

발간등록번호

11-1541000-001394-01

## 신·구간척지와 저위농지 농업생산성 증대와 온실가스 발생 저감 녹색기술 개발

(Development of green technology of greenhouse gas reduction and  
enhancement of agricultural productivity for reclaimed tidal soils and low  
productive quality soils)

충남대학교

농림수산식품자료실



0003101

농림수산식품부

# 제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “신·구간척지와 저위농지 농업생산성 증대와 온실가스 발생 저감 녹색기술 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2012년 4월 9일

주관연구기관명 : 충 남 대

주관연구책임자 : 정 덕 영

세부연구책임자 : 정 덕 영

연 구 원 : 박 미 숙

연 구 원 : 김 혜 진

연 구 원 : 김 기 림

연 구 원 : 우 현 녕

연 구 원 : 송 진 아

연 구 원 : 임 유 진

협동연구기관명 : 국립식량과학원

협동연구책임자 : 황 선 응

협동연구기관명 : 충북대학교

협동연구책임자 : 한 광 현

협동연구기관명 : (주)세와비전

협동연구책임자 : 한 기 석

# 요 약 문

## I. 제 목

신·구간척지와 저위농지 농업생산성 증대와 온실가스 발생 저감 녹색기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 우리나라 서남해안에 분포된 간척지 면적은 156.6천ha이며 염농도가 높고 모래와 미사함량이 높다. 그리고 지하수위가 높아 배수가 불량하고 표토에 염분집적이 쉬울 뿐만 아니라 제염을 실시한 후 다시 지하수 상승 등에 의한 재염화현상이 발생할 우려가 매우 높다.
- 간척지토양에서 연구는 주로 제염 연구 위주로 연구가 실시되었고 기존에 수행된 연구의 대부분이 제염방식에 따른 작물수량검정으로 제한적이다.
- 투수성이 불량하여 수직배수에 의한 제염이 어려워 대부분 논으로 이용되고 있다. 한편 생산성을 높이기 위해 질소처리량이 일반 논보다 2배 이상 사용하고 있지만 관행 논에서의 비의 평균 수량생산량보다 대체적으로 낮다.
- 오래된 간척지토양의 pH는 중성 이하지만 새만금과 같은 신간척지의 pH는 7 이상으로 토양의 pH가 7.5 이상으로 존재할 때 토양내에서 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 생성되어 대기로 휘발된다. 그러므로 pH 7 이상의 간척지 토양에 가축분 액비를 질소원으로 처리 시 암모니움태나 질산태 형태의 가급태 질소원은 매우 적을 것으로 추정되나 이에 대한 연구는 매우 미미하다.
- 대규모 간척지에 농산업 개발이 고부가가치 수출지향 농산물 육성 등 친환경 농산물 생산 기반전략으로 전환됨에 따라 간척지 토양이 가지고 있는 문제점을 확인하여 빠른 시간 내에 작물이 정상적으로 자랄 수 있는 토양으로 전환하는 대책이 필요하다.

## III. 연구개발 내용 및 범위

신·구 간척지, 생산성이 낮은 농지를 대상으로 토양구조 개선기술 개발과 이에 따른 에너지 작물 바이오매스 생산성 증대 및 저탄소·녹색성장 녹색기술 개발을 목표로 1세부와 3협동과제로 구분하여 다음과 같은 내용에 대하여 연구를 실시하였다.

1세부(충남대)는 지하수 상승 차단과 재염(再鹽) 방지 토양구조 개발 : 토양구조 소재 선발 실험 내외 모형시험과 현장 적용 시험 그리고 현장 토양구조 설치와 재배 시험을 실시하였다.

1협동(국립식량원)은 간척지 개선 토양 구조별 에너지 작물 재배 방법과 수량생산성 검정을 실시하며 한편 유·무기질 시비량과 윤작 작부 체계 효과 검정능 실시하였다.

2협동(충북대)은 간척지 토양에서 석탄바닥제 및 유기자재 혼합처리에 의한 온난화가스 발생 저감, 토양특성인자와의 상관관계 및 토양탄소 안정화 효과를 조사하고 호기성 발토양 조건에서 석탄바닥제 및 친환경 농자재/유기자재 혼합처리에 의한 온실가스 저감 효과를 검정하고

또한 혐기성 농토양 조건에서 석탄바닥제 및 유기자재 혼합처리에 의한 온실가스 저감효과, 토양 탄소 저장량 효과, 미생물상 변화를 조사하였다.

참여기업(주 세와비전)은 친환경 재활용 농자재 이화학적 특성을 조사하여 저탈질-완효성 친환경 농자재 시제품 개발 및 상품화를 목표로 하였다.

#### IV. 연구개발결과

구분	연구내용
1세부 (충남대)	<p>온실가스 발생저감과 농업생산성 향상 토양구조 개선과 관리 기술 개발</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 제염(desalinization)과 재염(salinization) 방지 토양구조 개선 소재 선발 제염(desalinization) : 처리 입경과 처리 비율</li> <li>2. 토양구조 개선 소재 적용 토양구조와 작업 공정 개발 제염(desalinization) 구조 : 표층 깊이와 EC 수준별 중간 차단층 구조 재염(salinization) 방지 구조 : 모세관 상승 원리 적용 차단층 구조 구조층 설계와 모사 시험 : 구조별 모세관 상승 높이, 수분분포 특성</li> <li>3. 개발 구조층 현장 적용 시험 - 현장 토양구조 설치와 작물 재배 시험 1차년도 : 새만금 (수도과 역새) : 처리별 생산량 변화 2차년도 : 새만금 (수도, 콩, 역새) : 처리별 생산량 변화 3차년도 : 영산강 (배추, 수수, 양배추, 파 등) : 처리별 생산량 변화</li> </ol>
1협동 (국립식량원)	<p>간척지 개선 토양 구조별 에너지 작물 재배 방법과 수량생산성 검정 유·무기질 시비량과 윤작 작부 체계 효과 검정</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 특허 출원 : 간척지토양을 이용한 간척지 토양의 제염촉진 방법</li> </ol>
2협동 (충북대)	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. 간척지 토양(혐기/호기)에 석탄바닥제 처리수준 증가하면 온실가스 발생 저감효과 증가하며 유기자재 혼합 시 CO<sub>2</sub> 발생 저감효과(CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 발생저감 효과 미흡). 석탄바닥제 처리수준 증가됨에 따라 미생물 생체량 증가</li> <li>3. 발토양에 석탄바닥제를 친환경자재/유기자재와 혼합처리 시 석탄바닥제 처리수준 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 발생 감소</li> <li>4. 농토양에 석탄바닥제 처리 시 온난화가스 발생이 저감하고 토양 미생물 군집 중 박테리아 군집의 증가에 효과적으로 작용. 하지만 석탄바닥제와 유기물 혼합처리 시 C/N 비율에 따라 석탄바닥제의 탄소안정화 효과 및 온실가스 저감효과 상이</li> <li>5. 특허 출원 : 석탄바닥제를 활성성분으로 함유하는 토양처리용 온실가스 저감제</li> </ol>
참여기업 (주)세와비전	<p>친환경 재활용 농자재 이화학적 특성</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 석탄바닥재 안정성 : 석탄바닥재내 함유 중금속 Trace 수준</li> <li>2. 수분과 양분보유능 : 식물가용수분 함량(20% ± 6.2), 완중수분 (12% ± 2.8)</li> <li>3. 아미노산과 미량 요소 피복 처리 석탄바닥제 용출 특성 : 아미노산 처리 농도가 증가함에 따라 피복석탄바닥제로부터의 미량요소 용출 속도 저감 및 질소원의 암모니아태 질소로 휘발을 저감</li> <li>4. 저탈질-완효성 친환경 농자재 시제품 개발 : 석탄바닥제입경별 돈분 퇴비와 증량제로 적용 시 돈분뇨내 유기물 잔류량 급감 및 유기물담지 다공체로 활용. 이를 간척지 토양에 토양개선 및 완효성 비료로 처리 기능</li> </ol>

V. 연구성과 및 성과활용 계획

발표논문

계재 연도	논문명	저자		학술지명	Vol. (No.)
		주저자	교신저자		
2010	Patterns of Leaching and Distribution of Cations in Reclaimed Soil according to Gypsum Incorporation Rate	유진희	정덕영	한국토양비료학회지	43(5)
2010	Leaching and Distribution of Cation in Multi-Layered Reclaimed Soil Column with Intermediate Macroporous Layer	유진희	정덕영	한국토양비료학회지	43(5)
2010	Application of Stable Isotopes in Studies of Gas Exchange Processes Between Biosphere and the Atmosphere	한광현	한광현	한국토양비료학회지	43(2)
2011	Effect of Soil Water Contents on Urea Hydrolysis and Nitrification in a Newly Reclaimed Tidal Soils	박미숙	정덕영	한국토양비료학회지	44(1)
2011	Breakthrough Curves and Miscible Displacement of Cadmium Through Double-Layered Soils of Reclaimed soils Macroporous Granule	정덕영	정덕영	한국토양비료학회지	44(1)
2011	Fate of Nitrogen Influenced by Circumstances of a Reclaimed Tidal Soils	한상균	정덕영	한국토양비료학회지	44(5)
2012	Effects of bottom ash amendment soil an respiration and microbial biomass under anaerobic conditions	박종찬	한광현 정덕영	한국토양비료학회지	45(2)
2012	Effects of soil-amended bottom ash on decomposition rates of organic matter as investigated by an enforced-aeration respirometer	정석호	한광현 정덕영	한국토양비료학회지	45(2)
2012	Division of Soil Properties in Reclaimed Land of the Mangyeong and Dongjin River Basin and Their Agricultural Engineering Management	황선웅	정덕영 외	한국토양비료학회지	45(3)

특허 출원

출원 특허				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호
2010	바텀애쉬를 활성성분으로 함유하는 토양처리용 온실 가스 저감제	대한민국(농촌진흥청) 충남대학교 산학협력단 충북대학교 산학협력단	한국	102010010861
2011	간척지토양를 이용한 간척지 토양의 제염촉진 방법	대한민국(농촌진흥청) 충남대학교 산학협력단 충북대학교 산학협력단	한국	10-2011-0010090

## 2. 학술발표

- 다공성소재가 처리된 간척지 다층토주에서 염류의 모세관 상승 특성 (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)
- 다공성소재와 Gypsum 처리 간척지 다층토주토양의 수리전도 특성 (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)
- 논에서 퇴비단여과 액비 처리에 의한 지구온난화가스 발생량 평가(2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)
- Bottom ash 처리에 의한 지구온난화 가스 발생 저감 및 탄소 저장량 증대 효과 규명 (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)
- 항온배양실험을 통한 bottom ash, 유기물 처리가 CO2 발생량 및 토양 미생물상에 미치는 영향 평가. (2011 한국토양비료학회 추계학술발표회)
- Bottom ash/유기자재 혼합처리가 토양 이화학성, 미생물 생체량 및 온난화가스 발생에 미치는 영향. (2011 한국토양비료학회 춘계학술발표회)
- Bottom ash 처리에 의한 지구온난화 가스 발생 저감 및 탄소 저장량 증대 효과 규명. (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)
- 새만금 간척지 토양특성 구분(2011 한국토양비료학회 춘계학술발표회)
- 간척지 발 토양 경종적 염분상승 억제(2011 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

## 성과활용 계획

1. 신간척지 발작물 재배를 위한 석탄바닥재 지원 농림부와 환경부에 시책 건의(2010년)
2. 간척지토양구조 개선 공정과 처리 소재에 대하여 농촌진흥청 등에 자료를 제공하여 향후 간척지 토양 개선 사업에 적용하도록 건의 예정.
3. 국내 쌀 생산 과잉으로 인해 신간척지에서 발작물 재배가 중요시되고 있으나 간척지토양은 매우 높은 염농도를 가지고 있고, 수직배수 불량으로 인해 제염이 어려우며 또한 재염화 현상이 발생이 발행하여 발작물 재배가 곤란하므로 신간척지 기반조성 시 작토층 하부에 석탄바닥재를 소재로 한 대공극층을 형성하여 제염촉진 및 재염화 방지를 위한 석탄바닥재 활용 지원을 건의하였다.
4. 영산강 간척지 토양에 다공체를 골배수제로 처리하는 실증시험 준비 중. 특히 현재 폐기물로 분류된 석탄바닥제의 활용방안과 거의 동일한 문제를 가지고 있는 간척지 제염과 재염방지를 위한 기술로서 한국농어촌 공사 등에 정보를 제공할 예정이다.
5. ㈜세와비전은 아미노산피복 대공극 다공체에 대한 현장 적용 시험을 통하여 자체 상품으로 최종 개발하여 상품화를 실시할 예정이다.
6. 대공극 소재를 활용한 간척지 토층구조의 개선과 이를 통한 작물 생산성 증대 기술을 개발하기 위한 재료로 사용하는 석탄바닥재는 2012~2015 국립식량과학원 간척지농업과에서 주관하는 간척지 발작물 재배를 최적기술개발 중 간척지염분상승 억제기술 개발 세부과제의 재료로 석탄바닥재 외 연탄재, 파쇄목, 왕겨, 쇠석, 패각 등을 비교하는 재료로 사용할 계획임

## SUMMARY

### Title of Project

Development of green technology of greenhouse gas reduction and enhancement of agricultural productivity for reclaimed tidal soils and low productive quality soils.

Bottom ash is byproduct from thermal power plant and there's no way to dispose except landfill. However, bottom ash has neutral pH, low heavy metal contents and large grain size than fly ash due to silicon/ aluminium oxides as its major constituents. Because of these properties can contribute to adsorption/stabilization of organic matter in soil and growth of soil microbial community, expected to reduce emissions of greenhouse gases following soil carbon stabilization. Accordingly, we study about properties of bottom ash, soil carbon stabilization, and reduction in greenhouse gases in this paper. At reclaimed soil in both aerobic/anaerobic condition, bottom ash treatment effective to reducing greenhouse gases and reducing greenhouse gas effect growing when bottom ash treatment increases. However, in case of mixed organic matter treatment, effective in reducing CO<sub>2</sub> emissions but there was no significant effect of reducing CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O emission. In general, as increasing of bottom ash treatment, also increasing the level of microbial biomass. Incubation experiments using common farmland soil in the laboratory conditions, CO<sub>2</sub> emission generally decreases when mixing higher rate of different physicochemical bottom ash to eco-friendly materials/organic materials. When bottom ash treated to paddy soil in general conditions, there are advantage to reducing greenhouse gas effect and also microbial biomass increases. However, in case of mixing bottom ash and organic matter, according to C/N ratio property, difference occurs in carbon stabilization effects and greenhouse gas reduce by bottom ash. In soil microbial community changes by bottom ash treatment, shows more microbial community increases than bottom ash untreated soil and it's especially effective to bacteria communities.

### II. Goals and Need of Research

- The total area of a reclaimed tidal soil distributed on the south-west coast is approximately 156600 ha, and the soil contains high contents of sand and silt as well as highly saline. And drainage is very poor due to high groundwater level, resulting in easy accumulation of salts on the soil surface. Therefore, resalinization may occur because of rise of groundwater table after desalinization.
- The researches related to the reclaimed tidal soil mainly focused on desalinazation while most of the researches completed were limited to yields of crop based on desalinazation.

- Most of the reclaimed tidal soils are used as a paddy due to bad permeability because the vertical drainage was difficult. On the other hand, the yield of rice is less than average of rice produced from conventional paddy although the amount of N-fertilizer to raise yield was twice as much as that in the conventional paddy.
- pH of old reclaimed tidal soil is neutral or less than 7 while that of newly developed reclaimed tidal soils is greater than 7, that cause N-fertilizer to be volatile as ammonia. however, the researches related to application of liquid fertilizer as N-source in the reclaimed tidal soil of which pH is greater than 7 are rare.
- We need measures to make soils grow crops normally by identifying problems related to reclaimed tidal soils because the development of agricultural industries in a large scale reclaimed tidal land was changed toward production of export-oriented high value agricultural products as production base of environmentally-sound agriculture.

### III. Scope and Contents of Investigation

We initiated this investigation to develop the modified soil structure for green technology of green growth and improved biomass production of energy crops. To do these, this investigation has one subsection and three cooperative sections.

One subsection(Chungnam National University) conducted to develop soil structure in preventing salinization and rise of groundwater. To achieve these goals we carried out the experiments such as selection of materials for soil structure modification, simulation tests in laboratory and field, crop cultivation with establishment in the field.

1st Cooperative section(National Institute of Crop Science) carried out the experiments such as evaluation of effect of rotational crop system depending on application of organic and inorganic fertilizers as well as yield and cultivation methods of energy crops depending on the modified soil structures in the reclaimed tidal land.

