC_e = 1.7 \text{ dS m}^{-1} (\text{수량 } 100\% \text{ 유지})$$

풀이

식 7-21과 표 4로부터 용탈에 필요한 물의 양을 계산할 수 있다.

90% 수량 유지를 위해

$$LR = \frac{EC_w}{5 \times EC_e - EC_w} = \frac{1.2}{5 \times 2.5 - 1.2} = 0.10$$

$$AW = \frac{ET}{1 - LR} = \frac{800}{1 - 0.10} = 890 \text{ mm}$$

100% 수량 유지를 위해

$$LR = \frac{EC_w}{5 \times EC_e - EC_w} = \frac{1.2}{5 \times 1.7 - 1.2} = 0.16 \text{ (100\% 수량 유지)}$$

$$AW = \frac{ET}{1 - LR} = \frac{800}{1 - 0.16} = 952$$

다. 용탈 시기

근권에서 수량 감소가 일어날 수 있는 염이 집적하는 데에는 시간이 걸린다. 대부분 관개수는 수질이 만족스러운 경우, 용탈 없이 수량에 영향을 줄 수 있을 정도로 염류가 집적하는 데에는 2년 이상 걸린다. 또한, 생육기가 지난 다음에는 근권 토양 염류도가 높아져도 수량에 큰 영향을 주지 않는다. 즉, 관개 기간 초기에 염의 농도가 충분히 낮으면, 재배 기간 중 염류도에 의한 영향 없이 충분한 수량을 얻을 수 있다는 것이다. 심토의 수분을 보충하고, 집적된 염이 용탈될 수 있고 다음 기간의 강수, 휴면 기간과 재배 전 관수 등을 개별로 또는 조합으로 이용할 수 있다. 더운 여름 동안에는 작물에 필수적인 물과 용탈에 필요한 물을 모두 충분하게 공급할 수 없다. 반드시 기억해둘 것은 작물의 수량을 감소시키 정도로 집적되지 않는 한, 용탈은 불필용다는 점이다.

장기간 작물의 내염성 한계 농도를 초과하지 않는 한 용탈 시기는 크게 중요하지 않다. 이는 용탈의 상대적 중요성이 없다는 의미는 아니다. 용탈 요구량은 과잉의 염이 집적되지 않도록 충족되어야 한다. 용탈은 매 관개 때마다 또는 두 번 관개에 한번씩 또는 더 드물게는 한 계절에 한번 필요할 때 일어나게 할 수 있다. 많은 경우에, 관개 효율에 의해 용탈 요구가 충족시키는 경우가 많다. 예를 들어 어떤 관개 방법의 관개 효율이 65%이고, LR이 0.16일 경우, 이미 물공 과잉량은 용탈 요구량을 충족시키고 있다(예제 3).

용탈 요구량을 계산할 때, 강수량이 고려되어야 한다. 토양에 들어가는 강수량이 $wkrafm$ 이 증발산량과 용탈요구량을 충족시키는 데 효과적이다. 토양으로 들어가는 침투량, 즉 유효 강수량은 증발산 손실을 충당한다. 증발산을 초과하면, 이는 배수되며, 용탈 요구량의 일부 또는 전부를 충족시킨다. 용탈에 있어서 강수량은 ECw가 0.05 이하인 염이 없는 관개수를 공급한 것과 같은 효과가 있다.

강수량이 적은 해 또는 강수량이 적은 지역에서, 강수가 토양을 포장 용수량으로 채우기 부족할 수 있다. 이런 경우 근권 토양의 염을 용탈시키기 불충분하고, 표토의 염을 심토로 이동시키는 효과가 있을 뿐이다. 표토의 염류도는 발아에 충분할 정도로 낮아지는 경우가 있다.

강수가 한랭한 계절 또는 겨울에 많은 경우, 겨울 용탈이 가능하다. 용탈 목적으로 가을 또는 이른 봄에 용탈에 필요한 물을 많이 공급하는 것이 바람직하다. 온도가 낮은 기간 동안에는 증발산이 적어 용탈에 효율적이기 때문이다. 또한 겨울 기간 중의 강수는 근권 토양 수분 보충에 도움이 된다.

용탈 요구량은 예제3에서와 같이 계산될 수 있다. 그러나, 이는 실제 일어날 수 있는 용탈량을 추산할 뿐이다. 토양과 작물에 대한 감시는 용탈 필요성을 판단하는 주요 수단이다. 한 작물 기간에서 다른 작물 기간 사이의 변이가 매우 크다. 그러므로, 장기간 경향과 토양 염류도 변화에 대한 감시가 강조된다.

효과적인 용탈을 위한 방법을 정리하면 다음과 같다.

- ① 용탈은 더운 여름기간 동안보다 온도가 낮은 계절에 실시하는 것이 좋다. 왜냐하면은

도가 낮은 계절에는 증발산량이 적기 때문에 같은 물량으로 용탈에 보다 효과적이다.

- ② 내염성 작물을 선택하면, 용탈 요구량도 줄일 수 있다.
- ③ 지면에서 유거량을 줄일 수 있도록 경운하며, 큰 균열을 통해 용탈되지 않고 배수되지 않도록 해야 한다.
- ④ 계속 담수하는 방법 보다는 간헐적 담수가 더 효율적이다.
- ⑤ 스프링클러 관개시 침투율 보다 낮은 속도로 관개하는 것이 바람직하다.
- ⑥ 작물의 물 소모가 많을 때를 피하여 계획 관개하는 것이 바람직하다.
- ⑦ 지하수위가 상승하는 더운 여름의 휴경 기간은 피하는 것이 좋다.
- ⑧ 침투율이 낮을 때, 작물 재배 기간 중 지나친 관개로 인한 습해를 피하기 위해 재배 전 또는 비 경작기간 중 용탈이 바람직하다.

바람직한 관개 계획은 물의 낭비를 피하면서, 작물의 물요구와 용탈 요구량을 충족시킬 수 있어야 한다. 작물의 물 요구량과 용탈 요구량은 계산에 의하여 추정할 수 있다. 그러나, 투수 속도, 관개 대상 기간과 면적 등이 부정확한 경우가 많아, 효율적인 관개 계획 수립이 어렵다. 과거의 토양 관리 사항과 토양의 염류도를 정확히 알아내는 것이 필요하다. 토양 염류도의 조사는 과거 토양 관리를 알아내는 데 도움이 된다.

다음 과정이 필요하다.

- ① 지난 작기의 작물 근권 깊이를 추정한다. 관찰 깊이는 최소한 근권의 75에서 85 퍼센트를 포함하여야 한다.
- ② 대표 지점에서 근권의 4등분 깊이에서 토양 시료를 채취한다. 채취된 시료의 ECe를 표준 포화침출액법으로 측정한다.
- ③ 분석된 자료로부터 그림 2와 같이 그래프를 그린 다음, 용탈율을 산정한다.
- ④ 분석된 자료로부터 토양의 평균 염류도를 계산한 다음, 재배 대상 작물의 내염성과 비교한다.
- ⑤ 선정된 용탈율과 토양 염류도 및 작물의 내염성 염류도로부터 필요한 관개 관리법을 설계한다.

제 6절 지하수 상승에 따른 염류화

1. 모세관 상승

관개 농업 지대에서, 관개와 관개 사이 또는 작물 재배가 이루어지고 있지 않는 건조 기간에 투수되는 물이 없으면, 모세관 현상에 의하여 물이 상향 이동하게 된다. 물은 식물의

1. 모세관 상승

관개 농업 지대에서, 관개와 관개 사이 또는 작물 재배가 이루어지고 있지 않는 건조 기간에 투수되는 물이 없으면, 모세관 현상에 의하여 물이 상향 이동하게 된다. 물은 식물의 뿌리에 의해 흡수되거나, 지면에서 증발하고 염은 근권 또는 표토에 남는다.

모세관에 의한 상향 이동은 토양의 종류, 지하수위의 깊이, 토양수분 구배 등에 의하여 달라진다. 그림 7-12는 세 가지 다른 토양에서 모세관수 상승 속도와 지하수위 깊이와의 관계를 보여준다. 이는 지하수위에서의 장력 0에서부터 토양 표면에서의 $16 \times 10^5 \text{Pa}$ (= 16 bar)일 때 모세관수 상승 속도이다. 지하수위가 삼출되는 물에 의하여 한 위치에 고정되어 있다면, 모세관수 상승은 상당한 양에 달하게 된다. 예를 들어 모세관 상승 속도가 1 mm/day라면, 6개월 동안 180mm의 지하수가 상승하는 셈이 된다. 모세관수 상승속도 1mm/day를 보이는 지하 수위 깊이는 식양토에서 1m, 양토에서 1.95m, 및 미사질양토에서 2.85m이다.

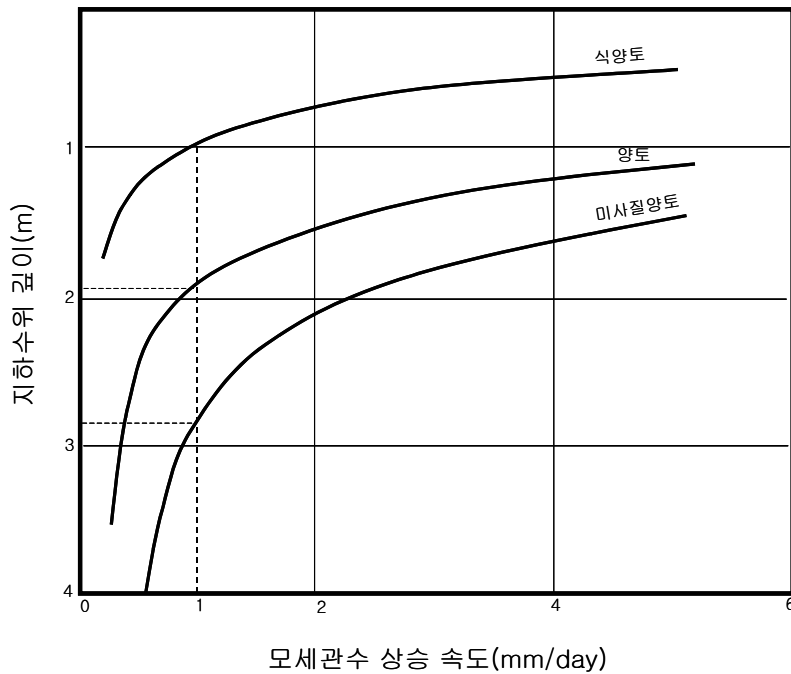


그림 7-12 모세관수 상승 속도와 지하 수위 깊이
(van Hoorn, 1979)

지하수가 삼출수에 의하여 공급되지 않으며, 모세관수 상승은 지하 수위를 낮추게 되고, 불포화권의 토양의 수분 함량은 낮아지게 된다. 토양 수분 함량이 낮아지면, 수리전도도가

낮아져 모세관수 상승 속도는 현저히 감소하게 된다. 결국, 모세관 상승 속도가 거의 0에 가까워지게 되면, 지하 수위는 더 이상 낮아지지 않는다.

표 7-13은 세 가지 토양에 대한 6개월 간의 휴경 기간 중 지하수위 낙하와 모세관수 상승량을 계산한 예이다(van Hoorn과 alphen(1994)). 실제로 있어서 토양 표면에 형성되는 마른 토양은 일종의 멀칭효과를 보여, 증발량을 제한하기 때문에 모세관 상승량은 이 보다 적다.