2nd. Cooperative section (Chungbuk National University) carried out the experiment such as evaluation of reduction of greenhouse gas depending on mixing ratios of environmentally-sound agricultural materials and organic materials with amendment of coal bottom ash, as well as reduction of greenhouse gas by soil factors in the reclaimed tidal soils amended with the coal bottom ash.

Participating company(SEWA Co. Ltd.) aimed to develop a prototype product which is environmentally-sound and controlled with low emission of nitrogen gas by

investigating physical and chemical properties of recycled environmentally-sound agricultural byproducts.

#### IV. Results of Research

Section	Results of Research
Ist (Chungnam National Univ.)	<p>Development of Soil structure modification for reduction of greenhouse gas and Improved crop productivity.</p> <p>Selection of materials utilized to develop soil structure for Desalinization and Salinization (Desalinization) : Treatment rate and particle sizes</p> <p>Selection of materials and Development of operation processes for Soil structure modification</p> <p>Guideline of soil structure for desalinization and salinization</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Depth of surface layer and soil structure of intermediate layer based on EC and theory of capillary rise</li> <li>☞ Design of soil structure and its simulation test depending on height of capillary rise and distribution of water content</li> </ul> <p>Field test of developed soil structure - Establishment of soil structure and crop cultivation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 1<sup>st</sup> year : Saemangeun(rice and miscanthus) : Yield variation for treatment</li> <li>☞ 2<sup>nd</sup> year : Saemangeun(rice, soybean, and miscanthus) : Yield variation for treatment</li> <li>☞ 3<sup>rd</sup> year : Yougsan river (chinese cabbage, sorghum, cabbage, green onion et al.</li> </ul>
Ist Coop. (NICS)	<p>Test of yield and cultivation methods depending on developed soil structure</p> <p>Evaluation of rotational cropping system and application rates of organic and inorganic fertilizers</p> <p>Application for a patent : Expedited desalination method in a reclaimed tidal soil using reclaimed tidal soil</p>
2nd Coop. (Chungbuk National Univ.)	<p>Reduction of greenhouse gas (CO<sub>2</sub>) evolution using different application rates of coal bottom ash in the reclaimed tidal land</p> <p>Increase in population of microorganisms with application of the coal bottom ash</p> <p>Decrease in amount of CO<sub>2</sub> evolution with increased application rates of coal bottom ash amended with different amount of environmentally -sound agriculture /organic amendment in upland and paddy soils</p> <p>With application of coal bottom ash the microbial population, especially in bacteria, was significantly increased. However, carbon stabilization and reduction of greenhouse gas were varied with C/N ratio depending upon mixing rates of coal bottom ash and compost.</p> <p>Application for a patent : Reductant made with coal bottom ash used for reduction of greenhouse gas as soil treatment</p>
Participant (SEWA Co. Ltd.)	<p>Physical and chemical properties of environmentally-sound recycled agricultural materials</p> <p>Safety of coal bottom ash : levels of heavy metals on coal bottom ash</p> <p>Capacities of water and nutrient : Plant available water content (20% ± 6.2), Buffer water (12% ± 2.8)</p> <p>Leaching patterns of coal bottom ash coated with amino acid and micronutrient : slow-release characteristics of micronutrient and reduction of N-gas from N-sources with treatment of coal bottom ash</p> <p>Prototype environmentally-sound recycled agricultural materials low in denitrification and slow-release used with for storage of pig slurry</p>

V. Research Achievement and Plans for Future uses

1. Articles published

Published Yr	Title of Article	Author		Journal	Vol.
		1 <sup>st</sup> Author	Correspondence		
2010	Patterns of Leaching and Distribution of Cations in Reclaimed Soil according to Gypsum Incorporation Rate	Ryu, J.H	Chung, D.Y	KSSSF	43(5)
2010	Leaching and Distribution of Cation in Multi-Layered Reclaimed Soil Column with Intermediate Macroporous Layer	Ryu, J.H	Chung, D.Y	KSSSF	43(5)
2010	Application of Stable Isotopes in Studies of Gas Exchange Processes Between Biosphere and the Atmosphere	Han, K.H	Han, K.H	KSSSF	43(2)
2011	Effect of Soil Water Contents on Urea Hydrolysis and Nitrification in a Newly Reclaimed Tidal Soils	Park, M.S	Chung, D.Y	KSSSF	44(1)
2011	Breakthrough Curves and Miscible Displacement of Cadmium Through Double- Layered Soils of Reclaimed soils Macroporous Granule	Chung, D.Y	Chung, D.Y	KSSSF	44(1)
2011	Fate of Nitrogen Influenced by Circumstances of a Reclaimed Tidal Soils	Han, S.G	Chung, D.Y	KSSSF	44(6)
2012	Effects of bottom ash amendment soil an respiration and microbial biomass under anaerobic conditions	Park, J.C	Han, K.H	KSSSF	45(2)
2012	Effects of soil-amended bottom ash on decomposition rates of organic matter as investigated by an enforced-aeration respirometer	Jung, S.H	Han, K.H Chung, D.Y	KSSSF	45(2)
2012	Division of Soil Properties in Reclaimed Land of the Mangyeong and Dongjin River Basin and Their Agricultural Engineering Management	Hwang, S.W	Chung, D.Y et	KSSSF	45(3)

## 2. Applicant for a patent

Year of submission	Title of patent	Applicant for a patent	Country for a patent	Application No.
2010	Reductant made with coal bottom ash used for reduction of greenhouse gas as soil treatment	RDA Chungnam National Univ. - Industry Collaboration Foundation Chungbuk National Univ. - Industry Collaboration Foundation	korea	102010010861
2011	Expedited desalination method in a reclaimed tidal soil using reclaimed tidal soil	RDA Chungnam National Univ. Industry Collaboration Foundation Chungbuk National Univ. Industry Collaboration Foundation	korea	10-2011-0010090

## 3. Proceedings

Greenhouse Gas Emissions evaluation in Rice Paddy by SCB Fertilizer. KSSSF. 2010

Mitigation of greenhouse gases emissions and enhancement of soil carbon storage by bottom ash amendment. KSSSF. 2010.

Capillary Rise of Salts in Multi-Layered Reclaimed Soil Column treated with Porous Media. KSSSF. 2010

Characteristics of Hydraulic Conductivity in Multi-Layered Reclaimed Soil Amended with Porous Media and Gypsum. KSSSF. 2010

Resalinization Control of Saline Soil in Reclaimed Upland KSSSF. 2010

The Assessment of Soil Properties to Saemangeum Reclaimed Land KSSSF. 2010

## 3. Symposium

Strategies to improve soil properties for increasing efficiency of N-sources in a reclaimed tidal soils. 2011. Symposium for a reclaimed soils. NICS

## 4. Workshop

Status of Saemangeum reclaimed land and its use for agricultural soils. 2011. Korean rural community Corporation(KRCC).

## 4. Plans for Future uses

The purposes of this investigation were to develop the improved soil structure by modification of soil layers with macroporous media such as coal bottom ash which is produced from a thermoelectric power plant for reduction of greenhouse gas throughout increased crop productivity. With these goals, we developed several soil structures which can be applied to

the reclaimed tidal land, as well as soil amendment as environmentally sound materials. Therefore, these soil structures and materials can be used in the reclaimed tidals land such as newly completed Saemangeum and Youngsan-river. However, it need to be approved by government agencies such as MAF(Ministries of Agriculture and Fisheries) and ME(Ministry of Environment) because the porous media used in this investigation is classified as general waste which can not be used in any general uses without special permission from ME.

if these matters can be resolved, the results can significantly contribute the reduction of greenhouse gases throughout increased crop yields. Especially, the techniques and operation processes of soil structure modification for desalinization and protection of resalinization can be used in general greenhouse systems in which salt accumulation is most serious problem to be solved.

Also RDA and KRCC that are main government related agencies can recommend the guidelines of soil modification even in general agriculture areas such as infertile soils and paddy soils of which MAF strongly urges to change their uses.

And the participating company may commercialize the slow-release soil amendment that can increased yield and reduce carbon emission into air.

Finally, MAF can use the results of soil structure modification in improving soil quality of the reclaimed tidal soil.

# Contents

Chapter 1. Introduction of research .....	16
Paragraph 1 Problems of the reclaimed tidal land .....	17
Paragraph 2 Maturation of the reclaimed tidal land .....	24
Paragraph 3 Greenhouse gas .....	27
Chapter 2 Status of domestic and foreign technology development .....	33
Paragraph 1 Researches related to improvement of the reclaimed tidal land .....	33
1. Physical and chemical properties of domestic reclaimed tidal land .....	33
2. Changes in soil pH .....	35
3. Redox potential of soil .....	36
4. Permeability .....	37
5. Changes in EC during desalinization .....	39
6. Improvement of permeability using soil amendment .....	40
7. Calculation of amount of desalinization water .....	40
8. Physical and chemical properties and crop growth .....	41
Paragraph 2 Factors influencing nutrient availability and fate in soils depending on soil conditions .....	49
1. Nitrogen transformation processes in soil .....	49
Paragraph 3 Reduction of greenhouse gas and storage of soil carbon .....	53
1. Technology in reduction of greenhouse gas .....	54
Chapter 3 Scopes and results of Investigation .....	55
Paragraph 1 Modification and management of the reclaimed tidal land using environmentally -sound materials .....	56
1. Goals of Investigation .....	56
2. Theoretical background .....	56
3. Materials and Methods .....	75
4. Results .....	86
5. Summary .....	115
Paragraph 2 Water management for productivity of energy crops .....	117
1. Methods .....	118
2. Results .....	121
3. Summary .....	131
Paragraph 3 Strategies to reduce global warming gas and improvement of carbon storage in a reclaimed tidal soil utilizing recycled resources .....	133

1. Materials and Methods .....	138
2. Results .....	138
3. Summary .....	172
Paragraph 4 Development of environmentally-sound agricultural materials for reduction of greenhouse gas .....	172
1. Methods .....	173
2. Results .....	175
4. Summary .....	178
Chapter 4 Achievement and contribution for the related areas .....	180
Paragraph 1 Achievement .....	180
Paragraph 2 Level of Contribution .....	181
Chapter 5 Outcomes of research and application of the outcomes .....	183
Paragraph 1 Plans of Commercialization and industrialization	
Paragraph 2 Education, Guidance, public relations, and so on .....	184
Paragraph 3 Intellectual property rights for patent, articles, etc. ....	185
Paragraph 4 Further research and plans of application for other research .....	185
Chapter 6 Information of science and technologies collected during investigation .....	186
Chapter 7 References .....	189

# 목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요 .....	16
1절	간척지 문제점 .....	17
2절	간척지 속전화 .....	24
3절	온실가스 .....	27
제 2 장	국내외 기술개발 현황 .....	33
1절	간척지 토양 개선 연구 .....	33
1.	국내 간척지 토양의 이화학 특성 .....	33
2.	토양 pH 변화 .....	35
3.	토양의 산화환원상태 .....	36
4.	간척지 토양의 투수성 .....	37
5.	간척지토양의 제염과정 중 전기전도도 변화 .....	39
6.	간척지 토양의 토양개량제를 이용한 투수성 개선 .....	40
7.	간척지 토양의 제염용수량 산정 .....	40
8.	간척지 토양의 이화학 특성과 작물 생육 .....	41
2절	토양환경 조건별 토양 내 양분동태와 가용화 영향 요소 .....	49
1.	토양 내에서 질소 전환 과정 .....	49
3절	온난화가스 저감과 토양탄소 저장능 .....	53
1.	온실가스 저감기술 .....	54
제 3 장	연구 개발 수행 내용 및 결과 .....	55
1절	친환경 소재를 활용한 간척지 토양구조 개선과 관리 기술 개발 .....	56
1.	연구과제 목표 .....	56
2.	연구 개발의 이론적 배경 .....	56
3.	연구 내용 및 방법 .....	75
4.	연구 결과 .....	86
5.	결과 요약 .....	115
2절	에너지작물 바이오매스 생산증대 물 관리와 작물 재배법 .....	117
1.	시험방법 .....	118
2.	연구결과 .....	121
3.	결과 요약 .....	131
3절	재활용 자원 활용 간척지 농경지 탄소 저장량 증대 및 온난화 가스 저감 농자재 시비방안 .....	133
1.	재료 및 방법 .....	128
2.	연구 결과 .....	138
3.	결과 요약 .....	172
4절	온실가스 발생 저감과 생산성 향상 친환경 농자재 개발 .....	172
1.	연구방법 .....	173

2. 연구 결과 .....	175
4. 결과 요약 .....	178
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	180
1절 연구개발목표의 달성도 .....	180
2절 관련분야에의 기여도 .....	181
제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획 .....	183
1절 실용화·산업화 계획 .....	183
2절 특허, 품종, 논문 등 지적재산권 확보계획 .....	183
3절 추가연구, 타 연구에 활용 계획 .....	185
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	186
제 7 장 참고문헌 .....	189

# 제 1 장 연구개발과제의 개요

우리나라의 농경지는 산업화와도시화의 영향으로 타 용도로 전용되는 등으로 그 면적이 급속히 감소되고 있다. 우리나라의 서남해안은 해안선이 복잡하고 수심이 낮아 간척하기에 좋은 조건을 갖추고 있어서 예로부터 서남해안을 중심으로 간척이 진행돼 왔으며 간척지는 식량의 안정적 공급을 위한 경지면적을 확보하는데 중요한 자원이 된다 (그림 1).



그림 1. 우리나라 주요 간척지분포 현황

우리나라 서남해안에 분포된 신간척지는 대부분 인위적 방조제 구축으로 형성된 간척지로 지하수위가 높고, 염농도가 높으며 투수성이 불량하여 수직배수에 의한 제염이 어렵다. 간척지 중 사질계토양은 작토층의 경화로 수년간 이양작업이 곤란 내지 불가능하다. 이와 같이 간척 초기토양 중 영농에 문제점을 갖고 있는 사토 내지 사양토의 경우 전국 분포 면적 156,000ha 중 73%가 전북의 해안에 분포하고 있다.

그리고 간척지토양에서 벼를 재배할 경우 염분과 벼가 자라는 근권내의 토양입자분포 특성에 영향을 받아 통기성이 매우 불량하며 또한 환원상태에서 황화수소의 발생과 인산, 칼리, 아연결핍이 많아 벼생육이 매우 불량하다 (유, 2010). 따라서 간척지에서 작물 재배의 문제점은 간척지 토양의 염농도, 높은 지하수위, 토양물리·화학적 등 작물생육에 지장을 초래한다 (류철현 등, 2007).

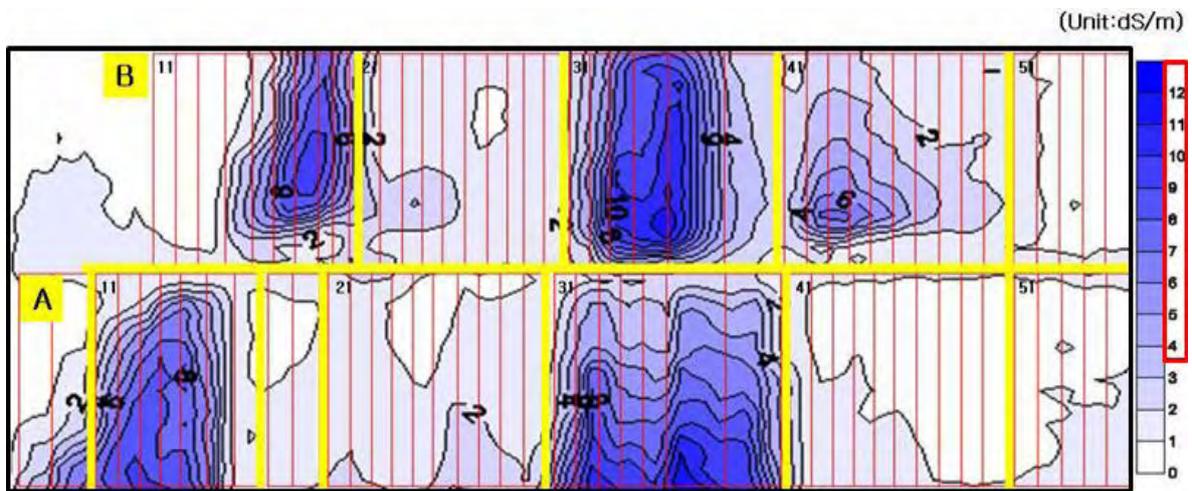


그림 2. 계화도 간척지 농토양 표층 염농도 분포도 (오른쪽 농도  $4\text{dS m}^{-1}$  이상은 작물 재배 곤란 지역)

## 1절 간척지 문제점

국내 간척지 토양의 이화학 특성과 관련하여 여러 문헌들을 조사한 바, 현재 국내 간척지는 염농도가 높고 모래와 미사가 많고 지하수위가 높아 배수가 불량하고 표토에 염분집적이 쉬울 뿐만 아니라 제염을 실시한 후 다시 지하수 상승 등에 의한 재염화현상이 발생할 우려가 매우 높다. 한편 농경지로 이용되고 있는 대부분의 간척지는 배수불량으로 인해 대부분 논으로 이용되고 있다. 하지만, 생산성을 높이기 위해 질소처리량이 일반 논보다 2배 이상 사용하고 있지만 생산성은 관행 논에서의 평균 생산량보다 낮은 것으로 조사되었다.