표 7-13 토성이 다른 세 토양에서 모세관수 상승량과 지하수위 낙하

초기 지하수위 깊이 (m)	토양	지하수위 낙하 (m)	평균 모세관수 상승속도 (mm/day)	전체 모세관수 상승량 (mm)	초기 지하수위 이하에서 상승한 량 (mm)
1.0	식양토	0.90	0.3	50	25
	양토	1.30	1.3	230	75
	미사질양토	1.90	2.0	350	140
1.50	식양토	0.50	0.2	35	10
	양토	0.85	1.0	170	30
	미사질양토	1.45	1.7	300	70
2.00	식양토	0.25	0.1	20	5
	양토	0.55	0.7	120	10
	미사질양토	1.05	1.3	230	30

*van Hoorn과 Alphen(1994)

토양 표면에서 휴경 기간 중 지면 멀칭 효과가 생기지는 토양의 종류와 기후, 그리고 작물의 종류에 따라서 달라진다.

- ① 겨울 작물은 근권의 토양 수분을 흡수하여, 멀칭 효과를 나타내게 한다.
- ② 표토의 경우는 모세관수의 연결을 끊어 이의 상승을 억제하는 멀칭 효과를 나타내게 한다.
- ③ 토양 표면에서의 증발 속도가 모세관수 상승 속도 보다 빠르면, 지면의 토양이 빨리 건조하여 모세관수의 상승을 억제하는 피복 효과를 나타내게 한다.
- ③ 적은 양의 비는 토양 표면을 적셔 모세관을 연결하고, 수리전도도를 높혀, 모세관수 상승이 많아진다.

지하 수위와 모세관 상승량은 같은 토양에서도 지역적 특성에 따라서 다르다. 삼출수의

유입이 없다면, 모세관 상승량은 지하 수위가 낮아짐에 따라서 적어진다. 지하 수위가 충분히 낮아져 모세관 상승 속도가 거의 0에 가깝게 되는 깊이를 임계 깊이라 한다.

2. 지하 수위 깊이

지하 수위 유지 깊이 기준은 관개 기간 중에는 작물의 통기성 요구와 휴경 기간 중에는 모세관 수 상승에 의한 염류 상승 방지에 달려 있다. 관개 기간 중에는 다음과 같은 기준이 적용될 수 있다(FAO, 1980). 즉, 일반 작물과 채소류에는 1.0 m에서 1.2 m, 과수 작물에는 1.2 m에서 1.6 m이다.

토성이 거친 사질토에서는 얕은 깊이가 요구되며, 세립질 토양에서는 더 깊은 깊이가 요구된다. 평균 깊이는 정상류 흐름 상태에서 관개 간격 산정에 사용되는 깊이이다(제 8장). 비정상류 상태의 식이 사용되었다면, 지하수위 깊이는 초과되어서는 안되는 최소 깊이와 일치하여야 한다. 이 깊이는 일반 작물과 채소류에는 0.9m, 과수 작물에는 1.0 m와 1.4m이다.

관개 기간 중에는 투수량이 충분하므로, 삼출 유입이 있어도, 모세관 상승에 의한 염의 집적 위험이 거의 없다. 그러나, 휴경 기간 중에는 모세관수 상승에 의한 근권으로의 염상승이 이루어진다. 삼출수 유입이 없다면, 휴경 기간 중에는 지하수위가 떨어져 모세관수 상승은 0에 가깝게 된다. 근권과 심층토의 장기간 평형에 의하여, 상향 흐름에 의해 상승하는 염은 투수에 의하여 용탈되는 염과 같아진다. 이는 순 투수량의 감소를 가져 온다. 염농도가 낮거나 중인 관개수의 실제적인 용탈 분율은 용탈 요구량에 의한 분율보다 더 높다. 이러한 경우 모세관수 상승에 의한 염류화는 일어나지 않는다. 반대로, 삼출수 유입이 있거나 또는 함염 지하수의 상승이 있는 경우에는 휴경 기간 중 모세관수 상승에 의한 염류화가 일어난다.

휴경 기간 중 염류화 위험을 줄이기 위해서, 지하 수위가 사질토에서는 1.4m, 미사질토에서는 1.7m 이하로 유지되어야 한다.

사질토에서는 모세관수 상승 속도가 빠르지만, 모세관수 상승 높이는 제한된다. 점토질 토양은 모세관수 상승 속도는 느리지만, 이론적으로 모세관 상승 높이가 높다. 실제에 있어서 이 높이는 토양이 건조할 때 생기는 균열 등으로 모세관 연결이 끊어져 제한된다. 이에 비하여, 미사질 토양에서는 미사가 많은 경우 건조하였을 때 균열 형성이 잘 안되는 경우가 많고, 모세관수 상승에 따른 염의 상승에 의한 집적 위험이 가장 크다. 또한 평균 모세관수 상승 속도와 모세관수 상승 높이도 무시할 수 없다.

지하 수위를 사질토와 식질토에서 1.4m, 미사질토에서 1.7인 한계 깊이 이하로 유지한다고 해서 모세관수 상승에 의한 염류화를 완전히 방지한다고 할 수 없다. 이는 포장의 조건에 의해 달라진다. 모세관수 상승이 투수에 의하여 방지되지 않는다면, 지하수위가 3.4m

깊이에 있어도 지하수의 이동에 의해 비관개 지역에서 염류 상승이 이루어질 수 있다.

장기적인 관점에서 모세관수 상승은 투수에 의하여 배제되어야 한다. 물의 하향 이동량이 많아야 토양 염류도의 증가를 방지할 수 있다.

3. 배수

관개 농업에서 부딪치는 염류 문제는 지면 부근 1, 2 m 이내에 있는 제어되지 않은 지하수위와 관련이 있는 경우가 많다. 지하수위가 얇은 대부분의 토양에서, 지하수가 모세관을 통하여 근권으로 상승한다. 지하수에 염이 함유되어 있으면, 이는 염의 주요 공급원이 된다. 지하수에서 상승한 염은 물이 증발함에 따라 토양에 남아 집적되어 토양의 염류화의 큰 요인으로 작용한다. 이러한 원인에 의한 염류화는 고온 건조한 기후에서의 관개 농업에서 흔히 일어나며, 특히 장기간 유희지로 남아 있는 곳에서 심하다. 얇은 지하수위에서의 염류 집적 속도는 토양의 종류와 기후 조건에 의해 다르다. 그림 6은 지하수의 깊이에 따른 물의 모세관 상승 속도이다. 이에 따르면, 지하수위가 1m 이내에 있을 때, 모세관수의 상승 속도는 매우 빠름을 볼 수 있어, 이에 따른 염의 상승이 상당함을 알 수 있다.

지하수위가 최소한 2m 이하의 안전한 깊이로 낮아져 안정되기 전까지는, 부적절한 배수는 염의 관리는 많은 어려움을 남긴다. 이는 염을 제거하고, 제거된 염을 배추라기 위한 명거 또는 암거 배수 시설, 또는 배수 우물 등 강제 배수 시설을 필요로 한다. 배수가 적절할 때, 염류도는 수질과 직접 관련이 있으며, 관개수와 함께 공급된 염이 집적하여 수량 감소에 영향을 줄 때에 관개 관리가 주된 문제로 떠오른다. 효과적인 염류도 관리에 지하수위의 안정과 용탈이 과잉염을 제거하는 데 필요하다. 용탈에 필요한 물이 지표에 공급했을 때 순 하향 이동량에 의해 염류가 제거된다.

표 7-14 토양 특성에 따른 배수 요구 기준

배수 기준	토양 특성
<1.5 mm	침투율이 낮은 토양
1.5-3.0mm/day	침투율이 조금 빠른 토양, 대부분의 집약적 작물 재배 토양
3.0-4.5mmday	염류와 관개 조건이 불량한 토양
>4.5mm/day	특수한 경우. 벼 재배 조립질 토양

Hoorne과 Alphen(1994)

암거는 배수 조직의 하나로, 배수가 나쁜 토양에서 용탈을 촉진하고, 경작지로서 토양을 관리하기 용이한 장점을 가지고 있다. 작물의 입장에서 배수 깊이는 과잉수에 의한 영향과 건조시 한발에 대한 해를 동시에 고려해야한다고 하면서, 지하수 위치의 적정 깊이와 상한은 과잉수에 의한 습해를 받지 않는 선에서, 그리고 하한은 가뭄이 들었을 때 지하수를 공급해 줄 수 있는 선에서 결정해야 한다. 암거의 설치에 가장 중요한 것은 깊이와 간격이다. 암거의 깊이는 작물 생육에 알맞는 최소한의 깊이와 강수시 이 깊이까지의 지하수 낙하 속도에 의하여 결정되며, 암거 간격은 암거 깊이와 토양의 수리전도도에 의하여 결정된다.

1) 암거의 깊이

배수가 작물과 토양관리에 미치는 영향을 고찰하면서 적정 배수 깊이의 설정은 재배하고자 하는 작물과 토양의 특성을 고려하여야 한다고 하였다. Visser(1958)은 고 하였다.

작물 생육과 지하수위 깊이의 관계에 있어서, 작물의 수량은 지하수위가 깊어질수록 많아지는데, 그 이유는 지하수위가 지표 부근에 있으면 습해로 작물의 뿌리가 해를 받기 때문이다. 지하수위가 깊어질수록 토양의 통기성이 좋아져 작물의 생육이 좋은 반면, 너무 깊어지면, 가뭄시 지하로부터 물공급이 끊겨 가뭄해를 받기 쉽게 된다. 따라서 지하수위가 80 - 100cm일 때가 가장 알맞는 깊이이다. 이 적정 지하수위의 깊이는 작물의 종류에 따라 다르고, 토양의 수리 특성에 따라서 다르다.

한편, 과습한 조건은 건조한 조건에서 보다 작물의 생육에 미치는 영향이 더 크며 그 원인으로서 통기성의 불량에 의한 물과 양분의 흡수 저하, 토양 구조파괴, 질소 무기화의 지연 등이다. 작물생육 이외의 또 다른 문제는 과습한 조건에서는 농작업을 어렵게 하여 파종, 경운, 제초 등 농작업의 때를 놓치게 된다는 점이다. 불충분한 배수는 농작업성을 크게 떨어뜨리게 되며, 작업할 수 있는 가용기간을 단축시키게 된다. 따라서, 작물의 재배기간이 짧아지며 생산성이 낮아진다.

배수가 불충분하여 과습한 조건에서의 농작업은 토양의 압밀을 초래하여 토양의 물리성의 악화를 가속한다. 더불어 농작업이 짧은 시간에 이루어져야 하므로, 노동력과 농기계의 능력에도 영향을 주게 된다. 초지를 조성하여 가축을 방목할 때에도, 과습하면 가축에 의하여 토양이 다져진다.

따라서, 이와 같은 여러 가지 이유 때문에 배수가 필요하다는 것은 물론이고, 더욱이 간척지와 같이 염분의 농도가 높은 곳에서는 제염을 위하여 무엇보다도 알맞는 배수가 필수적이다.

포장에서 암거배수의 깊이의 설계는 토양의 조건에 따라 크게 달라지는데, 특수한 경우 이외에 시공의 최소 깊이는 60cm로 알려져 있다(Schwab, 1966). 이 최소 깊이는 암거재료가 지면에서부터 받는 하중에 견디고 움직이지 않는 데 필요한 깊이이다. 토양의 투수

가 좋고 균일한 포장에서는 75 - 240cm가 알맞다.

배수깊이 설계시 특히 중요한 것은 많은 강수가 내린 후에 근권 아래로 신속히 과잉수를 제거해 주어야 한다. 이 때, 형성되는 지하수 낙하속도가 주요한 요인이 된다.