### 1. 간척지 토양의 문제점

간척지 토양은 일반적으로 가용성 염류와 치환성 소듐이 과다하게 함유되어 있기 때문에 염분

농도가 대단히 높으며, 일반 토양에 비해 자연 비옥도가 낮고, 염농도가 높아 작물의 발아 및 생장에 악영향을 미치게 되어 궁극적으로 생산량을 저하시킨다. 대부분의 간척지 토양의 염농도는 관수 및 토양개량제의 사용으로 일시적으로 저하가 가능하나, 담수를 중지하였을 때는 지하부로부터 수분의 모세관상승을 따라 염류의 상승이 지속적으로 일어나 토양의 표면에 염류가 집적되는 재염화현상이 일어난다. 이와 같은 염의 상향이동 및 표면축적은 지표면에서의 수분증발과 밀접한 관계에 있으며 제염과정은 일종의 용질이동으로 용매인 토양수분의 이동과 병행하여 일어난다(유순호 등, 1988). 그러므로 간척지를 효율적으로 활용하기 위해서는 고염도 간척지 토양에 대한 제염이 선행되어야 하고, 토양 물리성이 개선되어야 하였다.

### 가. 염류집적토양 구분

간척지 토양내 염류는 종류에 따라서는 식물체의 여러 생리적 반응에 필수적으로 요구되지만 일반적으로 간척지 토양에서는 식물생육에 유해할 정도의 높은 농도로 존재하며 Na와 같은 이온은 토양의 물리성을 악화시켜 궁극적으로 배수에 영향을 미쳐 토양의 산화환원전위에 영향을 미친다. 따라서 염류집적토양은 염류집적 특성과 농도, 그리고 토양 pH 조건에 따라 표 1과 같이 구분하였다.

표 1. 염류 영향 토양 구분

구분	EC <sup>1</sup> (dS m <sup>-1</sup> )	토양 pH	SAR <sup>2</sup>	ESP <sup>3</sup>	토양물리성
일반 토양	<4.0	<8.5	<13	<15	-
염류토양(Saline soil)	>4.0	<8.5	<13	<15	정상
소듐성토양(Sodic soil)	<4.0	>8.5	≥13	>15	불량
염류소듐성 토양(Saline-Sodic soil)	>4.0	<8.5	≥13	>15	정상

<sup>1</sup>Electrical conductivity; <sup>2</sup>Sodium adsorption ratio; <sup>3</sup>Exchangeable sodium percentage

### ESP와 SAR

교환성소듐퍼센트(exchangeable sodium percentage, ESP)는 토양에 흡착된 양이온 중 Na<sup>+</sup> 이온이 차지하는 비(exchangeable sodium ratio, ESR)를 %로 표시한 것이다.

$$ESP = \frac{\text{치환성 } Na_{ex}^+}{[CEC]} \times 100$$

여기서 CEC는 양이온교환용량(Cation Exchange Capacity)을 의미하였다.

소듐흡착비(sodium adsorption ratio, SAR)는 토양과 평형을 이루는 용액 중의 Ca<sup>2+</sup>과 Mg<sup>2+</sup>에 대한 Na<sup>+</sup>의 농도비를 이용하여 토양에 흡착되어 있는 Na<sup>+</sup>의 양이온교환용량 점유율을 의미하였다.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

(1) 알칼리토양과 염류토양

염류의 집적에 의하여 염기포화도와 토양용액 중 염기의 농도가 높아지고 그로 인하여 토양반응이 중성 내지 알칼리성으로 되며 pH가 너무 높거나 Na 및 기타 염류들의 함량이 높아 식물 성장에 피해를 초래하게 된다. 염류가 집적되어 알칼리성 반응을 보이는 토양도 존재하는 염류의 양과 비율 그리고 성질의 차이에 따라 몇 가지 유형으로 구분 된다 (표 2).

표 2. 토양염류 등급과 전도도별 작물 생육 관계

염류단계	포화 용출액 EC (dS/m)	작물에 대한 영향
Non saline	0 - 2	염류 장애 없음
Slightly saline	2 - 4	염류 민감 작물 생육 제한
Moderately saline	4 - 8	다수 작물 수확 가능
Strongly saline	8 - 16	단순 내염작물만 생육 가능
Very strongly saline	> 16	극소 내염작물 수량 생산 가능

(2) 소듐성 토양

알칼리성토양을 소듐성토양(sodic soil)이라 하며 토양포화침출액의 EC가 4 dS/m 이하, ESP가 15% 이상, 그리고 SAR이 13 이상인 토양을 말하였다.

토양의 pH가 8.5 이상인 강알칼리성 토양으로 교환성 소듐비가 15% 이상 일 경우 알칼리토양이라 하며 알칼리토양은 경운이 어렵고 투수속도가 매우 느리며, 시간이 경과하면 분산된 점토가 아래로 이동하여 경반층(hard pan)을 형성하여 수분의 이동을 차단시키고, 뿌리 성장에 불리하게 작용한다 (표 3).

표 3. ESP와 식물 위해성 관계

ESP	위해정도	Remarks
< 15	거의 없음(None to slight)	
15 - 30	약함-중간(Light to moderate)	극한 Na 저항성 식물만이 ESP
30 - 50	중간-높음(Moderate to high)	70내지 80에서 산다
50 - 70	높음-아주 높음(High to very high)	(해안가 말류 들).
> 70	극히 높음(Extremely high)	

### (3) 염류토양

염류토양(saline soil)은 염화물, 황산염, 질산염 등의 가용성 염류가 비교적 많다. 토양의 pH는 대개 8.5 이하이고 ESP는 15 이하이다.  $Ca^{2+}$ 나  $Mg^{2+}$ 과 같은 2가 양이온의 친화력이  $Na^+$ 보다 크기 때문에 염류토양의 소듐흡착비는 13 이하이다. 토양 포화침출액의 전기전도도가  $4 \text{ dS m}^{-1}$  이상이며 높은 염류농도 때문에 대부분의 식물이 생육할 수 없다.

### (4) 염류소듐성 토양

염류소듐성 토양(saline-sodic soil)은 염류토양과 알칼리토양의 중간 특성을 가지고 있다. 염류토양과 같이 토양 중 가용성 염류의 농도가 높으며 전기전도도가  $4 \text{ dS m}^{-1}$  이상이다. 하지만 교환성소듐은 15%를 넘고 SAR이 13 이상이다. 가용성 염류가 토양에 많이 남아 있으면 교질에 Na의 양이 많아지고, 가용성 염류가 용탈되면 pH는 8.5 이상으로 된다. 한편 가용성 염류가 표면으로 이동 집적되면 pH가 다시 내려가고 교질은 응집상태로 되어 구조가 좋아진다.

간척지 문제점으로 다음과 같은 점이 지적할 수 있다 (그림 3).

- 간척지 토양내 염류는 종류에 따라서는 식물체의 여러 생리적 반응에 필수적으로 요구되지만 일반적으로 간척지 토양에서는 식물생육에 유해할 정도의 높은 농도로 존재하였다. 지표층 염류농도가  $8 \text{ dS m}^{-1}$  이상으로 매우 높을 뿐만 아니라 수리전도도(Hydraulic conductivity)가 극히 낮아 관수 등에 의한 제염 효과를 기대하기 어려운 상황이다. 따라서 대부분의 간척지 토양의 염농도는 관수 및 토양개량제의 사용으로 일시적으로 저하가 가능하나, 담수를 중지하였을 때는 지하부로부터 수분의 모세관상승을 따라 염류의 상승이 지속적으로 일어나 토양의 표면에 염류가 집적되는 재염화현상이 일어난다. 이와 같은 염의 상향이동 및 표면축적은 지표면에서의 수분증발과 밀접한 관계에 있으며 제염과정은 일종의 용질이동으로 용매인 토양수분의 이동과 병행하여 일어난다(유순호 등, 1988).
- 지하수위가 높아 증발산이 증가하는 시기에 모세관 상승에 의한 재염화가 가속화되어 작물 재배가 어렵다.
- 표층에 점토와 유기물 함량이 매우 낮아 토양입단 형성 불가할 뿐 아니라 불포화 시 양분과 수분보유력이 낮아 양분 손실 우려가 크다.
- 김(2008)이 발표한 자료에 따르면 간척지 토성 및 지하수위별 제염화 속도 연구 결과에 따르면 제염화속도는 세립질 토양일수록 크고, 사질인 경우 지하수위만 충분히 낮추면 영년밭으로 이용할 수 있는 반면에 미사질계 간척지는 제염화 속도가 크므로 지하수위가 1.5m이하에서도 영년밭으로 이용할 수 없다 (표 4).

표 4 토성 및 지하수위별 토양수분 증발량

(단위 : mm)

기간 (월)	토성별 지하수위									자유수 표면
	Sandy			Silt Loam			Silt			
	0.3m	0.5	1.0	0.3m	0.5	1.0	0.3m	0.5	1.0	
4	139.7	59.1	13.8	134.7	98.2	60.4	156.1	119.6	34.9	125.9
5	164.4	69.6	16.3	158.7	115.2	71.1	183.7	140.7	53.4	148.1
6	163.0	69.0	16.2	157.1	114.5	70.5	118.4	139.5	52.9	146.8
전기간	447.1	189.9	44.3	431.0	314.2	193.1	499.5	424.0	145.0	402.8

- 강우 시 토양구조가 안정화되지 못하여 강우 시 이랑 등이 파괴 분산되어 식물 생육에 지장을 초래하였다 (그림 3)



그림 3. 간척지 현장 문제점 (좌로부터 우천 후 배수불량, 로터리 및 배수로 작업 불량, 불량 배수로 피종 작업 불능, 재배불능으로 갈아엎은 현장)

한편 작물재배와 관련한 문제점으로는 다음과 같은 것이 있다.

식물의 염해기작은 과도한 염류집적에 의해 토양내 삼투압이 증가되고 이에 따라 수분흡수가 저해되어 나타나는 수분 결핍현상과 특정 이온의 비정상적 과다 흡수에 의해 나타나는 이온 특이적 효과는 복합적 작용에 의한 현상으로 설명되고 있는데, 특정 이온의 영향은 이차적인 원인으로 취급되고 있다. 염농도가 어떤 한계를 넘으면 식물의 생육이 저해되는데 작물의 생육을 저해할 수 있는 한계 염농도는 식물의 종류와 상태, 그리고 온도, 습도, 풍속 등의 외부환경과 근권 수분포텐셜 등에 의하여 결정되며, 생육저해는 염농도가 높아질수록 커지게 된다.

일반적으로 작물 재배가 가능한 토양 염농도는 0.3%이하로 알려져 있으며 일본 토양비료학회지 (1991)에 실린 논문에 따르면 작물별 내염정도에 따른 적용 가능한 염농도 분류 결과를 살펴보면 저농도 0.1%이하(극약)는 강낭콩, 당근, 양파, 상추, 딸기, 고구마 등이고 중농도 0.1~0.2%(약)는 벼, 옥수수, 감자, 시금치, 양배추, 오이, 토마토 등이며, 0.2~0.4%(중)범위는 수단그라스, 톨페스큐, 호박, 호이트그라스, 유채, 자운영 등 입니다. 그리고 비교적 고농도 0.

3~0.4%(강)에서 생육 가능한 것으로는 사탕수수, 호밀, 보리, 이탈리아라이그라스, 버뮤다그라스, 목화 등으로 보고되었다 (표 5).

표 5. 염농도별 재배가능작물 (일본토양비료학회, '91)

분류	내염성	염농도(%)	재배 작물
저농도	극약	0.05-0.1	강낭콩, 당근, 딸기, 양파, 라디슈(무), 순무, 상추, 레드클로바, 라지노클로바, 고구마
중농도	약	0.1-0.2	누에콩, 옥수수, 감자, 양배추, 알파파, 시금치, 오이, 토마토, 브로콜리, 벼
	중	0.2-0.3	수단그라스, 툴페스큐, 호박, 유채, 자운영, 휘트그라스
고농도	강	0.3-0.4	벌노랑이(콩과), 듀라콤기, 호밀, 사탕수수, 페레니알라이그라스
	극강	0.4-0.5	대맥, 버뮤다그라스, 툴휘트그라스, 이탈리아라이그라스, 목화, 사탕무

노 등이 0.3~0.5%의 염농도 분포를 보이는 문포통(세사양토)에서 재배가 적합한 발작물을 선정하고자 연구한 결과에 따르면 사료작물 중에는 이탈리아라이그라스가 생체중 2,076kg/10a로 가장 생육이 왕성하였고 두과 사료작물은 다른 작물이 재배되는 지구에서만 가능하였고, 유채는 직파보다 이식이 증수되었으며 보리와 밀은 생육이 극히 불량하였으나 인경류인 양파, 마늘, 쪽파는 재배가 가능하였다. 따라서 제염이 어느 정도 진전된 간척지구에서 재배가 가능한 작물은 이탈리아라이그라스, 유채, 양파, 마늘, 쪽파, 보리, 밀 등 이었다 (표 6)

표 6. 토양의 염농도 및 수량

작물명	파종기 (월. 일)	수확기 (월. 일)	수량 (kg/10a)	적요	수확 시 표토층 염농도(%)
Tall Fesque	10.25	6.12	736	생육양호	0.47
Orchard grass	"	"	276	생육불량	0.50
ItalianRye grass	"	"	2,076	생육극히 양호	0.50
Red Clover	"	-	-	불가	0.57
Radino Clover	"	-	-	"	0.57
유채(이식)	9.20	6.12	125	생육양호	0.47
유채(직파)	10.25	"	108	"	0.47
양파	9.20	-	-	생육극히불량	0.63
마늘	10.25	6.12	86	"	0.53
시금치	"	5.10	98	"	0.60
쪽파	"	6.12	277	생육양호	0.50
딸기	"	-	-	불가	0.63
쌀보리	"	6.13	256	생육양호	0.43
밀	"	6.13	173	"	0.43

지역별로 차이가 있지만 현재 경작중인 간척지에서 대부분 벼가 재배되고 있으며 이외 농작물은 재배가 시도되었지만 재배가 안되며 자라고 있는 식물은 염생식물인 함초와 또는 갈대 등만이 자라고 있다 (그림 4).

한편 영산강 간척지의 경우 일시 경작을 위해 갈대 제거 및 로터리 작업(4회)을 시행하여 콩을 파종하였으나 염기, 갈대 및 방동사니 등의 피해로 인해 작물(콩) 재배가 전혀 되지 않았다.



그림 4. 전북 김제 새만금 간척지(좌측 함초)와 전남 해남 영산강 간척지(우측, 갈대) 식물생육 상태

- 높은 석력함량과 심층토의 경반화 등의 요인으로 인하여 경운이 어려우며 한편 작물재배를 위한 용수원 개발을 위하여 인근 지하수 활용한 소류지 조성하였다. 그러나 작물재배를 위한 지하수질의 적정성 여부와 간척지 재배면적을 충족시킬 수 있는 적정 농업용수 수질에 부합되는 지하수량을 확보할 수 있는가에 대한 연구가 미미하다 (그림 5).



그림 5. 전남 해남 영산강 간척지 지표면 암석 현장(좌)과 지하수 개발 현장

계화도 간척지와 같은 경우 간척지토양의 pH는 중성 이하로 조사되었지만 새만금과 같은 신간척지의 pH는 7 이상으로 이거나 벼를 재배 시 간척지토양은 환원상태로 존재하여 요소를 질소

원으로 공급 시 요소전환 특성에 따른 가용화율이 감소하는 반면 암모니아 가스 등으로 손실되는 질소의 양이 많은 것으로 알려져 있다. 이는 염농도 뿐만 아니라 질소원으로 가해지는 비료 종류에 따른 재배 기간 중 질소전환 과정과 질소형태에 따른 질소 이용률 증대와 관련하여 적절한 토양관리방안이 적용되지 않았기 때문인 것으로 추정된다.

## 2절 간척지 속전화

한편 최근 우리나라의 쌀 소비는 감소 추세에 있는 반면 채소류, 과수류 등 발작물은 그 수요가 크게 늘어나고 있어 간척지에서 벼 재배보다 발작물 재배가 중요하게 되었다. 또한 간척지의 고도이용과 부가가치 증진을 위해서도 발작물 재배는 중요하다.

국립식량과학원 간척지농업과에서 조사한 바에 따르면 초기 염농도가 약 1.6% (약 25 dS m<sup>-1</sup>)인 미사질양토(표층)와 미사질식양토(심층)를 자연강우를 이용하여 벼재배임계농도인 염농도 0.3% (약 4.7 dS m<sup>-1</sup>)로 낮추는데 소요된 제염시간을 살펴보면 표토(0~10cm)의 경우는 약 40년 그리고 심토(60~120cm)는 약 90년이 소요된다 (그림 6).

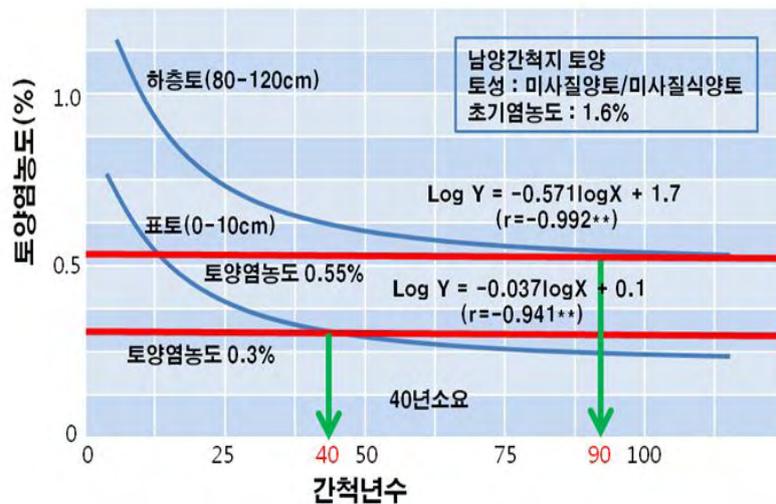


그림 6. 자연강우에 의한 토층별 제염기간 산정

계화도의 경우 포승통의 경우 영농 후 약 50년의 시간이 지났음에도 불구하고 벼재배임계농도인 염농도 0.3% (약 4.7 dS m<sup>-1</sup>) 보다 높은 0.44% 정도로 조사되었으며 광활과 문포통의 경우 영농 후 20년 정도 시간이 지난 후부터 벼재배임계농도인 염농도 0.3% 이하로 감소된 것을 확인하였다. 따라서 계화도 간척지의 경우 세사양토~사양토의 경우 약 20년, 그리고 미사질양토의 경우 33년 내지 약 50년 정도 소요되는 것으로 추정하였다 (그림 7).

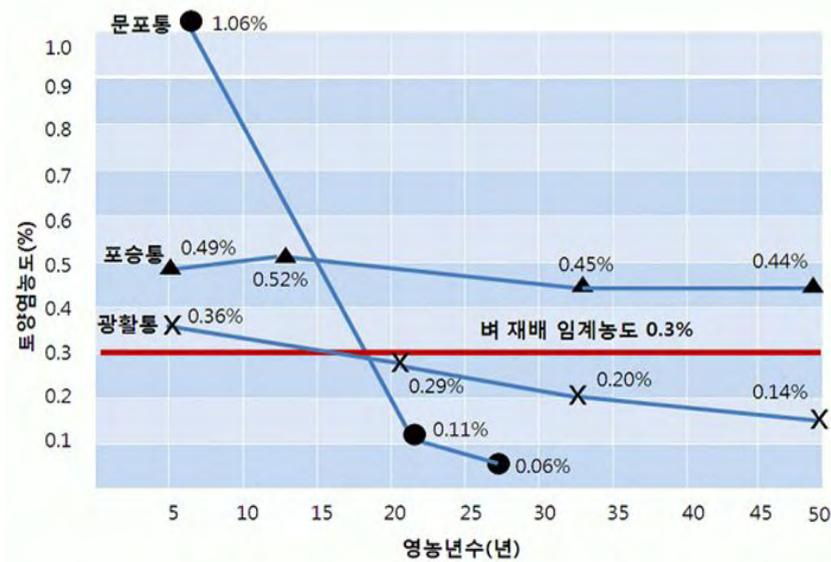


그림 7. 새만금간척지 토양통별 영농기간에 따른 토양염농도 변화

염해토양의 개량에 있어서 가장 중요한 요소로는 염분 농도와 제염을 위한 수리전도도 (Hydraulic conductivity)가 있다. 투수성이 비교적 양호한 토양에서 효과적인 제염방법은 지하배수를 실시하여 지표면으로부터 염분을 용탈시키는 방법이 보편적으로 실시돼 왔다 (구자용 등, 1986). 그리고 객토와 동시에 Ca 및 생고 등의 시용과 지하 배수시설에 의한 제염방법도 실시되고 있다 (한국의 간척지 농업, 2002). 따라서 간척지농업과에서 실시한 연구 결과를 토대로 제시한 간척지 토양 조기 속전화 방안은 제염과 토양개량으로 나누어 속전화 방안을 제시하였다 (그림 8).



그림 8. 간척지 토양 조기 속전화 방안

## 2. 염류집적 토양 관리

지금까지 간척지에서 제염에 관한 연구는 주로 담수를 통한 염류의 용탈 또는 환수를 통한 확산제염에 관한 것이 대부분으로 고염도의 간척지에서 염류의 모세관 상승을 막는 재염화 차단에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

염류소둔성 토양은 과잉의 가용성 염류와 교환성 Na를 토양으로부터 제거시키기 위하여 Ca 염을 첨가하고 충분한 배수 용탈을 통하여 염류토양이 아닌 상태로 전환시키는 방법을 이용하였

다. 석고나 석회석 분말을 첨가하는 것은 교환성 Na를 침출 시키고, 침출된 Na를 중성의 황산 염이나 탄산염으로 전환시키기 위한 것이다. 그밖에 황의 분말을 사용하면 느린 하나 산화되어 황산이 생성되며, 용액의 Na과 결합하거나 CaCO<sub>3</sub>를 용해시켜 가용성 Ca이 교환성 Na과 치환되어 토양의 pH와 물리적 상태가 좋아지게 된다. 작물별 적정 전기전도도 수준에 다르기 위해서는 염류집적이 높은 식물의 뿌리 근처의 염류농도는 낮추는 적절한 조치가 필요하다. 염류제거 기술로는 다음과 같은 것이 있다.

**긁어내기(Scraping)**는 토양표면에 집적된 높은 농도의 염류를 기계를 이용하여 일시적으로 제거하는 제한적인 방법이다. 궁극적으로 염류를 제거하는 데에는 문제점이 있다.

**세척(Flushing)**은 토양표면에 물을 가하여 표면에 집적된 염류를 제거하는 방법이나 세척 처리에 의한 염류 제거량은 미미하여 실질적인 방법으로 사용하는 데에는 문제점이 있다.

**용탈(Leaching)**은 염류집적이 높은 식물의 뿌리 근처의 염류농도는 낮추는 가장 효과적인 방법으로 담수 형태로 표면의 염류를 침투시켜 제거하는 방법이다. 용탈은 토양수분함량이 낮거나 지하수위가 깊을 경우 효과적이다. 여름에 용탈을 실시할 경우 증발산이 높아 효과가 감소된다.

**용탈요구량 (Leaching Requirement, LR)**

LR은 토양의 염농도를 어느 일정 값 이하로 유지시켜 작물의 수확량 감소를 방지하기 위한 근권 밖으로 염류를 용탈시키는 데에 필요한 최소용수량이다. U.S. Salinity Laboratory는 용탈요구량을 관개수량에 대한 배출수량의 비로 정의하고 있다. 이것은 관개수의 전기전도도가 주어질 때 원하는 배출수의 전기전도도에 의하여 결정된다.

$$LR = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}} = \frac{EC_{iw}}{5 * EC_e - EC_{iw}}$$

여기서 EC<sub>iw</sub>는 관개수의 전기전도도이며, EC<sub>dw</sub>는 배출수의 전기전도도, EC<sub>e</sub>는 작물생산량이 감소하기 시작하는 염류도, 그리고 LR은 용탈요구량이다. 관개를 할 때에는 토양수분을 적정하게 유지하기 위하여 필요한 관개수량에 용탈요구량을 가산하여 관개해야만 염류의 집적을 방지할 수 있다. 관개수량은 다음과 같이 계산하였다.

관개수량 = 염류제거 토양 깊이(d) + LR\*d

소든토양 개선 방법은 교환성 상태의 소듐을 제거하거나 칼슘이온으로 근권내 소듐을 대체하는 것이다. 석고(gypsum)나 염화석고(calcium chloride) 아니면 황산이나 화을 직접 토양에 사용하여 토양내 교환성소듐을 용출시킨다. 유기물을 사용하면 분해과정 중 칼슘이 수용화되

어 토양내 교환성소듐을 제거하는데 도움이 된다. 소듐집적토양을 개선은 크게 3가지로 구분할 수 있다.

- 수용성 칼슘 처리(gypsum, calcium chloride 처리)
- 산이나 산 형성물질 처리(sulphuric acid, iron sulphate, aluminium sulphate, lime-sulphur, sulphur, pyrite, 등)
- 저용해성 칼슘염(분쇄 석회석)

토양개량제 처리(amendment)는 석회석(gypsum) 등을 처리하여 교환성염기를 제거한 후 용탈 등의 방법을 적용하여 토양내 염류농도를 낮추는 방법이다. 토양개량제 선택이나 처리량 등은 실내 시험을 통하여 결정하는 것이 바람직하다.

배수를 통하여 근권에 잔류하는 과잉염류를 용탈시키기 위해서는 염류농도가 낮은 양질의 관개수를 사용하여 과잉의 염을 제거함으로써 가능한데, 토양을 따라 용탈 되는 염류의 빠른 제거를 위해서는 효과적인 토양배수체계를 갖추는 것이 필수적이다. 배수(drainage)는 염류를 제거하는 가장 효과적인 방법이나 토양의 깊이, 압밀층 또는 심층토양의 토성 등과 관련이 깊다. 배수는 명거배수(surface drainage), 암거배수(subsurface drainage), 양수배수(pump drainage), 그리고 여과상으로 나누며 암거배수는 다시 표면수로(open ditch), 지중터널배수(mole drain), 기타로 구분할 수 있다.

### 3절 온실가스

인도네시아 발리에서 개최되었던 제 13차 유엔기후변화협약 회의에서 전 세계 농업분야의 메탄과 이산화질소 배출은 1990년부터 2005년까지 17% 증가했으며 현재의 정책과 체제를 그대로 유지할 경우 아산화질소 배출량의 경우 2030년까지 35~60% 증가할 것으로 전망하고 있다. 1997년 12월 기후변화협약 제3차 당사국총회에서 온실가스 배출을 줄이기 위해 교토의정서를 채택한 후 여러 가지 산업 활동으로 인해 발생한 온실가스 배출량 저감에 대한 각국의 노력이 이루어지고 있는 가운데 우리나라의 경우, 1997년의 온실가스 배출량을 이산화탄소 양으로 환산한 경우의 산업부문별 각각의 기여도는 농축산부문 3%, 에너지부문 84%, 산업공정부문 9%, 폐기물 관리부문 9% 이다.

온실효과를 일으키는 온실기체들 중에 이산화탄소는 주로 에너지사용 및 산업공정에서 발생하고, 메탄은 주로 폐기물, 농업 및 축산분야에서, 아산화질소는 주로 산업공정과 비료사용으로 인해 발생되며, CFCs, PFCs, SF6 등은 냉매 및 세척용도의 사용으로부터 배출된다. 이 물질들 가운데 이산화탄소가 전체 온실가스 배출량 중 80% 이상을 차지하고 있다. 우리 농업에서

발생하는 온실가스의 종류는 크게 메탄과 아산화질소, 그리고 이산화탄소가 있다. 이산화탄소는 농작물의 탄소 동화작용을 통해 직접 이산화탄소를 흡수하기도 하지만 농기계에 사용되는 연료나, 퇴비 같은 유기물이 분해되면서 많은 양이 발생된다.

온실기체의 증가로 인한 다양한 전 지구적 변화는 생태계와 인간에게 큰 영향을 주며 인간의 식량문제와 밀접한 관계가 있다. 작물재배에 있어서 어려움이 생기며, 해수온 상승으로 인한 해양 생태계 변화가 생기게 된다. 또한 폭우와 폭풍, 해일과 홍수, 가뭄과 산불 등의 자연재해로 인간의 생명과 재산의 손실을 가져오게 된다.

우리나라는 2009년에 2020년 온실가스 배출전망치 대비 30% 감축목표를 설정하고 이를 위해 2011년 7월 산업부문별로도 감축목표를 할당하였다. 이를 위해 농업부문도 논물관리, 가축장내 발효 개선, 분뇨처리 개선 등을 통해 2020년 배출전망치 대비 7.1%의 감축의무를 부여받아 농업부문은 오는 2020년까지 에너지 분야에서 16만 8,000 CO<sub>2</sub> eq(6개 온실가스를 CO<sub>2</sub>로 환산한 양), 비에너지 분야에서 134만 9,000 CO<sub>2</sub> eq를 감축해야 하였다.

탄소는 유기물의 중요한 핵심구성원소로서 약 50% 이상을 차지하였다. 탄소격리란 다양한 저장고에 탄소의 저장량을 증가시키는 개념이다. 탄소격리는 지하의 지질층, 육상생태계, 해양, 미생물 등에서 가능하다. 한편 토양탄소격리란 대기의 이산화탄소를 고형의 유기물형태로 토양에 가둬놓는 과정으로 격리된 탄소는 대기로 다시 쉽게 방출되지 않는다.

토양탄소격리는 화석연료로부터 배출되는 온실가스를 저감시킬 뿐 아니라 토양의 질 향상, 생산성 및 소득 향상, 수자원 보호, 생물다양성 확보, 환경의 완충용량 증대 등 많은 유익한 기능을 제공하기 때문에 매우 중요하다. 토양은 가장 큰 탄소의 수용체이다. 지구상 토양의 탄소저장 용량은 약 2조5000억 톤에 달하며 토양에 의한 탄소격리는 향후 50년 동안 대기로 부터 대기에 존재하는 탄소의 약 5%에 해당되는 약 400 억 톤의 탄소를 제거시킬 수 있는 것으로 평가되고 있다.

이러한 토양탄소격리는 무경운 또는 최소경운, 지표식물재배, 가축분뇨 활용 등 비교적 간단한 토양 관리방안으로 해결할 수 있으나 비효율적이며 환경 친화적인 기후온난화와 관련한 토양탄소격리는 등한 시 되어 왔다.

### 1. 기후변화에 따른 토양관리

탄소는 기후 변화 뿐만 아니라 농업생산성 향상에 있어 가장 핵심 관리요소이다. 대기 중의 이산화탄소의 농도증가는 대기의 온도를 상승시켜 온실효과를 가져오지만 탄소의 토양내 축적을 통한 토양탄소의 증가는 대기 중의 온실가스의 감축과 동시에 작물의 생산성 향상을 가져

온다. 따라서 기후변화를 완화하고 식량의 생산량을 증가하는 효과적인 방법은 대기 중의 탄소를 고정하여 토양 중에 효과적으로 저장하는 것이다. 토양탄소의 축적을 통한 지구온난화 완화의 토양 관리적 선택 사항은 다음과 같이 요약할 수 있다.

벼의 생육기간 중 전부 또는 일정 기간 동안 토양을 건조시켜 호기 상태로 만든다면 혐기분해로 발생하는 메탄가스의 발생을 효과적으로 제어할 수 있다. 최근의 연구 결과는 발벼재배를 통하여 90% 이상의 메탄가스 발생을 줄일 수 있었고 벼의 생육도중 1-2 주간씩 교대로 물을 빼는 간단관개재배를 통하여 45%의 메탄가스의 발생을 억제하였으며 이를 통해 관개수의 25-50%를 절약할 수 있었다. 현재는 재배기술의 낙후와 품종의 미개발 등으로 수량감소(~10%)와 쌀 품질 저하 등이 기술적 과제로 남아 있다. 그리고 과도한 경운은 토양의 탄소를 쉽게 대기 중으로 방출시키는 결과를 초래하게 되어 온실가스 배출을 가중시키는 결과를 얻게 된다.

토양의무경운농법에 의한 토양탄소의 축적효과에 대한 연구결과가 발표되고 있으며 미국 시카고 온실가스배출권거래소에서는 농경지의 무경운에 따른 탄소축적에 대한 탄소배출권 거래를 허용하고 있다. 그러므로 논에서 무경운 또는 저경운에 대한 탄소축적 및 온실가스 감축효과 연구가 진행되고 있다.