표 7-15 배수 용량에 따른 지하 수위 깊이 설계 기준

토지이용	배수용량 (q; m/day)	배수강도 (q/d;l/d)	설계지하수위 깊이(m)
초지	0.007	0.010	0.30
일반 밭	0.007	0.014	0.50
원예작물	0.007	0.014	0.50
위락 및 기타	0.010	0.025	0.60
	0.005	0.017	0.70
	0.010	0.050	0.80
	0.015	0.030	0.50

2) 암거의 간격

암거의 간격은 전술한 바와 같이 포장에서 지하수의 설계 깊이와 강수시 지하수 낙하속도에 의하여 결정된다. 지하수 낙하속도는 토양의 수리전도도와 수리특성에 의하여 결정된다. 지하수 낙하속도는 토양의 수리전도도와 수리특성에 의하여 결정이 되며, 특히 수리전도도가 중요한 결정요인이다. 따라서, 배수설계를 위해서는 포장의 수리전도도를 알아내어야 한다. 표 7-16은 Schwab(1966)의 암거 배수 설계 기준이다.

표 7-15 배수 용량에 따른 지하 수위 깊이 설계 기준

토지이용	배수용량 (q; m/day)	배수강도 (q/d;1/d)	설계지하수위 깊이(m)
초지	0.007	0.010	0.30
일반 밭	0.007	0.014	0.50
원예작물	0.007	0.014	0.50
위락 및 기타	0.010	0.025	0.60
	0.005	0.015	0.70
	0.010	0.050	0.80
	0.015	0.030	0.50

2) 암거의 간격

암거의 간격은 전술한 바와 같이 포장에서 지하수의 설계 깊이와 강수시 지하수 낙하 속도에 의하여 결정된다. 지하수 낙하속도는 토양의 수리전도도와 수리특성에 의하여 결정된다. 지하수 낙하속도는 토양의 수리전도도와 수리특성에 의하여 결정이 되며, 특히 수리전도도가 중요한 결정요인이다. 따라서, 배수설계를 위해서는 포장의 수리전도도를 알아내어야 한다. 표 7-16은 Schwab(1966)의 암거 배수 설계 기준이다.

표 7-16 포장 조건에 따른 암거 간격 설계 기준

토양	수리특성		암거설계간격 (m)
	투수정도	수리전도도 ($\times 10^{-5}$ cm/sec)	
식토	매우 느림	3.5	9 - 15
식양토	느림	3.5 - 14.1	9 - 15
양토	조금 느림	14.1 - 56.4	18 - 30
세사양토	보통	56.4 - 176.4	30 - 36
사양토	약간 빠름	176.4	30 - 60

* Schwab, 1966

정상류의 조건에서 배수이론에 관한 실용적인 식은 Hooghoudt(1940)과 Emst(1962)의 공식이다. 가장 간단한 경우로서

$$q/m = \frac{8Kd}{S^2} \quad 7-24$$

이다. 여기서 $q(m^3/m^3d)$ 는 단위 면적 당 1일 배수량이고, $m(m)$ 은 배수구 사이에서 지하수위 높이 차, $S(m)$ 는 배수 간격, 그리고 $K(m/d)$ 는 수리전도도이다.

암거배수구의 간격 산정에 Dupuit-Forsheimer이론이 적용될 수 있다. 이에 의하면 강수의 속도 또는 관개 속도가 일정하고 지하수위가 일정하게 유지되는 조건에서 배수량은 일정하다는 정상상태하에서 배수간격(S)은 다음과 같이 정해진다. 즉,

$$S = \frac{4K(D^2 - b^2)}{Q} \quad 7-25$$

이다. 여기서 K 는 토양의 수리전도도이며, D 는 불투수층의 깊이, b 는 지하수위의 깊이, 그리고 Q 는 배수량이다. 배수량 Q 는 과잉수 투수속도(i)와 배수간격 S 의 곱으로 표현되므로

$$S^2 = \frac{4K(D^2 - b^2)}{i} \quad 7-26$$

이다.

수리전도도(K)를 $2 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ (또는 0.0163m/day)인 포장 조건에서 암거 배수구의 깊이(b)를 0.6m , 불투수층 깊이(D)를 1.2m 로 가정하고, 초기에 토양이 포화된 조건에서 40mm 의 강수중 반이 10일 동안에 빠지는 것으로 가정하여 ($i=0.002 \text{m/day}$) Dupuit식에 적용하여 배수 간격을 계산하여 보면 배수간격은 5.9m 이다.

$$S^2 = \frac{4K(D^2 - b^2)}{i} = 35.21$$

$$S = 5.9(\text{m})$$

다음 비정상류 상태에서 배수구와 배수구 사이의 중앙에서 지하수가 지표까지 올라온 상태($m_0 = 0.6$)에서 천근성 작물의 근권인 40cm 깊이($m=0.6$)까지 10일($t=10$)이내에 떨어지게 하려면

$$S^2 = \pi \times \left[\frac{K \times t \times (d + m_0/2)}{f \times \ln(4/\pi)(m_0/2)} \right] \quad 7-27$$

$$S = 7.41(\text{m})$$

이다. 이 방법에 따르면 포화수리전도도가 분산되고 압밀되어 0.008m/day일 때 S는 5.3m이고, 토양의 분산이 방지되어 포화수리전도도가 0.03m/day를 보일 때 10.31m가 된다. 일반 밭토양으로 개량되어 포화수리전도도가 세사양토의 범위인 0.24 - 1.52m/day를 보일 때에는 S가 29.3 - 51.8m가 된다.

이상의 계산에서 가장 나쁜 조건으로 포장이 유지되는 경우 암거배수구의 간격은 5 ~ 7m이어야 하며, 토양의 분산을 막아 좋은 조건으로 유지될 수 있을 때의 배수간격은 10 ~ 25m가 적당하다(류 등, 1994)

3) 지하수위에 따른 염수의 상승 가능성 검토

지하수위가 높은 상태에서 일 평균 증발량이 0.4cm일 때 하절기 120일 동안 물의 하향 이동 없이 지표에서 증발이 일어날 경우 정상류 지하수 상승(q_{max})는 다음과 같다(Hillel, 1982). 즉,

$$q_{max} = \frac{Aa}{d^n} \quad 7-28$$

이며,

여기서 d는 지표로부터 지하 수위 깊이이며, a, n은 $K(\Psi) = a(\Psi^n + b)^{-1}$ 의 상수이다.

$$A a = 4.88\text{cm}^2/\text{sec}, \quad n = 3$$

인 양질 사토에 대하여 증발이 정상류 조건으로 일어날 수 있는 지하수 깊이는

$$d = \left(\frac{Aa}{q_{max}} \right)^{1/n} \quad 7-29$$

이다. 즉,

$$d = \left[\frac{4.88\text{cm}^2/\text{sec}}{(0.4\text{cm}/\text{day})/(86400\text{sec}/\text{day})} \right]^{1/3} \\ = 101.8\text{cm}$$

이다. 이 깊이에 지하수가 정체가 되어 하절기 120일간 끊임없이 120일간 정상류 속도로 증발되면, 염의 확산 이동이 무시될 때, 염수의 상승고는

$$0.4\text{cm}/\text{day} \times 120\text{day} = 48\text{cm}$$

이다. 즉, 이러한 토양에서 지하수위가 토양 표면에서 1m이내에 존재하게 되면 염수의 상승에 의하여 재염화가 가능하며, 여름 기간 120일간 최소한 48cm의 관개수 또는 빗물이

토양을 통과하여 배수되어야 원활한 제염이 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 조건의 간척지에서는 염수의 상승을 억제하기 위하여 배수시설이 필요하다.

제 7절 염류도에 대한 작물의 내염성과 재배 관리

1. 작물의 내염성

모든 작물이 염에 대해 똑같이 반응하지는 않는다. 어떤 작물은 다른 작물 보다 높은 염류도에서 만족할 만한 수량을 얻을 수 있다. 그림 7-13은 작물의 상대수량에 의한 내염성을 구분한 것이다. 어떤 작물이 내염성을 나타내는 근본적인 이유는 염류도가 높은 토양에서 물을 흡수할 수 있는 삼투압에 대한 대처 능력을 갖추고 있기 때문이다. 삼투압에 대한 적응 능력은 대단히 유용하다. 염류도가 제어되기 힘들어 일반 작물을 재배할 수 없는 곳에서 대체 작물을 선정할 수 있는지 여부는 바로 작물의 내염성 능력에 따른 것이다.

농작물 사이에서는 내염성 정도가 거의 8배에서 10배 가까운 차이가 있다. 내염성에서의 커다란 차이는 전에는 사용할 수 없었다고 생각해 왔던 염류도가 중인 관개수의 사용이 가능하게 되었다. 이는 또한 관개에 적합한 염류도 범위의 확대에도 기여하였다.

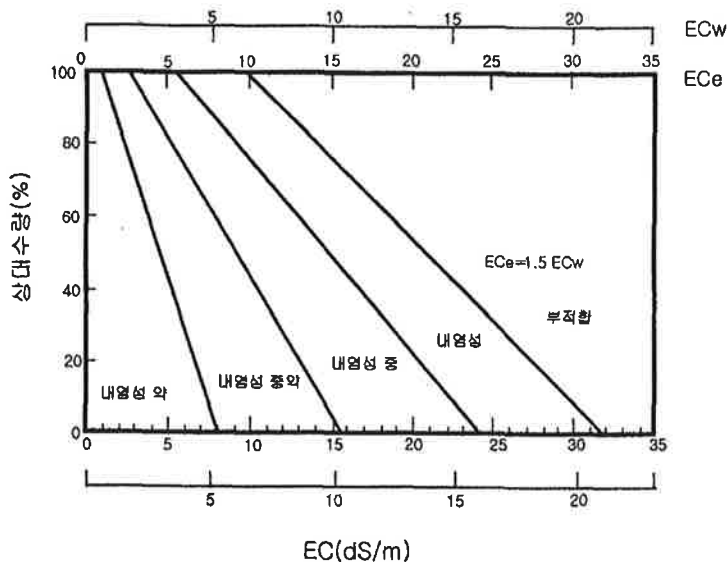


그림 7-13 작물의 상대 수량과 내염성

상대적 작물 내염성 구분은 표 7-11의 지침에서와 같은 “사용 제한” 정도를 나타낸다. 예를 들어, 내염성 염류도가 0.7 dS m^{-1} 이하인 관개수를 사용하였을 때에는 수량 제한이 없다는 것을 보여준다. 이러한 관개수는 사용에 아무런 제한이 없다. $0.7-1 \text{ dSm}^{-1}$ 인 관개수는 염류도가 약함에서 중간 정도의 범위로 구분된 작물의 수량은 거의 제한되지 않지만, 작물이 내염성 기준 이하로 염류도를 유지하기 위해서는 용탈을 등 관개 관리를 세심하게 할 필요가 있다. 염류도가 높은 물과 염해에 민감한 작물에 대해서 용탈을 0.25에서 0.3 그 이상으로 높히는 것은 지나치게 많은 관개수를 요구하게 되기 때문에 실용상 득이 없을 가능성이 있다. 그러한 경우에, 내염성이 큰 작물로 작목을 전환하여, 용탈에 필요한 물의 소요를 줄이는 것이 필요하다. 관개수의 염류도(EC_w)가 염해 약간에서 염해 중 범위로 높아지면, 염해에 약한 작물들의 경제적 재배가 어려워지며, 특히 점토함량이 높은 토양에서 심하다. 관개수의 수질이 사용 제한 심한 2.0 dS m^{-1} 을 초과하면, 그 관개수의 사용은 용탈 요구를 충족시키기 위해 투수와 배수 상태가 좋은 사질토에서 제한된 작물에 한하여 가능하다.