## 2. 피복작물 재배

남부 일부지방을 제외하고 이모작이 어려운 우리나라의 대부분이 지역에서는 봄부터 가을 수확기를 제외한 대부분의 농한기에는 농경지가 비어있게 된다. 따라서 이러한 농한기 토양에 적절한 작물을 재배하면 토양의 유실을 방지하며, 이듬해 봄에 토양으로 환원하였을 때 토양의 비옥도를 향상시키는 것은 물론이고 많은 양의 탄소를 토양에 저장할 수 있다. 최근 우리나라 남부지방에서 겨울철 피복작물로 재배되는 자운영과 중부지방에 재배되는 헤어리베치는 콩과식물로 탄소 고정과 함께 뿌리혹박테리아를 통한 질소고정을 하게 된다. 1ha에서 재배된 피복작물은 약 75-120kg의 질소를 고정하여 질소비료를 상당량 대체 할 수 있으며 상당량의 이산화탄소 감축 효과가 있다. 따라서 겨울철 재배된 피복작물은 전량 토양으로 환원하면 토양의 비옥도를 향상시키는 효과뿐만 아니라 온실가스 감축에도 상당부분 역할을 할 수 있다.

## 3. 물절약 벼재배 기술

논농사에 있어서 물의 사용과 관리는 매우 주요한 요인 중의 하나이며 물관리를 위한 비용 또한 상당부분 차지하게 된다. 우리나라 90%이상의 벼는 담수상태에서 재배되는데 잡초의 발생 억제 쌀 수량 및 품질의 증가 등이 담수 벼 농업을 하는 주요 원인이다. 토양이 담수상태로 장시간 있게 되면 토양내 공기의 이동이 차단되어 토양이 혐기 상태로 있게 된다. 공기가 잘 통하는 토양의 유기물은 일반 호기성 미생물에 의해서 분해가 되며 분해 산물로 이산화탄소가

생성 된다. 그러나 혐기 상태에서는 토양 중에 있는 혐기성 미생물이 유기물을 분해하면서 부산물로 메탄을 발생 하게 된다. 메탄은 대기 중에서 이산화탄소보다 21배나 많이 지구온난화 역할을 하게 된다. 전 세계에서 발생하는 인위적인 메탄의 24%가 담수상태의 논에서 발생하고 있다. 일모작의 경우 ha의 논에서 연간 170kg(하루에 약 1.5kg)의 메탄가스를 발생하며 약 3.5톤의 이산화탄소의 배출을 하게 된다. 따라서 논에서 메탄가스의 발생을 억제하는 것이 온실가스 감축에 있어 매우 중요한 과제도 대두되고 있다. 논에서 물대는 기간을 줄이는 간단관개 등의 기술을 적용하면 수량감소를 최소화하면서 메탄의 발생을 줄일 수 있다. 한편 논에 물을 전혀 관개하지 않고 벼를 재배하는 무관개재배는 메탄발생을 90 이상 감축할 수 있으나 수량성이 매우 떨어지는 등의 단점이 있다.

전술한 무경운재배, 피목작물의 재배, 및 물관리 등의 기술은 상당한 수준의 유기탄소를 토양에 저장하는 효과를 갖고 있지만 토양내에서 지속적으로 분해가 진행되기 때문에 영구적으로 탄소를 저장할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 보다 많은 양의 탄소를 영구적으로 저장하기 위한 방법으로 바이오차(Biochar)를 이용하는 방법이 검토되고 있는데, 바이오차(Biochar)는 바이오매스의 열분해과정의 부산물이다. 즉 나무나 왕겨 및 볏짚을 산소가 매우 제한된 조건에서 열분해(연소) 시킨 후 생산되는 부산물이며 우리가 흔히 알고 있는 숯과 다르지 않다. 바이오매스의 열분해 과정에서 생산되는 바이오오일과 바이오가스(Biogas)는 에너지원으로 사용할 수 있다. 생산된 바이오차(Biochar)를 농경지에 적용하게 되면 토양의 물리화학적인 특성의 개선과 토양비옥도의 개선을 통하여 생산성을 높이게 된다. 1ha에서 생산된 농업부산물 전량(7-9톤)을 열분해 한 후 생산되는 바이오차(Biochar)를 전량을 토양에 환원한다면 5.1-6.6톤의 이산화탄소 감축 효과를 얻을 수 있다. 바이오차(Biochar)에 대한 농업적 적용효과에 대한 연구결과가 아직 많지 않지만 수천년 동안 바이오차(Biochar)가 집적되어 온 브라질 아마존 밀림의 "Terra Preta" 토양의 경우 주변의 토양과 비교해 매우 높은 토양생산성을 나타내고 있다.

#### 4. 탄소 격리 및 저장

산업화와 공업화가 진행되면서 석유, 석탄 등의 화석연료의 사용이 늘어나기 시작하였다. 화석연료는 연소되면 엄청난 에너지를 발생시켜 에너지 동력원으로서 중요한 역할을 하고 있다. 특히 석탄은 매장량이 풍부하고 가격이 저렴하여 그 사용량은 꾸준히 증가하고 있는 추세이며, 이에 따른 석탄회의 발생량도 늘어나고 있다.

화석연료의 연소과정에서 발생하는 석탄회는 주성분이 규소와 알루미늄 산화물로 이루어진 fly ash 와 Bottom ash 로 구분할 수 있다. 화력발전소에서 석탄이 연소되면서 입경 1~10 mm 정도의 석탄회가 바닥에 쌓인 것을 Bottom ash 라 하며, 이는 입체적으로 다공성의 표면을 가지고 있어 많은 미생물들이 흡착되기에 적절한 조건을 가지고 있다 (정장희, 2001; 임종욱, 2002; 조문석, 2008; 윤명근, 2010). 또한 Bottom ash 는 fly ash 에 비하여 pH 가 중성에 가깝고 중금속 함량이 낮은 특성을 가지고 있으며 전체 발생회량의 10~15% 정도 차지한다(정장

회, 2001; 임종욱, 2002; 조문석, 2008).

Bottom ash 는 대부분 매립하여 처리되기 때문에 방대한 면적의 매립장이 지속적으로 필요하다. 이렇게 매립하여 처리하다 보면 침출수가 유출되는 등 주변 환경을 오염시켜 국토를 이용하는데 효율성을 떨어뜨리는 문제점이 있으며, 특히 국내의 Bottom ash 는 가용성 염화물인 염화소듐 및 염화칼륨 등을 다량 함유하고 있어 매립이나 재활용 이전에 특별한 전처리가 요구된다. Bottom ash 를 매립 하였을 때 발생할 수 있는 문제로 인하여 최근에는 Bottom ash 의 재활용 비율을 높이고 있는 추세이다 (Ahn et al., 2007; 환경부·국립환경연구원, 2003; 조영도 등, 2007). Bottom ash 를 재활용하는 방법들로 방음벽, 도로포장용 물질, 시멘트 산업 (Pera et al., 1997; Toshihisa et al., 1998; Van der Sloot et al., 2001) 에 이용하거나, 건축용 벽돌이나 인공골재를 제조할 때 이용하는 등 (안지환, 2006) 많은 방법으로 산업 분야에 이용되고 있다.

1997년 12월 기후변화협약 제3차 당사국총회에서 온실가스 배출을 줄이기 위해 교토의정서를 채택하였다. 교토의정서를 비롯하여 여러 가지 산업 활동으로 인해 발생한 온실가스 배출량 저감에 대한 각국의 노력이 이루어지고 있는 가운데 우리나라의 경우, 1997년의 온실가스 배출량을 이산화탄소 양으로 환산한 경우의 산업부문별 각각의 기여도는 농축산부문 3%, 에너지 부문 84%, 산업공정부문 9%, 폐기물 관리부문 9% 이다. 기후변화협약에서 논의되고 있는 배출 감소 노력이 미래 농업의 중요한 지표가 되기 위해 (이상엽 외, 2000) 농경지에서 배출되는 온실가스 저감 효과를 파악하는 것이 필요하다. 이에 따라 본 연구는 Bottom ash 를 이용하여 농경지의 탄소 저장량 증대, 온난화가스 저감 효과 및 Bottom ash 의 특성 인자에 관하여 조사하였다.

간척지토양은 일반적으로 매우 높은 염농도를 가지고 있다. 토양 중 높은 염분 함량은 식물에 염 스트레스(salt stress)를 주는데, 염류에 의한 장애는 3가지 수준에서 식물체에 손상을 준다. 첫째는 고농도의 염 특히, 높은  $\text{Na}^+$  농도는 점토의 분산을 일으키고 토양의 공극을 감소시켜 토양의 공기와 수분의 유통을 악화시킨다는 점이고, 둘째는 고농도의 염은 생리적 가뭄(physiological drought)의 한 가지 형태인 낮은 수분퍼텐셜을 발생시켜서 수분과 양분의 흡수를 어렵게 하며, 셋째는  $\text{Na}^+$ 와  $\text{Cl}^-$  등의 이온에 의한 독성 효과이다(Hopkins and Hüner, 2004). 서남해안 신간척지 토양은 대부분 점토함량이 낮은 반면 미사의 함량이 높고 지하수위가 높으며 투수성이 불량하고 염농도가 높기 때문에 객토와 동시에 Ca 및 생석고 등의 시용과 지하 배수시설에 의한 제염이 바람직하다. 특히 담수하에서의 토양산화환원특성과 토양 pH에 따른 처리 비종 등이 결정되어야 하며 더 나아가 발작물 재배를 위한 토양관리방안도 함께 개발되어야 할 것으로 판단된다. 특히 지표면에서 증발산에 따른 염상승과 분포에 따른 염류집적 방지와 알칼리성 상태로 존재하는 토양에 대한 개선 방안이 매우 필요한 것으로 판단된다. 따라서 상기에서 조사 평가한 결과를 토대로 간척지를 효과적으로 이용할 수 있는 개선방향을 모색하여야 하였다. 따라서 간척지를 효율적으로 활용하기 위해서는 간척지 토양에 대한 제염이 선행되어야 하였다.

그러나 현재까지의 간척지토양에서 연구는 제염 연구 위주로 연구가 실시되었고 기존에 수행된 연구의 대부분이 제염방식에 따른 작물수량검정 연구로 제한적임을 알 수 있다. 따라서 수도를 비롯한 작물 생육 연구에 있어서 간척지 토양 특성에 따른 질소와 인의 토양내 동태를 조사하여 질소와 인의 작물체내 흡수율을 증가시킬 뿐만 아니라 기존의 질소 시비량을 감소시키기 위한 간척지토양에서 질소와 인의 효율적 관리 방법 연구가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 기존 또는 신규간척지가 가지는 있는 염류와 작물재해를 위한 토양 관리 측면에서 간척지로부터의 에너지 작물 바이오매스 생산성 증대 및 저탄소·녹색성장 녹색기술 개발을 위하여 1) 온실가스 발생저감과 농업생산성 향상 토양구조 개선과 관리 기술 개발; 2) 농경지 유기탄소 발생 저감 및 온실가스 축적(흡수) 증대 유·무기질 시비 작부 체계 개발; 3) 에너지 작물 바이오매스 생산 증대 작물재배법에 의한 농업환경 보전과 수익성 향상; 끝으로 4) 자원 재활용을 통한 농업생산성 향상과 농업분야 친환경 녹색기업 활성화를 목표로 연구를 수행하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 1절 간척지 토양 개선 연구

#### 1. 국내 간척지 토양의 이화학 특성

우리나라의 간척지 토양은 모두 47개 토양통이며, 논토양은 5개 유형, 밭토양은 2개 유형으로 분류된다. 이들 토양은 토성이 미사질양토~미사질식양토이며, 배수등급이 약간불량~불량~매우불량한 토양으로 벼 재배에는 큰 문제가 없으나 밭작물 재배에는 토양배수 등의 문제로 적합하지 못하다(유, 2008). 지하수위에 따라 토양의 형태 및 토색이 상이하며 지하수의 영향으로 기층은 심히 환원되어 토색이 청회색 내지 암회색을 나타내고 액화상태이며 토양중 반문은 거의 형성되어 있지 않다. 작토 및 심토층은 각각 회갈색, 암회색을 나타내고, 농적갈색의 Mn 반문을 포함하며 무구조이다 (그림 9).

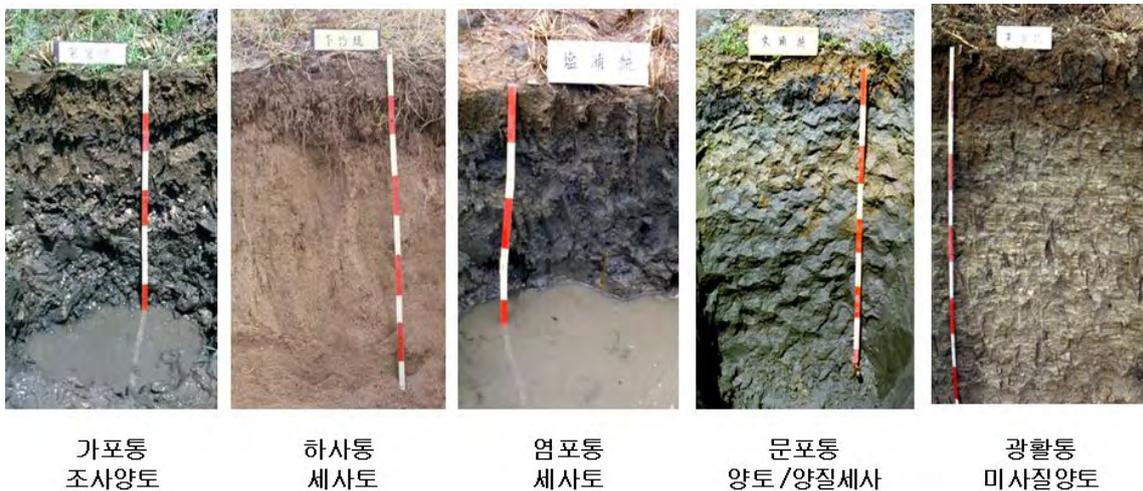


그림 9. 간척지 토양통별 토양단면 구조와 지하수위

토양통별 간척지 토양의 이화학적 특성을 살펴보면 표층에 해당하는 A 또는 Ap층의 깊이는 20 cm 이내이며 대부분 하부에 C층이 바로 연결돼 있다 (그림 10). 그리고 A 또는 Ap층의 입도분포를 살펴보면 점토함량은 광활통의 경우 8.5%가 최대로 조사되었다 (표 7).

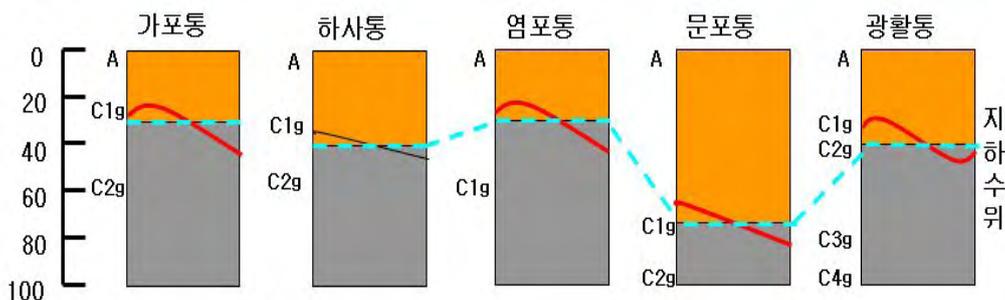


그림 10. 간척지 토양통별 지하수위 분포 특성

간척지토양의 토양입자분포 특성을 살펴보면 새만금지역의 광활통의 경우 지표면 30 cm 이내에서는 미사함량이 50% 이상 존재하며 다음 모래가 약 40%, 그리고 점토가 10% 이하로 존재하고 있다(유, 2010). 따라서 점토 크기에 가까운 미사함량이 증가할수록 토양내 공극의 크기는 감소하여 배수가 불량해진다. 그리고 토양에 가해지는 질소공급원인 요소 전환에 영향을 미치는 토양 pH는 염포통과 포승통을 제외한 나머지 토양통 모두에서 7 이상 알카리토양으로 조사되었다 (표 7). 그리고 염류농도는 조사된 모든 토양통에서 4 dS m<sup>-1</sup> 이상으로 작물체가 자라는데 부적합한 것으로 판단된다.

표 7. 간척지 토양의 물리화학적 특성

토양통	층위	깊이 (cm)	입도분포			토성	pH (1:5)	OM (%)	Ex. cation (cmol kg <sup>-1</sup> )				염농도	
			모래	미사	점토				Ca	Mg	Na	K	(%)	dS m <sup>-1</sup>
			(%)											
하사	AP	0~13	94.8	1.8	3.4	FS	6.8	0.24	1.2	0.45	1.4	0.08	0.30	4.69
	C1	13~21	92.4	3	4.6	FS	7.7	0.31	1.5	0.33	1.4	0.1	0.20	3.13
염포	AP	0~10	69.7	25.3	5	FSL	5.6	0.56	1.2	1.41	4	0.23	1.00	15.63
	C1g	10~55	75.9	20.9	3.2	LFS	5.5	0.47	1.3	1.31	3.9	0.11	0.60	9.38
문포	AP1	0~8	47	46.5	6.5	FS	6.7	0.80	1.5	3.6	2.4	0.26	0.60	9.38
	AP2	8~18	51.7	42	6.3	FS	8.1	0.24	1.5	3.5	3.2	0.39	0.80	12.50
	C1g	18~70	87	10.5	2.5	FS	8.1	0.19	1.6	2.84	3.6	0.5	1.30	20.31
광활	AP1g	0~12	26.6	68.1	5.3	SiL	7.4	0.81	3.5	4.4	2.9	0.55	0.70	10.94
	AP2g	12~22	36.7	54.8	8.5	SiL	8.1	0.35	2.9	5.3	4.4	1.14	0.90	14.06
	C1g	22~35	19.3	60.6	20.1	SiL	8.0	0.63	1.9	5.6	2.7	1.2	0.90	14.06
포승	AP	0~10	7.3	69.1	23.6	SiL	4.6	2.01	5.3	2.3	2.5	2.46	0.80	12.50
	B1	10~25	4.6	64.3	31.6	SiCL	5.8	1.39	4.4	2.68	1.6	0.18	0.60	9.38
	B2g	35~50	5.4	68.2	26.4	SiL	6.6	1.22	5.4	2.99	2	1.84	0.70	10.94
	Cg	80~140	10.6	61.8	27.6	SiCL	7.1	0.6	6.1	3.63	1.3	0.11	2.20	34.38

신간척지 토양은 대체로 지하수위가 높고 미사함량이 많아 투수성이 불량하기 때문에 수직배수에 의한 제염이 어렵다. 지하수위가 거의 같은 문포통과 광활통의 염농도를 비교하여 보면 미사와 점토함량이 많은 광활통과 포승통에 비하여 조립질인 문포통에서 염농도가 낮다. 이러한 경향은 건기에 지하수층의 염분이 모세관상승현상으로 표면에 집적되며 토양중의 점토함량이 높을수록 모세관력이 증가하고 미사함량이 높을수록 용작밀도가 증가하여 투수가 불량한데 기인된 것으로 추정되며 반대로 점토함량이 낮은 문포통은 염분의 표토 집적량이 감소되므로 염분농도가 비례적으로 낮다

## 2. 토양 pH 변화

유(2009)가 조사한 간척지구별 년차적 토양산도변화를 조사한 결과를 살펴보면 토양 pH는 낮아지는 것으로 조사되었으나 대부분 간척지지구에서 조사된 토양 pH는 알카리에 해당하는 것으로 조사되었다. 따라서 이러한 토양 pH의 변화는 토양에 가해지는 질소형태에 영향을 미쳐 작물체내로의 이동과 용탈 등에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 토양 pH와 유기물함량 간의 상관관계는 없는 것으로 해석된다. 그리고 토양에 잔류하는 인(P) 함량은 P로 환산 시 오마지구에서 최대 31.44 mg kg<sup>-1</sup>이었으며 5년 후 16.59 mg kg<sup>-1</sup>으로 약 47 % 정도가 감소한 것으로 추정된다 (표 8).

표 8. 지구별 간척지 토양의 기초이화학 특성

지구명	pH		OM		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	(1:5)		(g kg <sup>-1</sup> )		(mg kg <sup>-1</sup> )	
	1년차	5년차	1년차	5년차	1년차	5년차
완 도	8.2	8.3	9.3	8.7	18	12
만 덕	7.8	6.8	10.8	8.8	37	21
남 포	7.6	7.1	3.4	4.2	14	26
보 전	8.4	8.3	2.1	5.0	14	10
강 산	8.0	7.9	17.0	10.0	22	12
서산 A	6.8	6.4	9.9	8.2	40	29
소 포	8.0	7.6	13.3	10.2	30	25
해창만	8.3	8.1	13.3	12.4	36	22
계 화	6.2	6.2	8.6	7.3	37	36
오 마	6.3	6.2	11.6	9.4	72	38

간척 후 5년간 토양통별 pH와 유기물함량변화 결과는 지구별 조사 결과와 마찬가지로 대부분 토양통의 토양 pH는 알카리에 해당하는 것으로 조사되었다. 따라서 알카리에 해당하는 토양에서 작물 재배 시 질소원으로 요소를 시용 시 상대적 손실량이 높았을 것으로 추정된다. Cabrera (1991) 등이 조사한 결과에 따르면 토양 pH가 6.5에서 9.5로 증가함에 따라 요소형태로 토양에 가해진 질소원으로부터 암모니아가스 발생이 급격히 증가되어 손실율이 큰 것으로 보고되었다. 따라서 pH 7 이상의 간척지 토양에 요소를 질소원으로 처리 시 암모니움태나 질산태 형태의 가급태 질소원은 매우 적을 것으로 추정된다.

토양 및 지구별 토양화학성 변화 중 토양산도는 토양 및 지구별 년차간 변화는 약간 낮아졌다. 토양별로 볼 때 포송통은 간척년대가 경과할수록 높아졌으나 포두통, 광활통, 염포통, 문포통은 낮아지는 경향이였다. 그러나 1년차에 비하여 5년차에는 계화지구의 광활통, 염포통, 문포통은 같은 산도를 보였으나, 완도지구의 포두통 등은 모두 낮아졌다. 한편 유기물 함량은 1년차에서 5년차로 진행됨에 따라 조사된 토양통 모두에서 유사 또는 낮아지는 경향을 보였다 (표 9).

표 9. 토양통별 간척지 토양의 pH와 유기물함량 변화

토양명	지구명	pH (1:5)		OM (g kg <sup>-1</sup> )	
		1년차	5년차	1년차	5년차
포승통	만 덕	7.7	6.8	8.2	5.3
	서산A	8.2	7.0	9.2	10.0
	소 포	7.8	7.4	11.5	8.8
	해창만	8.2	8.0	16.0	14.3
포두통	완 도	8.2	8.3	9.3	8.7
	보 전	8.4	8.3	0.9	6.4
	강 산	8.0	7.9	17.0	10.0
	소 포	8.2	7.7	15.1	11.6
	해창만	8.4	8.2	10.6	10.6
광활통	오 마	6.3	6.2	11.6	9.4
	만 덕	7.8	6.8	13.4	12.3
	서 산	6.4	6.3	8.6	7.6
염포통	계 화	6.2	6.2	9.7	9.7
	보 전	8.3	8.2	3.3	3.4
문포통	계 화	6.0	6.0	6.8	6.0
	남 포	7.6	7.1	3.4	4.2
	서산A	5.8	5.8	12.0	6.9
	계 화	6.5	6.5	9.2	6.2

### 3. 토양의 산화환원상태

토양의 산화환원상태는 토양통기성과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 호기상태에서 산화환원 포텐셜은 +400 내지 +700 mV의 범위를 가지나 담수상태에서 산화환원포텐셜은 -250 내지 -300 mV 정도의 범위를 나타낸다 (그림 11). 논과 같이 초기부터 담수상태로 시작하는 토양에서는 식물체가 질소원을 양분으로 이용하기 전 탈질화과정을 거치거나 아니면 용탈과정을 통하여 손실이 발생하였다.

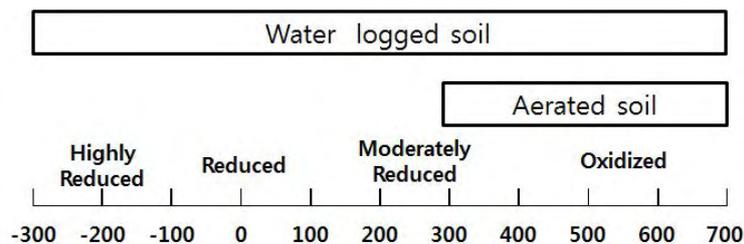


그림 11. 토양수분상태별 산화환원포텐셜 범위

전복통의 토양 Eh 변화는 출수기 이후까지 경반층은 산화상태인 반면에 작토층은 환원상태를 나타내고 있는데 (표 10) 이와 같이 경반층 내의 산화상태에서는 유·무기태질소, 인산, 철 등의 양분가급도가 저하될 수 있다. 그리고 질소질원으로 토양에 공급되는 요소의 경우 토양에서 가급태인 암모니움이나 질산태로 전환되는 과정에 토양수분함량이 영향을 미치며 요소가수분해(Urea hydrolysis)는 토양수분함량이 질량수분함량 기준 약 20%부터 포장용수량에 이르기까지는 증가하나 포장용수량 이상과 질량수분함량이 약 20% 이하의 경우 요소가수분해율은 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다(Vlek and Carter, 1983; Savant et al., 1983). 그리고 토양의 산화환원전위는 토양에 가해지는 질소질비료의 전환과정에 영향을 미친다.

표 10. 수도재배 논토양 작토층과 경반층내 Eh 변화

구 분	경과 일수 별 Eh (mV)									
	7.29	8.3	8.9	8.17	8.24	8.31	9.7	9.14	9.21	9.28
작토층	-183.2	-165.2	-209.6	-327.4	-289.2	-179.8	-8.6	-104.8	-107.2	19.2
경반층	32.2	19.6	54.0	32.8	33.4	-65.4	-143.4	-64.8	-68.2	-49.4

최초 답수일 : 5월 15일 경

Lindau (1989) 등이 발표한 자료에 따르면 요소(Urea)의 가수분해는 산화상태에서는  $0.054$  to  $0.094 \text{ h}^{-1}$  ( $t^{1/2} = 7.4$  to  $13.8 \text{ h}$ )이나 환원상태에서는  $0.028$  to  $0.062 \text{ h}^{-1}$  ( $t^{1/2} = 11.2$  to  $24.8 \text{ h}$ )로 급격히 낮아지는 것으로 조사되었다. 그리고 요소의 손실율은 환원상태에서  $0.403 \text{ h}^{-1}$ 이나 산화상태에서는  $0.369 \text{ h}^{-1}$ 로 환원상태에서의 요소손실율이 더 큰 것으로 조사되었다.

#### 4. 간척지 토양의 투수성

매질의 투과성과 연관된 가장 중요한 매질의 특성은 공극률, 매질을 구성하는 입자의 크기와 모양, 입자의 배열, 고상의 비표면적이다 (Michaels and Lin, 1954). 토양내 가용성염류와 치환성소듐은 각각 토양입자의 응집현상과 분산현상에 밀접한 관계가 있으며 토양의 투수성에 큰 영향을 미치고 있다. 또한 가용성염류는 토양용액의 삼투압을 증가시키고 치환성소듐은 토양용액의 sodicity를 증가시키는 주원인이 된다.

점토광물의 응집(flocculation)과 해교(deflocculation) 및 팽윤(swelling)의 용이성은 공극의 구조에 영향을 미치고 결국 수리전도도에 영향을 준다. 점토입자의 팽윤으로 공극의 일부 또는 전체가 막힐 수 있고, 해교·분산·점토 이동에 의해 토양의 공극이 막힐 수 있다(Quirk and Schofield, 1955).

침투수의 전해질농도가 어느 한계치 이하인 경우 토양의 치환성소듐백분률(Sodium

exchangeable percentage, ESP)이 증가함에 따라 수리전도도가 감소하지만 전해질농도가 한계치 이상이면 치환성소듐 백분율이 높을지라도 수리전도도는 크게 감소하지 않는다 (Quirk and Schofield, 1955). 그러나 이 한계치는 토양의 종류에 따라 다르며 토성이 비슷한 토양이라 할지라도 실험을 하지 않고 일반적으로 예측하기는 대단히 어렵다 (Frenkel et al., 1978, McNeal and Coleman, 1966; Rhoades and Ingvalson, 1969).

치환성 Na의 수준을 달리한 토주실험 결과, 소듐염류액(sodic water)으로 관개된 표토 토양에서 수리전도도 감소의 주된 원인은 분산된 점토입자에 의한 공극의 막힘이었다(Frenkel et al, 1978). 적갈색 사질토양의 수리전도도 변화에 있어 치환성소듐백분율이 높고 0.01N 이상의 염농도 조건에서는 점토의 팽윤이 수리전도도 저하의 주된 기작이고, 낮은 치환성소듐백분율(ESP)와 매우 낮은 농도의 토양용액에서는 점토의 분산과 이동이 토양공극을 막는 주요 기작이 된다(Pupisky et al, 1979).

석회질토양에서 치환성  $Mg^{2+}$ 은 수리전도도와 점토의 분산에 특별한 효과를 나타내지 않았으나  $CaCO_3$ 을 가지지 않은 풍화된 토양에서는 수리전도도 감소와 점토의 분산에 있어 분명한 효과를 나타내었다(Alperovitch et al, 1981). 점토(smectite)-모래 혼합물에서 점토의 팽윤(swelling)과 분산은 수리전도도의 변화를 설명하였는데, 각각의 기여도는 토양의 치환성소듐(ESP)과 토양용액의 전해질 농도에 의존하였다(Alperovitch et al, 1985).

점토의 팽창과 분산은 토양의 수리전도도를 감소시키는 원인이 되지만 ESP 가 25~30%를 초과하지 않는 한 팽창현상은 주목할 만한 것이 아니며, 전해질농도가  $10\text{meq L}^{-1}$  이하인 경우에는 10-20% 범위에서도 분산현상이 나타난다고 보고되었다(Aylmore, 1959; Quirk, 1968; Shainberg et al, 1971).

Rhoades and Ingvalson(1969)은 토양의 투수능력을 감소시키는 실질적인 작용은 점토의 팽창보다는 분산에 의한 것이라고 말함으로써 토양의 HC에 영향을 미치는 점토분산의 중요성을 강조하였으며, Frenkel et al.(1978)은 분산된 점토입자에 의한 토양공극의 폐쇄현상은 ESP가 20이하일 때 모든 점토에 있어서 HC를 감소시키는 주요한 원인이라고 결론지었다. Felhendler (1974) 등은 토양의 HC를 ESP 와 삼투수 염분농도의 함수로서 표시하였고 Shainberg 등(1981)은 HC 와 분산률의 변화는 치환성소듐과 염분농도에 매우 민감하며 염분농도가  $3.0\text{meq L}^{-1}$  일때 ESP가 12%를 초과하는 경우 HC와 분산률이 감소된다고 발표했다.

Na-점토-모래(Na-smectite-sand) 혼합물에서  $Mg^{2+}$ 는 저농도의 치환성 Na에 의한 토양입단의 파괴를 막는데 있어  $Ca^{2+}$ 보다 효과가 적었다. 또한 Na-Mg-smectite는 Na-Ca-smectite보다 팽윤(swelling)이 증가하였다(Shainberg et al., 1988). Na/Ca-Montmorillonite-sand 혼합물의 수리

전도도는 침출액의 전해질 농도가 낮아짐에 따라 감소하였다(Keren et al., 1988).

세립질 토양에서 포화조건하에서의 수리전도도는 토양의 미세구조에 의존하고, 이는 다시 토양 내에 존재하는 점토광물의 종류와 치환성양이온의 조성 및 공극수의 전해질 농도에 의존하였다. 바다점토(Marine clay)의 수리전도도는 흡착된 양이온의 원자가와 크기에 크게 영향을 받으며 흡착된 양이온의 원자가 증가하는 압밀(consolidation)속도를 빠르게 하고, 수리전도도를 높이며, 흡착된 양이온의 원자가가 같은 경우에는, 흡착된 양이온의 수화된 반지름이 커질수록 수리전도도와 압밀속도가 낮아졌다. 수리전도도의 감소는 점토의 분산과 해교(deflocculation)에 관련이 되었고, 치환성양이온의 낮은 원자가와 큰 수화반지름은 확산이중층의 반발력을 우세하게 하여 분산과 해교(deflocculation)을 증가시켰다(Rao et al., 1995).

두 종류의 비소듐염토(non-sodic soil)의 토주 실험결과, 분산된 점토의 양과 수리전도도 사이에 부의 관계(negative relationship)가 성립하였다. 이는 점토의 분산과 이로 인한 공극의 막힘이 K값을 감소시키는 원인이 됨을 나타낸다(Bolan et al., 1996). 상대수리전도도 ( $K/K_0$ )는 전해질 농도의 감소에 따라 감소하였는데, 이는 침출되는 동안 점토의 재집적에 따른 공극 반지름의 감소에 기인한다(Dikinya et al., 2004).