표 11-17의 내염성 자료는 용탈요구량 계산에 활용될 수 있다. 작물의 내염성 구분과 관개수의 염류도를 알며는 그림 7을 활용할 수 있다. 신개간지로 정확한 작부 체계를 알 수 없을 때 용탈 요구량은 그 지역에 적용된 작물 중 내염성이 가장 약한 작물을 대상으로 설정한다. 선호하는 작물의 내염성 한계에 부응하지 못하는 경우, 염에 더 강한 작물로 선택의 폭을 넓혀야 한다. 작물 생산에 관개수의 염류도의 영향이 의문시될 경우, 관개 효과를 검증하고, 경제적 성공성을 전망하기 위한 포장 시험을 반드시 수행하도록 하여야 한다.

2. 내염성 수량 평가

표 11-7에 주어진 값들은 Maas와 Hoffman(1977) 및 Maas(1984)의 자료를 인용한 것이다. 이들 자료는 어떤 작물의 생육이 염해를 받아 생육 속도가 감소되기 시작하는 임계 염류도 이상에서 작물의 생육 속도는 염류도의 증가에 따라서 직선적으로 감소한다는 것을 보여주고 있다. 수량의 직선적 감소는 염류도의 일반적 범위에서 잘 일치하고 있다. 상대 수량이 50 퍼센트 이하로 현저히 낮은 경우 직선에서부터 많이 떨어지게 되며, 이들은 여하튼 경제적 수용성이 없다.

다음 식이 수량 평가를 나타내는데 사용된다.

$$Y = 100 - b \times (EC_e - a) \quad 7-30$$

여기서 Y = 상대수량(%) EC_e = 토양의 포화침출액 전기전도도(dSm^{-1})
 a = 임계 염류도(dSm^{-1})
 b = 염류도 1 증가에 따른 상대 수량 감소율

a 와 b 값은 표 4에서 계산할 수 있다. a 값은 표4의 수량지수 100을 나타내는 EC_e 이다. b 값은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$b = \frac{100}{\text{수량 0\%인 때의 } EC_e - \text{수량 100\%인 때의 } EC_e} \quad 7-31$$

수량 지수가 100이 아니 경우의 EC_e 는 Maas와 Hoffman(1977)의 식에 의하여 계산될 수 있다. 식 10을 다시 쓰면,

$$EC_e = \frac{100 + ab - Y}{b} \quad 7-32$$

이며, 여기서 EC_e 는 정해진 수량 지수에 대한 토양 염류도이다.

표 7-17의 값은 수량 지수 100, 90, 75, 50, 그리고 0에 대한 것들이다. 이 표에는 토양 염류도에 상응하는 관개수의 EC_w 에 대한 자료도 함께 수록되어 있다. 토양 염류도에 대한 관개수의 염류도 인자 1.5는 용탈 계수 15-20 퍼센트를 기준으로 한 것이다. 이 값은 지침과 표 3의 다른 용탈 계수에 대한 농도 인자도 같은 기준으로 산정된 것이다. 표 4의 관개수에 대한 내염성 한계는 토양 염류도(EC_e)의 원인이 관개수에서 오는 것을 기준으로 하였다. 염류도의 원인이 높은 지하수위와 같은 관개수 이외에서 오는 것이라면, 관개수와 토양의 염류도 관계는 적용되기 어렵지만, 토양의 염류도 EC_e 는 적용 가능하다. 여기서 다시 강조해둘 점은 관개수의 계속된 사용 후 이루어질 토양 염류도(EC_e)는 관개수의 염으로부터 온다는 것이다. 지하수위가 있다면, 이는 $EC_e = 1.5 \times EC_w$ 에 고려되어 있지 않은 추가적인 염이다.

표 7-17 여러 작물의 상대 수량 평가

일반 곡류 작물	100%		90%		75%		50%		0% "maximum"	
	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw
Barley (<i>Hordeum vulgare</i>) ⁴	8.0	5.3	10	6.7	13	8.7	18	12	28	19
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	7.7	5.1	9.6	6.4	13	8.4	17	12	27	18
Sugarbeet (<i>Beta vulgaris</i>)	7.0	4.7	8.7	5.8	11	7.5	15	10	24	16
Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>)	6.8	4.5	7.4	5.0	8.4	5.6	9.9	6.7	13	8.7
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13	8.7	20	13
Wheat,durum (<i>Triticum turgidum</i>)	5.7	3.8	7.6	5.0	10	6.9	15	10	24	16
Soybean (<i>Glycine max</i>)	5.0	3.3	5.5	3.7	6.3	4.2	7.5	5.0	10	6.7
Cowpea (<i>Vigna unguiculata</i>)	4.9	3.3	5.7	3.8	7.0	4.7	9.1	6.0	13	8.8
Groundnut(Peanut) (<i>Arachis hypogaea</i>)	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.6	4.4
Rice(paddy) (<i>Oriza sativa</i>)	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11	7.6
Sufarcane (<i>Saccharum officinarum</i>)	1.7	1.1	3.4	2.3	5.9	4.0	10	6.8	19	12
Corn(maize) (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Flax (<i>Linum usitatissimum</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Broadbean (<i>Vicia fabal</i>)	1.5	1.1	2.6	1.8	4.2	2.0	6.8	4.5	12	8.0
Bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
채소 작물										
Squash, zucchini(courgette) (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	4.7	4.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10
Beet, red (<i>Beta vulgaris</i>) ⁵	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
Squash, scallop (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	3.2	2.1	3.8	2.6	4.8	3.2	6.3	4.2	9.4	6.3
Broccoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
Cucumber (<i>Cucumis sativus</i>)	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
Spinach (<i>Spinacia oleracea</i>)	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10
Celery (<i>Apium graveolens</i>)	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
Cabbage (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
Potato (<i>Solanum tucerosum</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.7	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Corn, sweet(maize) (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Sweet potato (<i>Impomoea batatas</i>)	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
Pepper (<i>Capsicum annum</i>)	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
Radish (<i>Raphanus sativus</i>)	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
Onion (<i>Allium cepa</i>)	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
Carrot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
Bean (<i>Brassica rapa</i>)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
Turnip (<i>Brassica rapa</i>)	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12	8.0

*FAO(1985)

사료 작물	100%		90%		75%		50%		0% "maximum"	
	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw
Wheatgrass, tail (<i>Agropyron elongatum</i>)	7.5	5.0	9.9	6.6	13	9.0	19	13	31	21
Wheatgrass, fairway crested (<i>Agropyron cristatum</i>)	7.5	7.5	9.0	6.0	11	7.4	15	9.8	22	15
Bermuda grass (<i>Cynodon dactylon</i>)	6.9	4.6	8.5	5.6	11	7.2	15	9.8	23	15
Barley(forage) (<i>Hordeum vulgare</i>)	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13	8.7	20	13
Ryegrass,perennial(<i>Lolium perenne</i>)	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12	8.1	19	13
Trefoil, narrowleaf birdsfoot (<i>Lotus corniculatus tenuifolium</i>)	5.0	3.3	6.0	4.0	7.5	5.0	10	6.7	15	10
Harding grass (<i>Phalaris tuberosa</i>)	4.6	3.1	5.9	3.9	7.9	5.3	11	7.4	18	12
Fescue, tall (<i>Festuca elatior</i>)	3.9	2.6	5.5	3.6	7.8	5.2	12	7.8	20	13
Wheatgrass, standard crested (<i>Agropyron sibiricum</i>)	3.9	2.3	6.0	4.0	9.8	6.5	16	11	28	19
Vetch, common (<i>Vicia unguiculata</i>)	3.0	2.0	3.9	2.6	5.3	3.5	7.6	5.0	12	8.1
Sudan grass (<i>Sorghum sudanense</i>)	2.8	1.0	5.1	3.4	8.6	5.7	14	9.6	26	17
Wildrye, beardless (<i>Elymus triticoides</i>)	2.7	1.8	4.4	2.9	6.9	4.6	11	7.4	19	13
Cowpea(forage)(<i>Vigna unguiculata</i>)	2.5	1.7	3.4	2.3	4.8	3.2	7.1	4.8	12	7.8
Trefoil, big (<i>Lotus uliginosus</i>)	2.3	1.5	2.8	1.9	3.6	2.4	4.9	3.3	7.6	5.0
Sesbania (<i>Sesbania exaltata</i>)	2.3	1.5	3.7	2.5	5.9	3.9	9.4	6.3	17	11
Sphaerophysa (<i>Sphaerophysa salsula</i>)	2.2	1.5	3.6	2.4	5.8	3.8	9.3	6.2	16	11
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16	10
Lovegrass (<i>Eragrostis sp.</i>)	2.0	1.3	3.2	2.1	5.0	3.3	8.0	5.3	14	9.3
Corn(forage) (maize) (<i>Zea mays</i>)	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	15	10
Clover, berseem (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	1.5	1.0	3.2	2.2	5.9	3.9	10	6.8	19	13
Orchard grass (<i>Dactylis glomerata</i>)	1.5	1.0	3.1	2.1	5.5	3.7	9.6	6.4	18	12
Foxtail, meadow (<i>Alopecurus pratensis</i>)	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
Clover, red (<i>Trifolium pratense</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Clover, alsike (<i>Trifolium hybridum</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Clover, ladino (<i>Trifolium repens</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Clover, strawberry (<i>Trifolium fragiferum</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6

*FAO(1985)

과수 작물	100%		90%		75%		50%		0% "maximum"	
	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw
Date palm (<i>Phoenix dactylifera</i>)	4.0	2.7	6.8	4.5	11	7.3	18	12	32	21
Grapefruit (<i>Citrus paradisi</i>)	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0	5.4
Orange (<i>Citrus sinensis</i>)	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0	5.3
Peach (<i>Prunus persica</i>)	1.7	1.1	2.2	1.5	2.9	1.9	4.1	2.7	6.5	4.3
Apricot (<i>Prunus armniaca</i>)	1.6	1.1	2.0	1.3	2.6	1.8	3.7	2.5	5.8	3.8
Grape (<i>Vitus sp.</i>)	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
Almond (<i>Prunus dulcis</i>)	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.8	6.8	4.5
Plum, prune (<i>Prunus domestica</i>)	1.5	1.0	2.1	1.4	2.9	1.9	4.3	2.9	7.1	4.7
Blackberry (<i>Rubus sp.</i>)	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Boysenberry (<i>Rubus ursinus</i>)	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Strawberry (<i>Fragaria sp.</i>)	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4.0	2.7
*FAO(1985)										