새만금 광활포장의 토양깊이별 투수성과 경도 조사 결과를 살펴보면 지표면으로부터 25cm부터 55 cm 까지는 투수가 거의 되지 않는 불투수층이 존재하고 있었다. 그리고 이불투수층의 경도는 18 mm 이상으로 작물의 뿌리가 자랄 수 없는 토양의 특성을 가지고 있다 (표 11).

표 11. 토양깊이별 투수성과 경도 변화

토양깊이 (cm)	투수성 ( $\text{cm hr}^{-1}$ )	경도 (mm)	용적밀도 ( $\text{g cm}^{-3}$ )
0-25	0.63	13.8	1.34
25-55	0.00	21.8	1.40
55-95	0.37	19.4	1.37
95 <	0.46	17.4	1.46

#### 5. 간척지토양의 제염과정 중 전기전도도 변화

오 등(1979)은 확산에 의한 염분의 이동이 간척지 제염에 얼마나 기여하는가를 정량적으로 평가하기위해 수분이 포화된 토양계에서 염분의 확산계수를 측정하고 이에 따라 담수 및 확산에 의해 제염할 때, 염분함량의 변화, 확산제염 속도의 경시적 변화, 담수깊이가 확산제염에 주는 영향 등을 시험하였다.

Koo and Eun(1988)은 실내실험을 통해 간척지토양의 제염과정중 수리전도도의 경시적 변화 분석하고, 관련인자들 사이의 회귀분석을 하였다. Koo et al.(1989)은 충분한 제염용수량을 확보할 수 있다는 가정아래 물관리방법에 의한 실내제염실험을 수행하고 제염과정중 염분거동과 제염효과를 분석하였는데, 물관리 방법으로는 연속담수, 간단담수에 의한 침출법, 수세법을 사용하였고, 제염진행중 전기전도도, 치환성소듐 백분율, pH, 수리전도도 등의 변화와 이들 사이의 상관관계를 통계적으로 분석하였다.

Kim et al.(1997)은 계화도간척지에서 1979년부터 1983년까지 5년간 암거배수 시공 후 암거간격 및 년차에 따른 제염 효과 및 쌀수량을 검토하여 보고하였다. Koo et al.(2001)은 실내모형실험과 Lysimeter 제염시험에서 얻은 자료를 이용하여 제염방법 및 토성별 제염과정중 제염용수량의 증가에 따른 전기전도도의 변화를 분석하였다. Son et al.(2000)은 간척지의 배수양호토양과 배수불량토양을 채취하여 Lysimeter를 이용하여 토성별로 물관리방법에 따라 벼 재배시험을 수행하여, 벼생육기간 중 논물과 토양의 염분농도 변화를 분석하였다.

#### 6. 간척지 토양의 토양개량제를 이용한 투수성 개선

제염과정은 일종의 용질이동으로 용매인 토양수분의 이동과 병행하여 일어난다. 따라서 관개라는 방법으로 간척지토양의 높은 염농도를 낮추고 있다. 그러나 일정한 수준 이상의 치환성  $\text{Na}^+$ 이온이 존재하는 토양의 경우에는 염류의 제염이 진행됨에 따라 전해질의 농도가 낮아지므로 토양의 수리전도도가 저하하여 제염속도가 떨어지게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 관개를 할 때 토양개량제를 처리하게 된다. 염류토양의 개량에 필요한 토양개량제의 양은 토양내 존재하는 치환성  $\text{Na}^+$ 이온의 함량에 의하여 결정되는데, Oster는 석회물질과 토양내 치환성  $\text{Na}^+$ 이온간의 반응정도는  $\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}$ 치환상수, 토양내 치환성  $\text{Na}^+$ 이온의 양, 토양개량제의 용해도, 치환·해리산물의 이동정도 등에 의존한다고 보고하였다(Yoo and Lee, 1988).

간척지 논토양에 석고비료를 사용하면 Ca 성분이 토양교질을 개선하여 토양중 치환성 Na 및 Mg 함량은 줄고 Ca 함량은 증가되어 제염이 촉진된다(Oh, 1990; Oh and Park, 1992). Koo와 Nham(1986)은 염해토양의 제염과정 중 석고처리별 수리전도도의 영향을 분석하였다. Yoo and Lee(1988)는 석고 및 탄산석회의 처리농도와 혼합방법, 그리고 퇴비사용 여부에 따른 제염효과를 구명하기 위하여 제염의 진행경과에 따른 토양의 이화학적 특성 변화를 조사하였다. Oh(1990)는 탄산칼슘, 수산화칼슘, 규산칼슘, 석고를 사용하는 실내 실험을 통해 해성염토의 제염에 주는 효과를 분석하였으며 또한 간척지 토양의 제염에 대한 탄산석회와 벚짚의 병용효과에 관한 컬럼시험을 수행하였다. Sohn et al.(2000)등은 간척 논에 부산석고비료를 처리하고 벼 생육과 수량 및 토양화학성분 변화를 검토하였다.

#### 7. 간척지토양의 제염용수량 산정

Koo et al. (1989)은 간척지토양의 제염용수량 산정을 위한 기초연구로 침출법과 수세법에 의한 용수관리방법으로 제염실험을 수행하여 공급수량 증가에 따른 전기전도도 및 치환성소듐백분률의 감소경향을 분석하였다.

Oh(1990)는 토주시험을 통해 개흙에 석고를 사용하고 세척할 때 녹어나오는 염분과 투과되는 수량과의 관계를 조사하여 제염에 소요되는 수량을 밝히는 시험을 수행하였다. 손 등(2000)은 Lysimeter 시험을 통해 간척답에서 토성별·물관리 방법별 제염용수량을 결정하기 위한 제염 시험을 실시하였다. 구 등(2002)은 현장 Lysimeter 제염시험에서 얻은 시험자료를 이용하여 실시한 회귀분석 결과를 토대로 간척지토양의 제염과정 중 염분농도 변화, 수리전도도의 변화, 용탈용수량 및 침출시간을 추정할 수 있는 제염예측 프로그램 (PTDRT : Prediction Techniques for Desalinization in Reclaimed tidelands) 을 개발하였다. Son et al. (2002)은 Lysimeter 시험을 통해 간척답에서 작물재배전의 제염용수량, 재염화방지 용수량, 벼 생육시기별 소비수량 등을 결정하여 개발초기 고염도 간척답의 관개용수량 산정시험을 하였다.

대부분의 간척지 토양의 염농도는 관수 및 토양개량제의 사용으로 일시적으로 저하가 가능하나, 담수를 중지하였을 때는 지하부로부터 수분의 모세관상승을 따라 염류의 상승이 지속적으로 일어나 토양의 표면에 염류가 집적되는 재염화현상이 일어난다. 이와 같은 염의 상향이동 및 표면축적은 지표면에서의 수분증발과 밀접한 관계에 있으며 제염과정은 일종의 용질이동으로 용매인 토양수분의 이동과 병행하여 일어난다(유순호 등, 1988).

염해토양의 개량에 있어서 가장 중요한 요소로는 염분 농도와 제염을 위한 수리전도도 (Hydraulic conductivity)가 있다. 투수성이 비교적 양호한 토양에서 효과적인 제염방법은 지하배수를 실시하여 지표면으로부터 염분을 용탈시키는 방법이 보편적으로 실시돼 왔다. (구자용 등, 1986). 그리고 객토와 동시에 Ca 및 생고 등의 시용과 지하 배수시설에 의한 제염 방법도 실시되고 있다 (한국의 간척지 농업, 2002).

#### 8. 간척지 토양의 이화학 특성과 작물 생육

간척지 토양내 염류는 종류에 따라서는 식물체의 여러 생리적 반응에 필수적으로 요구되지만 일반적으로 간척지 토양에서는 식물생육에 유해할 정도의 높은 농도로 존재하였다. 농어촌연구원(2006)에 발표한 자료에 따르면 간척지의 제염단계별 재배대상 작물은 간척초기부터 저염도에 이르기까지 4단계로 구분하여 최종 단계의 염농도는 0.1 ‰(약 4.7 dS m<sup>-1</sup>) 정도에 대한 염농도별 재배가능작물을 제시하였다 (표 12).

표 12. 염농도별 재배 가능 작물

(농어촌연구원, '06)

토양성숙 단계	염분농도(%)	재배 방안	재배대상작물
1단계(초기)	0.3% <	제염에 효과적인 자생 염생식물 재배	자생 염생식물(갈대, 칠면초, 통통마디 등)
2단계(고염도)	0.17~0.30	유기물 공급 효과 큰 제염(경관)식물	유채, 자운영, 해바라기, 메밀, 목화
3단계(중염도)	0.10~0.17	저항성 사료작물 또는 경관작물 재배	국화, 카네이션, 석류, 무화과, 올리브, 시금치, 베고니아, 토마토, 토마토, 무화과, 꽃양배추
4단계(저염도)	0.10 >	경제작물 재배 가능	옥수수, 감자, 상추, 양파, 프리지아, 가지, 양배추, 딸기, 배, 포인세치아, 안스리움, 자두, 배추, 당근, 양상추, 파프리카

벼 수량은 수도 품종, 토양의 생산력, 재배관리기술, 기상 및 각종 환경요인 등에 좌우된다. 벼수확량을 증가시키기 위한 방법으로는 토양특성을 수도의 생육에 알맞도록 유지시키는 화학적인 개량과 작토층 및 근권확대를 위한 심경, 객토 및 배수개선 등의 물리적 개선방법이 있다. 박(2008)이 발표한 2002년도 해창만지구 간척지구(간척연대 33년)별 시비량 및 수량을 살펴보면 질소시비량을 10a당 21.9 kg을 시용 시 쌀수량은 10a당 평균 480 kg으로 전국 평균의 약 90 % 이상이었으나 2001년도 계화도 간척지(간척연대 : 33년, 2001년)의 경우 문포통, 염포통, 광활통에서 질소시비량을 평균 10a당 20 kg 처리 시 쌀수확량은 10a당 평균 515 kg 정도로 조사되었다 (표 13).

표 13. 2002년도 해창만지구 간척지구별 시비량 및 수량

시비량(kg 10a <sup>-1</sup> )			품종별 쌀수량 (kg 10a <sup>-1</sup> )							
질소	인산	칼리	남평(55)	동안(13)	주남(6)	일미(6)	동진(3)	기타(6)	평균	비고 (계화)
21.9	4.5	8.0	465	477	494	473	495	479	480	515

( )안은 재배 농가수

계화도 간척지 토양에 존재하는 인(P)의 함량은 약 14.4 mg kg<sup>-1</sup>이며 경작 연수가 증가함에 따라 간척지토양에 남아 있는 인의 함량은 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다(유, 2009). 반면 계화도 간척지에서 1990~1991년까지 2년간 시비량을 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 10a당 20-13-10kg 처리 시 쌀수확량은 10a당 관행에서 224 kg, 객토구에서 가장 높은 412 kg 정도를 수확한 것으로 조사되었다. 그리고 김(2009)이 발표한 자료에 따르면 벧집과 정조에 함유된 인의 함량은 표준시비의 경우 1.204 kg (쌀 수확량 185 kg 10a<sup>-1</sup>)이나 부산물석고가 처리된 논 의 경우 2.266 kg (쌀 수확량 325 kg 10a<sup>-1</sup>)으로 약 1.9배 정도 인의 함량이 증가되는 것으로 조사되었다. 그러나 계화도 간척지의 경우 토양에 함유된 인의 함량은 10a당 약 3.17 kg 정도로 표준시비 시 흡수된 인함량의 2.63배, 그리고 부산물석고 처리 시 흡수량의 약 1.4배 정도로 조사되었다. 상기에서 살펴본 바와 같이 간척지에서 질소시비량은 일반 논토양의 2배 이상이나 수확량은 일반 논에서의 평균수확량 이하이나 벧집과 정조내의 질소와 인의 함량이 증

가할수록 수량도 증가하는 것으로 조사되었다.

가. 질소시비와 수량생산 특성

전남도원(1979)에서 연구한 바에 의하면(표 14) 토양 염농도별 10a 당 적정 시비량은 고농도에서는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 28.0-8.3-10.6 kg 10a<sup>-1</sup> 이며, 중농도에서는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 23.0-9.1-8.3 kg 10a<sup>-1</sup> 이며, 저농도에서는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 19.3-5.7-8.2 kg 10a<sup>-1</sup> 로 속담보다는 증시를 하여야 하나 저농도일수록 감비를 실시하여야 한다고 제시하였다.

표 14. 염분농도별 적정 시비량

구분	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O	
	(kg/10a)					
	최고수량	적정치	최고수량	적정치	최고수량	적정치
고농도(0.5%)	28	28.0	8.4	8.3	10.8	10.6
중농도(0.3%)	24.1	23.0	9.8	9.1	8.5	8.30
저농도(0.1%)	20.4	19.3	5.8	5.7	8.3	8.20

벼의 양분 흡수량을 살펴보면 염농도가 높은 신간척지에 석회물질을 사용하고 2년간 벼 재배시 벧짚과 곡실의 질소흡수량은 2년차에 부산석고 > 소석회 > 표준시비 > 탄산석회 > 무비구 순으로 부산석고 시용구에서 가장 많았고, 석회물질 중에서 탄산석회 시용구에서 가장 낮았다 (표 15).

표 15. 수도체의 질소와 인 흡수량

(단위 : kg 10a<sup>-1</sup>)

구분	1년차			2년차			수량							
	벧짚		정조	벧짚		정조	수량	지수						
	질소	인	질소	인	질소	인	kg 10a <sup>-1</sup>	(%)						
표준시비	1.94	0.25	3.99	1.38	5.93	1.63	2.31	0.78	2.47	1.20	4.77	1.98	185	100
무비구	1.62	0.24	3.50	1.33	5.12	1.57	1.58	0.59	2.49	1.08	4.07	1.67	174	94
부산석고	2.39	0.25	5.42	2.02	7.81	2.27	2.03	0.73	4.58	2.01	6.60	2.73	325	176
소석회	2.69	0.55	6.68	2.63	9.37	3.18	1.67	0.43	3.69	1.59	5.36	2.01	263	142
탄산석회	1.52	0.20	3.61	1.21	5.14	1.40	2.13	0.77	2.23	1.02	4.36	1.78	160	84

그리고 벧짚과 정조에 흡수된 질소량을 권장시비량과 비교해 볼 때 질소이용율은 각각의 처리구 중 소석회 처리구에서 질소이용율이 가장 높았으나 최대는 저농도에서 50 % 미만인 것으로 조사되었다. 그리고 질소이용율은 1년차에서 2년차로 작기가 증가됨에 따라 질소이용율은 1년차에 비해 40% 이상 감소하는 것으로 조사되었다(표 16).

표 16. 토양개선 처리구별 권장기준 대비 질소이용율

처리구	질소흡수량 (kg 10a <sup>-1</sup> )		질소이용율(%)					
			고농도		중농도		저농도	
	1년차	2년차	1년차	2년차	1년차	2년차	1년차	2년차
표준시비	5.93	4.77	21.2	17.0	25.8	20.7	30.7	24.7
무 비 구	5.12	4.07	18.3	14.5	22.3	17.7	26.5	21.1
부산석고	7.81	6.6	27.9	23.6	34.0	28.7	40.5	34.2
소 석 회	9.37	5.36	33.5	19.1	40.7	23.3	48.5	27.8
탄산석회	5.14	4.36	18.4	15.6	22.3	19.0	26.6	22.6

국립식량과학원(1985)에서 발표한 간척지에서 벼재배에 적합한 질소비료 종류에 대한 연구 결과를 살펴보면 (표 17) 요소질비료보다는 모든 처리 염농도에서 유안형태의 질소질 비료가 수량생산성이 더 높은 것으로 조사되었다. 이는 높은 pH와 환원상태에서 암모니아 형태 손실되는 질소량이 유안이 요소보다 작기 때문인 것으로 추정된다.

표 17. 간척지 벼 재배에 알맞은 질소비료의 종류 ('85 국립식량과학원)

비종	고농도		중농도		저농도	
	쌀수량	수량지수	쌀수량	수량지수	쌀수량	수량지수
	kg/10a	(%)	kg/10a	(%)	kg/10a	(%)
요 소	222	100	307	100	414	100
유 안	238	107	339	110	440	106

질소분시 방법에 따른 수량 생산특성을 살펴보면 기비부터 최종 출수기까지 질소질 비료를 분비가 실시되면 상대적 수도 생산수량도 증가하는 것으로 조사되었다. 이는 수도재배기간 중 담수와 배수에 따른 토양의 산화환원전위 변화에 의한 질소이용효율차이에 의한 것으로 판단된다(표 18). 유(2009)는 염해지 논에서 질소 흡수이용률과 수량이 증가시키기 위하여 질소시비량을 10a당 20kg 정도로 늘리고 밀거름을 20% 정도 사용하고 2주일 간격으로 6회 이상 분시하는 것을 제시하고 있다. 그리고 질소질비료는 가급적 유안, 인산질비료는 과린산석회, 칼리질비료는 황산가리로 시용하며 10a당 인산은 8kg 전량 기비로, 칼리는 8kg을 기비 3.2kg, 분얼비 2.4kg, 수비 2.4kg으로 3회 분시를 제시하였다.