<u>Fruit and Nut Crops</u>		Rye (forage)	<i>Secale cereale</i>
Pomegranate	<i>Punica granatum</i>	Sesbania	<i>Sesbania exaltata</i>
내염성 중약(Moderately sensitive)		Siratro	<i>Macroptilium atropurpureum</i>
		Sphaerophysa	<i>Sphaerophysa salsula</i>
<u>Fibre, Seed and Sugar Crops</u>		Timothy	<i>Phleum pratense</i>
Broadbean	<i>Vicia faba</i>	Trefoil, big	<i>Lotus uliginosus</i>
Castorbean	<i>Ricinus cmmunis</i>	Vetch, common	<i>Vicia angustiflia</i>
Maize	<i>Zea mays</i>	<u>Vegetable Crops</u>	
Flax	<i>Linum usitatissimum</i>	Broccoli	<i>Brassica oleracea botrytis</i>
Millet, foxtail	<i>Setaria italica</i>	Brussels sprouts	<i>B.oleracea gemmifera</i>
Groundnut/Peanut	<i>Arachis hypogaea</i>	Cabbage	<i>B.oleracea capitata</i>
Rice, paddy	<i>Oryza sativa</i>	Cluliflower	<i>B.oleracea botrytis</i>
Sugarcane	<i>Saxxarum officinamum</i>	Celery	<i>Apium graveolens</i>
Sunflower	<i>Helianthus annuus</i>	Corn, sweet	<i>Zea mays</i>
<u>Grasses and Forage Crops</u>		Cucumber	<i>Cucumis sativus</i>
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>	Eggplant	<i>Splanum melongena esculentum</i>
Bentgrass	<i>Agrostis stolonifera palustris</i>	Kale	<i>Brassica oleracea acephala</i>
Bluestem, Angleton	<i>Dichanthium dristatum</i>	Kohlrabi	<i>B.oleracea gongylode</i>
Brome, smooth	<i>Bromus inermis</i>	Lettuce	<i>Latuca sativa</i>
Buffelgrass	<i>Cenchrus ciliaris</i>	Muskmelon	<i>Cucumis melo</i>
Burnet	<i>Poterium sanguisorba</i>	Pepper	<i>Capsicum annum</i>
Clover, alsike	<i>Trifolium hydridum</i>	Potato	<i>Solanum tuberosum</i>
Clover, Berseem	<i>Trifolium alexandrinum</i>	Pumpkin	<i>Cucurbita peop pepo</i>
Clover, ldino	<i>Trifolium repens</i>	Radish	<i>Raphanus sativus</i>
Clover, red	<i>Trifolium pratense</i>	Spinach	<i>Spinacia oleracea</i>
Clover, strawberry	<i>Trifolium fragiferum</i>	Squash, scallop	<i>Cucurita pepo melopep</i>
Clover, White Dutch	<i>Trifolium repens</i>	Sweet potato	<i>Ipomoea batatas</i>
Corn(forage)(maiza)	<i>Zea mays</i>	Tomato	<i>Lycopersicon lycopersicum</i>
Cowpea(forage)	<i>Vigna unguiculata</i>	Turnip	<i>Brassica rapa</i>
Dallis grass	<i>Paspalum dilatatum</i>	watermelon	<i>Citrullus lanatus</i>
Foxtail, meadow	<i>Alopecurus pratensis</i>	<u>Fruit and Nut Crops</u>	
Grama, blue	<i>Bouteloua gracilis</i>	Grape	<i>Vitis sp.</i>
Lovegrass	<i>Eragrostis sp.</i>		
Milkvetch, Cicer	<i>Astragalus cicer</i>		
Oatgrass, tall	<i>Arrhenatherum, Danthonia</i>		
Oats (forage)	<i>Avena sativa</i>		
<u>Grasses and Forage Crops</u>			
Orchard grass	<i>Dactylis glomerata</i>		

*FAO(1985)

내염성 약(Sensitive)			
		Currant	<i>Pibes sp.</i>
		Gooseberry	<i>Ribes sp.</i>
<u>Fibre, Seed and Sugar Crops</u>		Grapefruit	<i>Citrus paraaisi</i>
Bean	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Lemon	<i>Citrus limon</i>
Guayule	<i>Parthenium argentatum</i>	Lime	<i>Citrus aranciifolia</i>
Sesame	<i>Sesamum indicum</i>	Loquat	<i>Eriobotrya japonica</i>
<u>Vegetable Crops</u>		Mango	<i>Mangifera indica</i>
Bean	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Orange	<i>Citrus sinensis</i>
Carrot	<i>Daucus carota</i>	Passion fruit	<i>Passiflora edulis</i>
Okra	<i>Abelmoschus esculentus</i>	Peach	<i>Prunus persica</i>
Ooion	<i>Allium cepa</i>	Pear	<i>Pyrus communis</i>
Parsnip	<i>Pastiraca saviva</i>	Persimmon	<i>Diospyros virginiana</i>
<u>Fruit and Nut Crops</u>		Plum: Prume	<i>Prunus domesvica</i>
Almond	<i>Prunus iulcis</i>	Pummelo	<i>Citrus maxima</i>
Apple	<i>Malus sylvestris</i>	Raspberry	<i>Rubus idaeus</i>
Apricot	<i>Prunus armeniaca</i>	Rose apple	<i>Syzygium jambcs</i>
Avocado	<i>Persea americana</i>	Sapote, white	<i>Casimirca edulis</i>
Blackberry	<i>Ruicus sp.</i>	Strawberry	<i>Fragaria sp.</i>
Boysenberry	<i>Rubus ursinus</i>	Tangerine	<i>Citrus reticulata</i>
Cherimoya	<i>Annona cherimola</i>		
Cherry, sweet	<i>Prunus avium</i>		
Cherry, sand	<i>Prunus besseyi</i>		

*FAO(1985)

3. 내염성에 미치는 요인

특정한 관개수를 사용함에 따른 작물의 수량 지수는 100에서 0이지만, 때로는 생산성 제한 요인이 관개수 이외의 원인에 있을 수 있다. 표 4의 내염성 값은 염류도가 생산성 제한 요인일 때에 한한 것이다. 그러나, 실제에 있어서 염류도 이외에도 생산성 제한 요인이 있는 경우가 있다.

토양 염류도 내염성은 주로 활착 후 성숙기까지의 작물에 대해 적용되는 것이다. 발아기와 어린 작물에 대한 것은 다를 수 있다. 표 7은 수량 또는 발아가 50 퍼센트 감소하는 염류도를 보여준다. 일반적으로, 과중된 표토의 염류도가 4 dSm⁻¹ 이상이면, 발아와 어린 자물의 생육을 제한하거나 지연시킨다. 이는 발아가 출아를 지연시키며, 토양의 피각 형성과 병해 등 여러 가지 요인이 작물의 입모를 저해한다. 강수 또는 재배 전 관수는 염류도를 낮게 유지하여, 피각 형성을 지연시키고 출아를 돕는다.

나무 뿌리 특성의 이용은 과수의 염해 방지에 도움을 준다. 나무 뿌리 특성의 효과는

염, 특히 나트륨과 염소의 배제 능력이 뿌리 종류에 따라 다르다. 토양과 물의 염류도 조건에서 나무 뿌리의 염배제 특성의 선택은 품종의 선택과 함께 경제성을 높이기 위한 방법의 하나이다.

품종적 차이는 일년생 작물에도 있다. 내염성에서 가장 큰 차이는 보다 염에 강한 작물의 품종 선택에 있다. 작물에 따라서 표17-8에 있는 내염성 지침보다 품종간의 내염성 차이가 큰 것이 있다. 관개수의 염류도가 내염성 한계에 있다면, 가능한 품종의 세심한 선택이 중요하다.

내염성 작물의 육종과 선발이 본격적으로 이루어지기 시작한 것은 최근의 일이다. 초기 임에도 그 전망은 밝으며, 품종 내에서도 내염성이 큰 것을 선발 할 수 있다. 작물의 육종에는 긴 기간이 요구되어 수년에서 십수년이 소요되기 마련이다. 참을성 있게 체계적으로 접근하여야 한다.

기후도 염류도와 한발에 대한 작물의 저항성에 영향을 준다. 일반적으로, 한냉한 지역 또는 기간에는 덥고 건조한 지역 또는 기간 보다 내염성이 강하다. 한냉한 기후 하에서는 증발산 등에 의한 물 요구량이 적으므로, 염류도에 의한 물 유효도 감소는 적으며, 강수에 의하여 집적된 염이 용탈되는 비율이 높아진다. 반대로, 덥고 건조한 여름과 같이 증발산 요구량이 많은 시기에는 토양 수분의 급속한 소모로 인하여 물 부족 현상이 생기며, 근권 내 염이 농축되어 염해를 받는다. 이러한 조건에서, 작물은 일반적으로 예측되는 것보다 빨리 염해 증상을 보인다. 내염성이 약한 작물일수록 기후의 영향을 크게 받는다.

시비는 내염성에 대한 영향이 비교적 적다. 토양 비옥도가 생산성 제한 용인이라면, 알맞는 시비에 의하여 수량이 증대되지만, 비옥도가 제한 요인이 아닌 상태에서 시비는 내염성 개선에 큰 도움을 주지 않는다. 비료 성분 중에는 수용성인 것이 많으므로, 시비 시기와 시비 위치가 중요하다. 적절히 사용하지 않으면, 염류도 문제를 가중시킨다.

4. 염류토에서 작물 재배와 토양 관리 방법

염류도를 제어하는 기초 관리 방법이 앞에서 언급된 바 있듯이, 적절한 배수, 작물의 내염성 범위 이내로 염의 제어, 또는 이들이 어려울 때에는 염류도 제어를 위한 용탈에 필요한 물이 적게 요구되는 내염성 작물로 전환하는 것이 필요하다. 이러한 관리 방법은 장기적 염 제어에 아주 적절하지만, 발아나 초기 어린 작물체의 생육기에는 이와 별개로 뚜렷한 효과가 있는 방법이 있다. 수량이 낮은 이유가 발아기에 영향을 크게 받아 어린 작물의 입모가 불량해지는 데 큰 원인이 있다. 관개수의 염류도가 높을수록, 이 시기의 작물 관리가 대단히 중요하다. 지균 작업을 통해 물 공급을 균일하게 하고, 적절한 시기에 알맞는 물 공급 체계를 갖추어, 토양 피각 형성과 수분 스트레스를 막고, 염 집적이 진행되는 곳에서의 재배를 피하며, 비료의 종류와 시용 시기를 잘 선택하는 것도 중요한 대책이다.

가. 지균 작업

토양이 지균되어 공급된 물이 고르게 분포되지 않으면 염 제어가 어려워진다. 물의 침투가 어려워 용탈되지 않고 물이 다른 곳으로 빠지면, 염류도가 높은 곳이 형성된다. 물이 몰리는 곳에서 오랜 동안 괴어 있으면, 투수 불량 문제가 생긴다. 높은 지점에서 물 부족과 염집적으로 발아가 불량한 경우가 많으며, 물이 괴거나, 피각이 형성된 곳에서 작물의 입모가 불량한 경우가 많다. 지균상 가장 어려운 문제는 담수 관개시 발생한다. 스프링클러나 점적 관개의 경우에는 괴잉의 물이 고이는 낮은 곳에 제한적으로 발생한다.

지균 작업은 토양 표면을 평탄하게 고름으로써 관개수가 포장 전체에 골고루 배분될 수 있도록 하는 것이 주목적이며, 토목에서 균형 작업과는 다르다.

나. 관개 시기

수분 스트레스를 방지하기 위한 관개 시기 선택은 염농도가 높은 관개수를 사용할 때 성공 가능성을 높인다. 관개 시기는 관개 횟수를 늘이는 것을 포함하며, 재배전 관개 또는 발아기 관개 등을 포함한다. 관개 시기의 목적은 염류도를 낮추고, 관개 사이의 수분 스트레스를 피하기 위한 것이다.

관개 사이의 수분 스트레스는 관개 횟수를 늘여 관개 간격을 좁힘으로서 해소할 수 있다. 관개 간격이 좁아지면 작물의 토양 수분 이용이 쉬워진다.

좁은 관개 간격이 항상 바람직한 결과를 가져오는 것은 아니다. 예를 들어, 고랑 관개와 다른 담수 관개법에 있어서, 잦은 관개로의 전환은 관개 깊이가 너무 깊어질 수 있고, 관개 효율이 떨어질 가능성이 있다. 이 때, 배수 문제가 발생할 수 있다. 이러한 관개 방법은 관개 깊이를 쉽게 조절하기 어렵기 때문에 비효율적이다.

합리적인 관개 간격을 위해 작물의 물 요구 양상에 대한 정확한 지식이 있어야 한다. 작물의 물소모량 산정에는 증발산량 추정법이 이용된다. 대표적인 방법으로, Penman법, Blaney Criddle법, Thornswaite법 등이 있다.

염 농도가 높은 관개수에서 오는 염은 증발에 따라서 토양의 표면 수 cm 깊이에 집적하게 된다. 특히 지하수위가 높고, 기후가 덥고 건조하면 심하다. 집적 면적은 관개수와 지하수위 양쪽 모두의 염류도에 의하여 영향을 받는다. 이러한 조건에서, 작물의 발아, 어린 작물의 생육 그리고 나아가서 수량은 크게 감소될 수 있다. 이들 표면 집적 염을 제거하기 위해 재배 전 용탈 관개가 실시된다.

표토의 염을 제거하는 데 겨울 기간 동안 강수량이 부족한 경우, 관개를 미리 하여 부족한 토양 수분을 채워 두면, 겨울 기간 동안의 강수는 용탈에 이용될 수 있다. 겨울 동안의 강수는 수질이 매우 좋은 물로서, 용탈 효율이 높다.

염류도가 중 또는 그 이상인 관개수($EC_w > 1.0 \text{ dSm}^{-1}$)를 사용하는 경우, 발아 불량 가능성이 있다. 특히 고랑 관개하는 경우, 파종된 이랑으로 물을 따라 염이 이동해 집적하기 때문이다. 상추, 토마토 등 경제 작물 재배에 스프링클러를 많이 사용하는 데, 이 방법은

염류의 피해를 줄이는 데 고랑 관개보다 효과적이다. 발아를 돕기 위해서는 적은 양의 물을 자주 관개하는 것이 바람직하며, 발아가 될 때까지 계속 하여야 한다. 토양 표면이 마르면, 피각이 형성되어 발아를 저해한다.

관개수의 나트륨과 염소 함량이 3 mmolL^{-1} 이상으로 많으면, 스프링클러 관개가 작물에 해로울 수 있다. 왜냐하면, 스프링클러 헤드에 농축된 염이 작물의 잎에 묻게 되어, 염해를 일으키기 때문이다. 이러한 문제는 회전이 느린 스프링클러에서 심하다.

다. 파종 위치

염류도가 높으면, 작물의 발아율이 크게 감소되거나, 발아가 늦어진다. 이 때문에 염류도에 파종되거나, 염류도가 높은 관개수를 사용할 때, 이랑에서의 입모율 확보가 어려워지는 경우가 많다. 입모율 확보를 위해 정상적인 파종량 보다 2~3배 파종하는 농가가 있다. 파종량이 많으면, 작물의 입모율은 높아지지만, 적절한 재식 밀도를 유지하기 위해, 나중에 솎아주기를 해야 하는 추가 부담이 있다. 또한 발아가 불균일하여, 관리가 어려워진다. 다른 대안으로, 발아되는 종자가 있는 위치 부근의 염류도가 발아에 알맞도록 낮은 수준으로 유지할 수 있게 파종 방법을 잘 선택하는 것이 바람직하다. 묘상의 형태, 파종 위치 및 관개 방법 등을 조절하는 것이 발아 및 출아율을 높히는 데 필요하다.

휴립 포장에서 고랑 관개를 할 때, 물이 고랑 양쪽에서 묘대로 젖어들어 간다(그림 12A). 관개수의 염도 물의 이동을 따라서 함께 이동하게 되므로, 염이 고랑의 중앙에 몰리게 된다. 묘대 중앙에 파종을 하면, 바로 염이 집적하는 장소에 파종한 형태가 된다. 묘대의 폭을 넓혀 염이 집적하는 부위를 피하여 파종하면, 도움이 된다. 휴폭을 넓혀 D에서와 같이 휴의 중앙을 피해 양 쪽에 파종하여 재배하는 것이 하나의 대안이 될 수 있다.

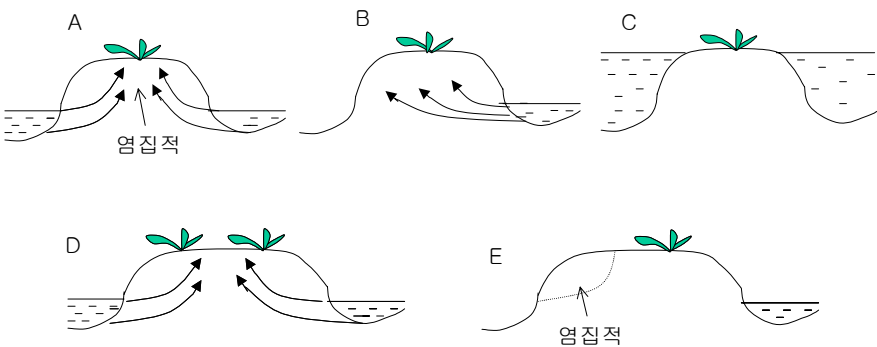


그림 7-14 토양과 관개수의 염류 영향을 줄이기 위한 휴립 재배

관개시 B와 같이 고랑 하나씩 건너 뛰어 물을 대는 것도 하나의 대안이 된다. 토양의 염류도 문제가 클 경우, 휴폭을 넓혀 한 쪽에 치우쳐 재배하는 방법(E)으로 토양 염류의

영향을 피할 수 있다. 또한 물이 풍부하고, 배수에 문제가 없는 경우 C에서와 같이 물을 깊게 대는 것도 염류의 영향을 줄이는 방법이다.

휴의 모양을 경사면으로 형성하는 것도 염류의 영향을 줄일 수 있는 방법의 하나이다 (그림 7-15).

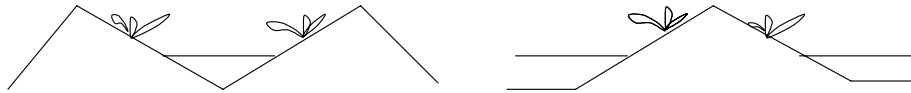


그림 7-15 경사 휴립에 의한 염류 영향 경감

라. 시비

비료, 퇴비, 토양 개량제 등은 고농도로 수용성 염을 함유하고 있는 것이 많다. 과중된 종자나 어린 싹에 너무 가까우면 발아와 어린 싹의 생육에 영향을 줄 수 있다. 이들 비료와 토양 개량제 등을 잘못 사용하면 염류의 피해를 가중시킨다. 퇴비일지라도, 염류를 다량 함유하고 있으면, 염류해를 유발 할 수 있다. 예를 들어, 1 ha의 밭에 50 kg의 질소가 골고루 뿌려지면, 염해를 일으키지 않지만, 비료가 과중된 종자가 있는 위치에 몰리면, 비료 성분에 의한 염해를 받을 수 있다. 또한 질소 함량 1%인 돈분 퇴비 5 톤을 잘못 사용해서 퇴비 덩어리가 종자가 있는 곳에 몰리면, 염해를 가중시킬 수 있다.

그러므로, 시비에는 시기 뿐 아니라 시용 위치에도 세심한 주의를 기울여야 한다. 특히 어린 싹은 염에 약하며, 비료 성분을 많이 요구하지 않는다. 적은 양의 비료를 과중 전에 기비로 주고, 출아한 다음 너무 크기 전에 나머지를 추비로 주는 것이 바람직하다. 비료의 염류지수를 고려하여 시비하는 것도 필요하다. 염류 지수가 낮으면, 그만큼 염해의 우려도 적어진다. 표 9는 몇가지 비료의 종류에 따른 염류 지수이다.

표 7-19. 토양 용액에 대한 비료의 종류별 상대적 염류 지수

비료	염류지수
질산나트륨(Sodium nitrate)	100
무수암모니아(Anhydrous ammonia)	47.1
질산암모늄(Ammonium nitrate)	104.7
황산암모늄(Ammonium sulfate)	69.0
농용석회(Lime stone)	4.7
과석(Super phosphate 20%)	7.8
염화칼륨(Potassium chloride, 63%)	114.3
요소(Urea)	75.4
염화나트륨(Sodium chloride, NaCl)	153.8

마. 지균 정비

관개된 물이 균일하게 분포될 수 있도록 토양이 평탄화 되어 있지 않으면, 염류도의 제어기가 어렵다. 불균일한 자연 지면을 균일하게 다듬고, 구획을 만들어 정비해야 토양과 물의 관리가 용이하다. 이러한 작업이 지균 정비이다. 지균 정비에 투입되는 중장비에 의하여 토양이 압밀되면, 물의 침투와 용탈이 불균일해질 뿐 아니라, 작물의 뿌리 뻗음도 방해한다. 그러므로, 지균 작업 후 치슬 또는 심경으로 압밀된 토양을 깨주어 물리성을 개량해야 한다.

바. 지하 배수 개선

지하 배수 문제와 천층 지하 수위 문제는 염류도 관리에 있어서 매우 복잡하고 어려운 문제이다. 천층 지하 수위는 지면 부근의 점토층이나 경반층 등 투수속도가 매우 느린 층이 존재하는 경우에 생기거나, 배수수의 배출이 없을 때 생긴다. 전자는 농지 현장 상태에 따른 적합한 배수 개선으로 해결해야 하며, 후자는 배수 구역의 구조적 문제로 다루어져야 한다. 천층 지하 수위와 관련된 염류도를 효과적으로 제어하기 위해서는 첫째로 지하 수위를 낮추어야 하며, 수질을 개선해야 한다.

신개간지를 이용하고자 할 때, 배수 문제가 최우선적으로 고려되어야 하며, 장기적인 면에서 영농의 성공과 실패를 좌우한다. 일단 배수 문제가 제기되면, 즉각적인 개선 대책이 마련되어야 하며, 미래의 관리 대책도 함께 마련되어야 한다. 적절한 배수 개선이 이루어지면, 표토의 염류 문제는 관개 관리로 제어할 수 있다.

사. 심경

토양과 수질의 개량, 관개수의 혼용 등은 물의 화학 특성 변화를 통한 개량인데, 물리적 개량 방법은 기계적 방법을 통한 토양의 개량이다. 가장 흔히 사용되는 물리적 방법은 경운과 심경이다. 이들은 모두 효과적이지만, 그 효과의 지속이 짧아 물의 침투 문제 해결에 임시적인 방법이다.

경운은 작물의 파종을 위한 경운과 작물 재배 기간 중간에 하는 중경이 있다. 중경은 물의 침투성 개선 목적보다는 주로 잡초를 제거하거나, 통기 개선을 목적으로 한다. 침투 문제가 심한 경우에 경운은 토양의 피각을 파괴하여 침투율 개선에 도움을 준다. 그러나, 너무 자주하게 되면, 중장비의 잦은 사용에 의한 압밀과 토양 입단의 파괴로 역효과가 나는 수도 있다.

다층 구조 토양은 효과적인 관개에 어려움을 준다. 경반층은 염류도 제어에 필요한 물의 투과를 방해하며, 식물 뿌리의 신장을 방해한다. 이 층을 깨어 주어야 용탈에 필요한 물이 투과되고 뿌리가 뻗는다. 치슬이나 심토 파쇄 등 심경 방법은 토양의 물리성 개선에 효과적이다. 이들 방법 역시, 임시적이며, 영구적인 개량 방법은 아니다. 그 효과는 단기적으로 1-5년 지속된다. 심경은 특히 경반 층이 있는 토양 단면을 물리적으로 파쇄하여, 침투율을 높이고, 작물의 뿌리 뻗음을 돕는다. 두더지 압거기를 이용한 물리성 개선 효과도 가능하

다. 심경은 토양이 건조한 상태에서 실시해야 효과적이며, 점토가 많은 토양에서 습한 상태에서의 심경은 압밀을 가중시켜 물리성을 악화시키는 경우도 있으므로, 유의하여야 한다.

심토 반전 경운이 필요한 경우도 있다.

아. 개간과 용탈

염류도가 재배하고자 하는 작물의 내염성을 크게 초과하는 경우, 작물을 재배하기 전에 염류도를 낮추기 위한 본격적인 용탈 작업이 필요하다. 염 집적이 과거의 토양 관리에 의하거나, 천층 지하 수위에 의하거나 또는 관개수위 용탈 요구량 부족에 의한 것 등의 원인에 의해서 일어난다. 어떤 경우이든, 작물의 재배를 위해서, 표토 30 cm인 상층 근권의 염류도가 작물을 재배하기 전에 작물의 내염성 기준 이하로 염류도가 낮아져야 한다. 상층 근권의 염류도가 10-12 dSm⁻¹ 이하인 경우에는 10-20 cm의 재배전 관개로 내염성 중 또는 강한 작물의 재배가 가능하다. 토양의 염류도가 그 이상이면, 내염성이 강한 보리 등에서도 재배 전 용탈 관개로는 불충분하며, 용탈 관개가 필요하다.

적절한 개간을 위해 관개되어야 할 물 깊이는 초기 염류도와 용탈 방법과 관계 있다. 염류도가 높을수록, 요구되는 물의 깊이는 크다. 간단 관수는 연속 담수보다 용탈 효율이 높다. 용탈 효율과 관계되는 요인으로 토양 수분 함량을 들 수 있다. 용탈 효율을 높이려면, 느린 속도로 불포화 투수되는 것이 바람직하다. 토양의 대공극 사이로 빠르게 투수되면, 모세관 내의 염이 미처 빠져 나오지 못해 용탈 효율이 낮다, 간단 관수에서 처럼, 때때로 충분히 배수시킨 다음 다시 관수하면, 용탈 효율을 높힐 수 있다. 작은 공극에 갇힌 염의 관수된 단위 물 깊이에 대한 제염 효율은 투수속도가 느릴 때 높다.

개간용 용탈에 필요한 물 깊이를 정확하게 예측하기란 대단히 어려우나, 연속 담수에 대한 지침으로, 용탈시키고자하는 토양의 깊이와 같은 깊이의 물을 관개하면, 초기 염의 70-80%가 제염된다. 예를 들어, 1 m 깊이의 물은 1 m 깊이의 토양의 염을 70-80% 제거할 수 있다. 그림 19는 제염율이 토양의 종류에 따라서 크게 다르다는 것을 보여주고 있다. 그러나, 70-80% 제염율이 일반적인 지침으로 받아들여지고 있다. 간단 담수의 경우, 같은 물량으로 80-90%의 제염율을 보여 상시 담수보다 제염 효율이 높다. 그림 20은 간단 담수의 경우 토양의 종류에 따라 차이가 없음을 보여주고 있다. 그러나, 이 경우 제염에 더 많은 시간을 필요로 한다.

자. 유기물 잔재

포장에 남아 있는 작물의 잔재 또는 다른 유기물은 물의 침투를 돕는다. 유기물의 관리는 토양을 개량하는 방법으로 널리 받아들여지고 있다. 유기물의 관리는 경제적 부담이 큰 다른 토양 개량 방법을 사용하기 어려운 소농이 물의 침투를 개선하기 위해 사용할 수 있는 가장 손쉬운 방법이다.

토양에 남은 작물의 잔재물 또는 시용된 유기물은 토양의 물리성을 좋게 한다. 특히 식물의 뿌리는 물의 침투를 도울 뿐 아니라 통기에도 좋은 영향을 준다. 벼짚, 보리짚 호밀짚 등 섬유질이 거친 화분과 작물 잔재물이 토양의 물리성을 개선에 좋다. 쉽게 분해하지 않는 유기물일수록, 토양의 침투율을 개선하는 데 효과가 크다.

침투율 개선을 위한 유기물의 투여량은 많아야 하는데, ha 당 40에서 400MT을 시용한다. 용적으로 표토 15cm의 10에서 30%에 달하는 양을 시용하는 경우도 있다. 이때, 양분 관리가 뒤따라야 한다. 침투율을 개선하기 위하여 유기물을 시용하는 경우에, 유기물이 토양 속으로 잘 혼입되어 들어가도록 해야 원하는 효과를 얻을 수 있다. 왕겨, 톱밥, 분쇄목 등 가용 자원을 대량으로 사용하는 데, 효과성과 사용해야하는 양은 토양의 조건에 따라 다르다. 그러므로, 이들의 시용 여부와 시용량은 현장 검증을 통하여 결정해야 한다.

차. 관개 관리

물의 침투율 문제를 해결하는 데, 물리적 방법과 화학적 방법을 잘 조합하는 것이 가장 효과적인 접근법이라는 것이 수많은 현장 경험을 통하여 얻어진 결론이다. 그러나, 이들은 비교적 광범위하고 지속적인 시간과 노력 그리고 자재의 투자가 이루어져 한다. 소극적으로, 관개 관리를 통한 침투 문제 접근법을 몇 가지 예를 들고자 한다.

① 잦은 관개 : 관개 간격을 짧게 소량씩 관개하면, 침투문제를 피할 수 있다. 왜냐하면, 물의 침투 초기에는 침투속도가 빠르지만, 시간이 지날수록 느려지기 때문이다. 그러나, 관개 가 너무 잦아지면, 토양의 입단 파괴가 더 심해지는 경우가 있어, 유의해야 한다.

②. 재배 전 관개 : 작물의 재배 전 관개로 근권 깊이까지 충분한 물을 공급한다.

iii. 관개 지속시간의 연장 : 물 공급 속도를 느리게 하여 천천히 토양 속으로 젖어들어가게 하여, 침투 문제를 줄일 수 있다. 이 때, 관개 효율을 고려해야 하며, 지표로 흘러나가는 유거수는 받아 재활용할 수 있도록 해야 한다.

③ 관개 체계의 재검토 : 침투율 문제가 큰 곳에서는 관개 체계를 전반적으로 재 검토해야 한다. 스프링클러나 점적 관개 시스템의 도입을 고려할 수 있다. 특히 점질토에는 점적관개가 바람직하다.

참고문헌

- 구자웅, 최진규, 손재권. 1998. 우리 나라 서해안 간척지 및 간석지 토양의 이화학적 특성. 한토비지 31(2):120-127.
- 권순국, 정두호, 한옥동. 1980. 암거배수간격이 배수 및 간척지 제염에 미치는 영향. 농시연보 22(농기, 농가, 농경편).
- 권혁지, 정원일, 조재영. 1983. 간척지의 제염정도에 따른 식생의 변이의 수도 근모형성에 관한 연구. 한작지 28(3):305-309.
- 김규진, 오영래. 1973. 간척지 안전재배 실증 실험. 호남작물시험장 시험연구보고서:323-332.
- 김달수, 조정익, 이영일, 이영구, 이원구. 1969. 수도 간척지 품종개량 및 재배법 개선 시험. 호남작물시험장 시험연구보고서:183-187.
- 김달수, 조정익, 이영일, 이원구. 1967. 간척지 담수 직파 재배시험. 호남작물시험장 시험연구보고서:197-201.
- 김상수, 이선용. 1979. 간척지 육묘방법 시험. 호남작물시험장 시험연구보고서:581-584.
- 김상수, 이선용. 1979. 담수직파재배 현지조사. 호남작물시험장 시험연구보고서:639-643.
- 김상수, 이선용. 1979. 답리작목선정시험. 호남작물시험장 시험연구보고서:651-653.
- 김상수, 이선용. 1979. 간척지 재배법 개선 시험.-답리작물 작목선정 시험. 호남작물 시험장 시험연구보고서:651-653.
- 김성채, 문용식, 이재휴. 1973. 간척년대별 물리화학적 변화에 관한 조사. 전남농촌진흥원 시험연구보고서:447-462.
- 김성채, 정한수. 1971. 간척년대별 물리화학적 변화에 관한 조사. 전남농촌진흥원 시험연구보고서:133-156.
- 김순곤, 장영선, 채상석. 1975. 토양개량제 효과 비교 시험. 전북 농촌진흥원 시험연구보고서:386-392.
- 김연섭, 오왕근, 이성환, 오재섭, 임정남. 1967. 석회질의 제염효과 비교시험. 식물환경연구보고서2:205-227.
- 김원출, 박문희, 황광남, 정병간, 박준규. 1983. 간척지 토양의 석고시용이 질소 회산에 미치는 영향. 농업기술연구소 시험연구보고서:522-532.
- 김정기. 1970. 낙동강 하류 을숙도(염해지 사토)의 토양개량과 적작목 선정에 관한 연구. 동아대 논총11:229-235.

- 김정기. 1974. 을숙도의 염해지 개량과 적작물 선정시험에 관한 연구. 동아대 논총 11:229-235.
- 김호중, 유숙중. 1989. 간척지 발작물 재배시 염분상승 억제 방법. 호남시험장 보고서:746-766.
- 김호중, 이강수, 유숙중. 1988. 간척지 내염성 작물 선택과 발작물 재배시 염분상승 억제 방법 시험. 호남시험장 보고서:523-530.
- 김홍재, 손보균, 봉병길, 김성채, 이돈길. 1982. 간척지 비옥도 조사. 전남 농촌 진흥원 시험 연구보고서:451-455.
- 노승표, 황창주, 나종성외. 1975. 암거배수가 수도 형태형성에 미치는 영향. 농사시험 연구 보고서 17 (작물편):151-159.
- 농어촌진흥공사. 1994. 신간척지 토양개량과 작부체계에 관한 연구.
- 농어촌진흥공사. 1996. 한국의 간척. pp100.
- 농업진흥공사. 1989. 서남해안간척자원조사 토양조사 보고서. 농업진흥공사:PP494.
- 류순호, 이상모. 1988. 간척지 제염과정에서 일어나는 토양의 수리전도도와 유출액의 화학적 특성변화에 관한 실험적 연구. 한토비지21(1):3-10.
- 박천서, 박영선. 1968. 간척지 토양에 대한 각종 개량제의 효과 시험. 농촌진흥청.
- 손희명, 김기준. 1977. 간척지 수도작에 있어서 Zeolite사용 효과에 관한 연구. 한국 작물학회지22(2):37-41.
- 엄대익, 박노풍, 소재돈, 김한명. 1979. 간척답에 있어서 토양개량제의 효과에 관한 연구. 전북대 농대 논문집 13:87-92.
- 오영택, 1976. 간척지 토양 제염촉진에 관한 연구1. 확산에 의한 염분 이동에 관한 연구. 농업기술연구소 시험연구보고서:485-500.
- 오영택, 류순호, 정영상, 홍종운, 박천서, 1976. 담수토양계에서 염분의 1차원 확산. 한토비지 9(1):1-8.
- 오영택, 홍종운, 이정기. 1976. 간척지 토양 제염 촉진에 관한 연구. 농업기술연구소 시험연구보고서:485-580.
- 오영택, 홍종운, 이정기. 1976. 간척지 토양 토양의 화학적 성질 개량에 관한 연구. 농업기술연구소 시험연구보고서:581-586.
- 오영택. 1976. 신간척지의 눈물 교환 시기에 관한 연구. 농업기술연구소 시험연구보고:572-579.

- 이상모. 1987. 간척지 제염과정에서 일어나는 토양의 이화학성 변화에 관한 실험적 연구. 서울대학교 대학원. 석사학위논문:pp50.
- 이선용. 1976. 간척지 생산력 증진 시험.-육묘 방법에 관한 시험. 호남작물시험장 시험연구 보고서:263-270.
- 이성환, 오재섭, 임정남. 1967. CHP에 의한 간척지 토양의 제염 및 이화학 성질개량에 관한 시험 연구. 농화학회지 8:66-74.
- 이용재, 장영선, 홍종운, 황기성. 1979. 간척지에서 시비효율 증대에 관한 연구. 농업기술연구소 시험연구보고서:548-559.
- 이용재, 허범량, 홍종운. 1980. 간척지 토양에서 P, K시용효과. 농업기술연구소 시험연구보고서:318-327.
- 이용재, 황기성, 고봉길, 오영택, 홍종운. 1979. 간척지 토양개량에 관한 연구. 농업기술연구소 시험연구보고서:531-547.
- 이중기. 1978. 간척지 제염에 관한 연구. 한농공지 20(2):67-79.
- 임이규, 정황, 김원출. 1977. 간척지 토양개량제 효과 확인 시험. 경기도 농촌 진흥원 시험연구보고서:515-531.
- 임형빈, 심재욱. 1970. 간척지에서 수도 및 기타작물의 내염성에 관한 연구. 1. 수도품종의 내염성에 관하여. 한국작물학회지 8:47-48.
- 임형빈, 임응규. 1970. 간척지에서 수도 및 기타작물의 내염성에 관한 연구. 8. 염분 간척지에서 직파법과 이앙법에 의한 수도 생육 비교. 한국 식물학회 13(1):1-12.
- 임형빈. 1969. 간척지에서 수도 및 기타작물의 내염성에 관한 연구. 2. 여러가지 염분조건에서 배추와 양배추의 내염성에 관하여. 한국 식물학회지 12(3):8-14.
- 임형빈. 1969. 간척지에서 수도 및 기타작물의 내염성에 관한 연구. 4. 염분 간척지에서 N, P, K의 비효에 관하여. 서울대 논문집(생물계).
- 임형빈. 1970. 간척지에서 수도 및 기타작물의 내염성에 관한 연구. 6. 염분 간척지에서 N, P, K의 증시효과에 대하여. 한토비지 3(1):35-42.
- 임형빈. 1970. 간척지에서 수도 및 기타작물의 내염성에 관한 연구. 7. 염분 간척지에서 수도의 N시비 변동에 따르는 P와 K의 반응에 관하여. 한국식물학회지 13(2):21-31.
- 장영선, 1983. 신간척지에서 인산시비가 수도 생육 및 토양의 이화학적 성질 변화에 미치는 영향. 농시연보 25(토비, 작보,균이, 농가):1-17.

- 장효상, 이종영, 어임수, 최송열. 1983. 간척지 고염답에서 수도안전재배 현지시험. 호남작물 시험장 시험연구보고서:1118-1122.
- 정두호, 김현철, 민경수. 1969. 간척지에서 두더지 암거설치법과 제염효과에 관한 연구. 한 농공지 7(4):29-35.
- 정두호, 김현철. 1970. 간척지 제염에 관한 시험 (Ⅲ). 토양개량제에 의한 제염시험. 한농공 지 12(4):22-27.
- 정두호, 김현철. 1970. 간척지 제염제 관한 (Ⅱ). 개거에 의한 제염 효과 시험. 한농공지 12(3):33-38.
- 정두호, 이기명, 한옥동. 1969. 간척지 제염시험. 담수경운에 의한 제염효과 시험. 시험연구보 고서. 농공이용연구소:26-32.
- 정연태, 엄기태, 신용화. 1976. 우리나라 남해안에 분포된 간척지 토양의 특성에 관한 조사 연구(가포통에 관하여). 한토비지 9(2):101-107.
- 조영길, 조인상, 엄기태. 1992. 신간척지에서 근권의 염농도 저하 방법이 토양특성과 작물 생육에 미치는 영향. 한토비지. 25(2):127-132.
- 최송열, 이종영, 어임수, 장효상, 송정섭. 1983. 염해답에 있어 객토 및 생고지속 효과 시험. 호남작물시험장 시험연구보고서:1132-1145.
- 최송열, 이종영, 어임수, 장효상. 1983. 염해답 석고시용 효과 구명 시험. 호남작물시험장 시 험연구보고서:1161-1170.
- 최송열, 이종영, 어임수, 장효상. 1983. 염해답 암거배수 효과 시험. 호남작물시험장 시험연 구보고서:1146-1160.
- 한규홍, 문석범, 이선용. 1979. 개량제 시용 효과 시험. 호남작물시험장 시험연구보고 서:609-615.
- 한규홍, 문석범, 김상수, 이선용. 1979. 관배수 및 시비방법개선 시험. 호남작물시험장 시험 연구보고서:587-594.
- 한규홍, 이선용, 문석범. 1979. 생고시용에 의한 제염효과 시험. 호남작물시험장 시험연구보 고서:609-616.
- 한규홍, 이선용. 1979. 암거배수시 시비량 및 시비방법시험. 호남작물시험장 시험연구보고 서:595-601.
- 한규홍, 이선용. 1980. 암거배수시 시비량 및 시비방법시험. 호남작물시험장 시험연구보고 서:519-527.

- 한규홍, 장효상, 이선웅. 1979. 암거배수시 개량제 시용효과 시험. 호남작물시험장 시험연구보고서:602-608.
- 한규홍, 장효상, 이선웅. 1980. 암거배수시 개량제 시용효과. 호남작물시험장 시험연구보고서:528-534.
- 한옥동, 정두호, 김현철. 1971. 개거에 의한 제염효과 시험. 농시연보 13(농공. 잠업편):21-26.
- 호남시험장. 2002. 한국의 간척 농업:pp393
- 홍기창. 1963. 주용농작물의 내염성에 관한 연구(제2보). 고려대 농대 논문집2:1-18.
- 황선웅, 윤정희, 황기성, 박양호. 1983. 염류토양에 대한 석고시용효과구명:505-521.
- 황선웅, 이춘수, 이용재, 곽한강, 박내정. 1990. 벚집 및 석고시용이 간척담 직파벼의 초기생육 장애에 미치는 영향.한토비지 23(1).
- Bakhsh, A., D.B. Jaynes, T.S. Colvin, and R.S. Kanwar. 2000. Spatio-temporal analysis of yield variability for a corn-soybean field in Iowa. *Trans. ASAE* 43:31-38
- Borgelt, S.C., R.E. Wieda, and K.A. Sudduth. 1997. Geostatistical analysis of soil chemical properties from nested grids. *Appl. Enger. in Agric.* 13(4):477-483
- Cook, P. G., M. W. Hughs, G. R. Walker, and G. B. Allison. 1989. The calibration of frequency-domain electromagnetic induction meters and their possible use in recharge studies. *J. Hydrol.* 107:251-265.
- Cook, P. G., G. R. Walker, G. Buselli, I. Potts, and A. R. Dodds. 1992. The application of electromagnetic techniques to ground water recharge investigations. *J. Hydrol.* 130:201-229.
- Corwin, D.L., and Rhoades, J.D. 1984. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Sci. Soc. of Am. Proc.* 41:966-971.
- Evans, R. B. 1982. Currently available geophysical methods for use in hazardous waste site investigation. p. 93-115. In F. A. Long and G. E. Schweitzer(ed.) *Risk assessment at hazardous waste sites.* ACS Symp. ser. 204. ACS, Washington, DC.
- FAO. 1985. Water quality for agriculture. 28 Rev.1. FAO/UN:pp174

- Griffin, R. A., J.J. Jurinak. 1973. Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soil extracts. *Soil Science* 137:152-158
- Hayward, H. E. 1953. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, US Salinity Laboratory, USDA. *Agri. Handbook No 60*:pp162 Halvorson, A.D. 1984. Saline seep reclamation in the Northern Great Plains. *Trans ASAE* 27:773-777.
- Hoffman, G. J. 1980. Guidelines for the reclamation of salt affected soils. G. A. O'Conner, ed. *Int. Inter-american Conf. on Salinity and Water Management Technology*, Juarez, Mexico. 11-12 Dec. 1980:49-64
- Janes, D. B. Mapping the areal distribution of soil parameters with Geophysical Techniques. *Application of GIS to the Modeling of Non-Point Source Pollutants in the Vadose Zone*, SSSA Special Publication 48.
- Janes, D. B., J. M. Novak, T. B. Mooreman, and C. A. Cambardella. 1994. Estimating herbicide partition coefficients from electromagnetic induction measurements. *J. Environ. Qual.* 24:36-41.
- Journel, A. G. 1996. Geostatistics: Tools for advanced spatial modelling in GIS. p. 39-55. In D. L. Corwin and K. Loague(ed.) *Application of GIS to modelling of non-point source pollutants in the Vadose Zone*. SSSA Spec. Pub. 48. SSSA, Madison, WI.
- Lesch, S. M., J. D. Rhoades, L. J. Lund, and D. L. Corwin. 1992. Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:540-548.
- Lucius, J. E., G. R. Olhoeft, and S. K. Duke. 1990. *Third Int. Conf. on Ground Penetrating Radar*. Lakewood, CO. 14-18 May 1990. US Geology Surv. Denver, CO.
- McBride, R. A., A. M. Gordon, and S. C. Shrive. 1990. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 290-293.
- McNeill, J. D. 1980. *Electrical conductivity of soils and rocks*. Tech. Note TN-5 Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada.

- Myers, J.C. 1986. Calculation of kirging error for non-rectangular areas and global sampling patterns. Proceedings of the Northwest Mining Association Convention. Spokane, WA.
- Myers, J.C. 1997. Variograms: Quantification of Spatial Continuity. *Geostatistical Error Management*:263-305
- NAIST. 2000. Taxonomical classification of Korean soils. RDA:809
- Rhoades, J.D., P.A. Raats, and R.J. Prather. 1976. Effects of liquidphase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:651-655
- Rhoades, J. D., D. L. Corwin. 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:255-260.
- Rhoades, J. D., S. M. Lesch, P. J. Shouse, and W. J. Alves. 1989a. New calibrations for determining soil electrical conductivity-depth measurement relations from electromagnetic measurements. *soil Sci. soc. am. J.* 53:74-79.
- Rhoades, J. d., N. A. Manteghi, P. J. shouse, and W. J. Alves. 1989b. Soil electrical conductivity and soil salinity:new formulations and calibrations. 53:433-439.
- Ritzema, H. P. 1994. *Frainage Principles and Applications*. ILRI Pub. 16:pp1125
- Wessling, J. 1957. Land drainage in relation to soils and crops. In *Drainage of Agricultural Land* (Ed. J. N. Luthin).
- Schwab, G. O., R. K. Frevert, T. W. Edmonister, and K. K. Bernes. 1966. *Soil and Water Conservation Engineering*. John Wiley & Sons. NY.:pp683.
- Shainberg, I., J. D. Rhoades, R. J. Prather. 1981. Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. *Soil Sci. Soc Am. J.* 42(2):273-287.
- Shainberg, I., J. D. Rhoades, and R. J. Prather. 1981. Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. *Soil Sci. Soc Am. J.* 42(2):287-291.
- Shih, S. F., J. A. Doolittle. 1984. Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:651-656.

- Sudduth, K.A., S.T. Drummond, and N.R. Kitchen. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Comp. Elect. Agric.* 31:239-264.
- Sung, J. H., S. O. Chung, W. P. Park, S. C. Kim, I. K. Chung and D. H. Lee. 2000. Spatial variability of yield, chlorophyll content and soil properties for Korea rice paddy field. *Proc. of the second Asian conference for information technology in agriculture* June 15-17. 2000. pp. 97-102(In Korean).
- Tanji, K. K. 1992. Agricultural salinity assessment and management. *ASAE Manual and Reports on Engineering Practice*. ASCE:pp619
- USDA Salinity Lab. Staff. 1954. diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. *USDA Handbook*. 60:pp160.
- Van Hoorn, J. W., J.G. van Alphen 15. Salinity control. In Ritzema, H. P.(eds) 1994. *Drainage principles and applications* ILRI Pub 16:533-600
- Whitney, M., L. J. Briggs. 1987. An electrical method of determining the temperature of soils. *USDA. Div. of Soils. Bul.* 7:15pp.
- Whitney, M., T. H. Means. 1897. An electrical method of determining the temperature of soils. *USDA. Div. of Soils. Bul.* 8:30pp.
- Williams, B. G., D. Hoey. 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. *Aus. J. Soil Res.* 25:21-27.