표 18. 질소분시 방법에 따른 수량

질소분시방법(%)						쌀수량 (kg/10a)	수량지수 (%)
기비	분얼비	최고분얼비	유수형성기	수잉기	출수기		
40	30	-	20	-	10	348	100
30	20	20	20	-	10	397	114
20	20	20	20	10	10	424	122
10	10	20	20	20	20	382	110

개량제 처리 후 벼재배 기간 중 작토층의 토양의 화학성의 변화를 살펴보면 토양산도는 표준 시비의 경우 중성범위를 유지하였으나 소석회와 탄산석회처리구에서 토양 산도가 7.5 이상으로 증가하는 것으로 조사되었다. 따라서 토양개량제 처리에 따른 토양 산도 증가는 토양으로부터 암모니아 휘산에 의한 질소질비료의 손실증가로 연결될 수 있다. 한편 사질간척지 토양인 문포통은 토성이 작토층으로부터 경반층까지 세사양토로 토양에 개량제시용과 함께 심경을 하여 수도를 재배한 결과 27%~84% 가 증수되었다 (표 19).

표 19. 수도재배기간 중 간척지 토양 pH의 변화

구분	시용 후 경과 시간(일)									
	1년차					2년차				
	43	57	87	116	155	316	331	361	392	427
				성숙기					성숙기	
표준시비	6.9	6.2	5.8	6.5	7.3	6.5	7.7	7.3	6.0	7.1
소 석 회	7.9	7.3	6.5	7.1	8.4	8.3	6.4	6.3	8.3	8.2
탄산석회	7.9	7.7	6.9	7.5	8.4	8.5	8.2	8.2	8.7	8.5
부산석고	6.7	7.1	6.2	6.6	7.8	6.5	6.0	7.1	6.7	6.2
무 비 구	6.9	6.7	6.2	6.8	7.2	6.2	7.3	6.1	6.1	7.2

처리 전 토양 pH : 6.7

#### 나. 간척지 제염시험

간척지 제염시험은 1977년에 경운방법 시험, 1978년 우물펌핑 시험, 벗짚 석고 등 개량제에 의한 제염시험을 주로 하였고 1980년대에 들어서 논에 대한 암거배수 제염시험을 한 바 있다. 특히 2000년대에 이르러 강우 담수 제염 시험, 간척지 화훼 및 수목시험을 하였지만 이 모두 제염시험 이라고는 할 수 없고 단순히 간척지를 활용하기 위한 염농도 적응시험이었다고 할 수 있다. 2006년 4월 새만금 방조제를 막은 후에는 환경보전 정책 및 논 농업 다양화 정책에 의하여 간척지를 주로 밭으로 이용하지 않으면 안 되게 되어 있다. 동작물인 사료맥류 작물이나 내염성 작물은 염농도가 낮은 비교적 지대가 높은 곳에서 재배할 수 있지만 간척지에

고소득 상업작물을 재배하기 위해서는 반드시 암거배수 시설을 해야만 하였다.

한편 외국의 사례를 보면 일본에서는 일찍부터 노지채소, 시설국화와 같은 원예작물을 재배하기 위하여 배수기반 조성 시험을 수행하였다. 간척지 밭 뿐 만 아니라 일반 밭에서도 습해를 방지하기 위하여 기본 암거 및 보조 암거 시설에 관한 시험을 수행하였다. 일본에서는 주로 나가사키현 종합농림시험장에서 옥수수, 수수, 세스바니아 등을 재배하기 위하여 명거, 암거 등 제염 및 녹비작물에 의한 토양개량 시험을 수행하였다. 중국에서는 간척초기에 제염을 촉진하기 위해서 대규모 하천과 관정을 파거나 지대가 높아서 제염이 이루어진 곳에는 벼를 심고 낮은 곳에는 담수어 양식을 하는 등 현실적인 간척지 이용, 즉 실사구시 정신으로 간척지를 활용하고 있다. 한편 전 국토가 간척지로 구성되어 있는 네델란드에서는 이미 오래 전에 간척지 제염에 관한 연구를 끝마치고 지금은 개발한 기술을 종합하여 이집트, 인도, 아프리카 등 개발도상국에 염해지 토양 제염 및 개량에 관한 교육과 컨설팅을 실시하고 있는 상업화 단계에 이르렀다.

간척지에서 염분상승을 억제하는 방법으로는 휴립과 비닐 멀칭이 주로 검토되고 있다. 김과 유(1989)는 감자와 목화를 재배하면서 휴립, 퇴비 시용 후 휴립, 생고시용 후 휴립, 휴립 후 비닐 멀칭, 휴립 후 골 관수 등의 처리를 하여 그 효과를 비교하였다. 그 결과 감자 생육 기간 중 염농도의 변화는 수확기에 평휴 재배에서 0.63%상승하였지만, 휴립 후 멀칭한 곳에서는 0.42%로 염분의 상승이 억제되었다고 하였다. 이에 따라서 감자의 수량도 염분 상승이 억제된 비닐 멀칭구에서 증수 되었으며, 퇴비시용 후 휴립구에서도 증수의 효과가 있었다고 하였다. 목화 재배 시험구에서도 감자 재배 시험구에서와 비슷한 경향이었으나, 휴립 후 골관수구에서는 습해가 심하였다고 보고하였다.

이러한 결과를 토대로 이들은 간척지에서 밭작물 재배에 고품을 추천하고 있고, 또한 경운과 휴립은 추계에 실시하는 것이 바람직하다고 제언하고 있다. 한편, 최 등(1983)은 해남의 배수가 불량하고 점토함량이 많은 간척지에서 황토를 재료로 하여 두께 20~80cm로 복토를 하거나 모래 차단막을 지하에 설치하여 여러 가지 작물을 재배하면서 모래차단막과 복토의 효과를 얻을 수 있었다고 하였다. 기존 간척지에 대한 현장조사와 토양에 대한 분석결과 가장 문제가 되는 것이 염농도와 지하수위라고 알려져 있다. 따라서 신 간척지를 밭으로 이용하고자 할 때는 지하수위를 지표로부터 60cm이하 깊이로 낮추어 재염화가 쉽게 일어나지 않도록 하여야 하고, 이를 위하여 배수체계의 정비가 무엇보다도 시급하다고 하였으며, 투수성의 유지와 염과 토양양분의 균형, 그리고 관개수의 조절이 필요하다고 하였다. 또한 간척지의 작부체계를 세우기 위해서는 대상 작물에 대한 내염성뿐만 아니라 내습성도 고려해야 한다고 지적하였다.

외국의 간척지 사례를 살펴보면 일본 아키다현에 있는 하치로가타 간척지는 1966년에 방조제

가 완공된 이후 1968년부터 영농이 시작되었으며, 내부공사를 진행한 다음 1977년 3월에 모든 공사가 완료되었다. 하치로가타 간척지 내에서 발생하는 유출수는 중앙간선배수로에 설치된 배수장을 통해 배출되고 있다. 한편, 담수호의 수위가 간척지보다 높기 때문에 관개용수는 간척제방에 설치된 취수구를 통해 유입되어 용수간선과 용수 지선을 통해 자동 관개하는 시스템을 갖춘 농업단지가 된 것이다. 이러한 농업기반을 조성한 결과, 농경지에서 발생하는 배출수는 집수구를 통해 배수장으로 도착하여 담수호로 양수한 후 다시 농업용 관개용수로 순환하여 이용하고 있어서 농업용수이용효율 증진과 담수호 수질보전에 기여하고 있다. 이같이 잘 발달된 용수와 배수구조 시설에다 농가의 포장별로 개폐형 암거배수시설을 설치하여 식물의 근권으로 부터 지하위 염분수가 멀어지고 작물이 염분피해를 받지 않아 짧은 기간에 다양한 생물들이 자랄 수 있게 된다(이 등, 2004).

중국 산둥성(禹城)지구의 토양개량 5단계를 소개하면 다음과 같다. 즉 1단계에서는 50~60m 깊이의 관정수를 양수하여 지하수위를 낮추어 지하염분수의 상승을 막고 2단계에서는 4~5m의 배수기반(溝)을 조성하고, 3단계에서는 경사도 0~2%로 평탄작업(平)을 하고 4단계에서는 녹비작물 재배에 의한 토질을 향상시키고, 5단계에서는 녹화조림사업에 의한 표층토의 재염화를 방지하고 6단계에서는 작부체계 개선에 의한 작물생산성을 향상시키고 있다(이 등, 2003). 이곳에서는 천층 지하 염류수의 모관상승에 인한 재염화를 방지하고자 8ha당 1개의 관정을 20~30m 깊이 총 1,050개로 개발하여 양정용량은 시간당 60~80m<sup>3</sup>씩 양정하였다. 이와 같이 지하 염분수를 강제 양수함으로써 지하수중 염농도를 저하시키고, 천층 지하수의 증발을 억제하는 한편, 지하수층 공간형성에 의한 수직배수개선 효과가 있다고 하였다. 포장에서부터 간선 배수구까지 배수구 깊이별로 毛溝, 農溝, 斗溝, 支溝, 干溝를 설치하였다. 여기서 毛溝는 깊이 1.0~1.5m, 100m 간격으로 설치하고, 이들의 집수구에 農溝를 깊이 1.5~2.5m, 500m 간격으로 설치하였다. 또한 斗溝를 깊이 2.5~3.0m, 500~1,000m 간격으로 설치하고, 여기에 支溝를 깊이 3.0~3.5m, 2,000m 간격으로 설치하고, 마지막으로 깊이 4~5m의 干溝를 설치하여 배수를 개선하였다.

이러한 결과로 과거에는 높은 염농도와 수분함량으로 인하여 작물재배가 어려웠던 지역에서도 옥수수, 콩, 면화, 밀 등이 재배되고 있다. 또한 녹화조림사업에 의한 표층토의 재염화 방지 사업에 의하여 염해지구에 포플러 등 수목을 4×10<sup>6</sup>주 식재하고, 4관목 2.5×10<sup>6</sup>주, 과수원 250ha를 조성한 결과 수목류의 증산작용에 의한 지하염분수의 지하수위가 저하되어 수직적 배수가 개선되고, 일평균 온도는 0.7~0.9℃ 낮아지고, 상대습도는 5~15% 증가함에 따라 토양 표면증발량이 10~18% 저하되어 결과적으로 재염화가 방지되었다. 최근에는 지하관개라는 새로운 기술이 개발되고 있다. 이것은 지하에 유공관을 매설하고 장마기에는 배수구 역할을 하여 습해를 방지하고 건조기에는 이를 통해 관수를 함으로써 염분의 상승을 억제하는 기술이다.

그러나 지하관개에 의한 제염방법도 극심한 가뭄기에는 토양 하층으로부터 올라오는 염을

막지 못하기 때문에 안정적인 발작물을 재배하기 위해서는 석탄바닥재와 같은 다공성 물질을 활용하여 대공극 증위를 형성함으로써 재염화 현상을 막을 수 있을 것으로 생각된다.

우리나라 화력발전소에서 생성되는 석탄회는 바닥재(coal bottom ash)와 비산재(coal fly ash)로 분되어지며, 이 중 석탄바닥재는 전체 석탄회 발생량의 약 20~40% 정도를 차지한다(박 등, 2007). 석탄회의 양은 연소 후 약 10~40% 정도의 회분을 배출하고 있으며(이 등 2010), 원탄의 종류 및 발전소에 따라 물리·화학적 조성이 상이하다(김과 박, 2010). 석탄회는 주성분이  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{FeO}_3$ 이며, 수경성은 없으나 상온에서 수분과  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 반응하여 안정한 불용성 화합물을 생성한다(김과 박, 2010). 기존의 석탄회의 용출특성에 대한 연구는 주로 비산재에 대한 연구에 치중하였고 석탄회 발생량의 10~30%를 차지하고 있는 바닥재에 대한 국내의 연구는 미미한 실정이다(이 등, 2002).

그 동안 석탄회의 재활용은 주로 비산재를 중심으로 그 용도 또한 제한적으로 이루어졌으나 석탄회의 재활용을 증대시키고 그 매립량을 줄이기 위해서는 석탄바닥재를 중심으로 한 연구가 필요하다(진과 박, 2001). 석탄바닥재 경우에는 부가가치를 갖는 재활용 사례가 극히 드문 실정으로, 콘크리트용 세골재로서 적용하는 일부 연구가 보고되고 있다(Andrade et al., 2009). 석탄화력발전소에서는 석탄을 미분기로 분쇄하여 뜨거운 공기와 함께 보일러 내로 주입하면서 약  $1,500 \pm 200^\circ\text{C}$  범위의 부유상태에서 연소가 이루어진다(장 등, 2009).

석탄바닥재는 노벽, 가열기, 재열기 등에 부착되어 있다가 보일러 하부로 떨어진다. 이를 분쇄기로 분쇄 후 주로 해수를 이용하여 이송관로를 통해 회사장으로 이동된다. 2010년 기준으로 약 650만 톤의 석탄재가 발생하는 것으로 예상되었다(리사이클백서, 2004). 석탄회의 발생량은 점차 증가하고 있으나 대부분 매립되고 있어 환경보호와 자원재활용 차원에서 석탄바닥재의 재활용에 대한 연구가 시급한 실정이다(이 등, 2010). 석탄 화력발전소가 국내에서 주종을 이루고 있으며, 2015년경에는 연간 약 720만 톤의 석탄회가 발생될 것으로 예상된다(Kim and Kang, 2007; Kim et al., 2010; Kim 2010). 유 등 (2010a,b)은 석탄바닥재층을 가진 다층 토양은 대조토양에 비해 투수성이 높아  $K_{\text{sat}}$ 값이 큰 폭으로 증가한 결과를 나타냈고, 초기 시험토양의 비해 EC값이 저하됨을 보고하였으며, 이 등(2010)은 용탈수의 EC는 석탄바닥재의 처리수준이 증가할수록 용탈초기부터 끝까지 지속적으로 유지되는 것으로 조사되었다.

국외의 경우 석탄회를 이용하여 온난화가스 저감과 토양탄소 저장능에 대한 기술개발자료는 없었으나, 농경지나 토양에 투여하여 토양개량제로서의 효과를 평가한 기술개발자료들이 주를 이루었다. 인도의 Vimal Chandra Pandey, Nandita Singh (2009)에 따르면, 기존의 석탄회 폐기 방법은 농경지를 황폐화시킬 수 있다고 지적하였고, 황폐화된 토양에 석탄회를 첨가하면 토양의 이화학적 및 생물학적 성질을 개선하고 식물의 생장에 필요한 미량영양소 및 다량영양소를 공급할 수 있다고 하였다. 미국에서 수행된 연구로는 석탄회와 계분을 재료로 한

Biosolid 를 혼합 사용하여 토양에 사용하는 연구(Tracy Punshon et al., 2002)와 석탄회와 하수 슬러지 및 그를 혼합한 물질을 토양에 이용할 수 있는지에 대한 연구 (Sajwana et al., 2003)등 석탄회의 단일 사용 및 혼합 사용의 효과를 알아보거나 수계에 미치는 잠재적인 영향에 대한 평가 등이 있었다. 이에 따르면 토양 개량제의 목적으로 중간 정도 또는 낮은 양의 석탄회를 단일 사용하거나 축분 및 슬러지와와의 혼합사용이 가능하고, 식물체 생체량 증가 등의 효과가 있다고 하였다.

Prashanta K Sarangi et al., (2000)가 수행한 각기 다른 비율의 석탄회가 토양 개량제로써 사용된 토양에서 *Oryza sativa* 벼의 성장반응과 토양의 생물화학적 활동을 알아보는 연구에서도 역시 식물체생체량과 곡물수확량이 증가된다고 보고되었다. 녹비와 석탄회를 함께 부숙화하여 만든 조경용 토양의 이화학적 성질과 미생물상에 대한 연구(Belyaeva, Haynes, 2003)에 따르면, 조경용 토양 중 석탄회를 25%가량 첨가하였을때 수분보유력이 증가한다고 하였다.

## 2절 토양환경 조건별 토양내 양분동태와 가용화 영향 요소

### 1. 토양내에서 질소 전환 과정

여러 형태로 질소가 토양 내 유입되면 생물학적, 화학적 영향을 받아 분해가 된다. 예를 들어, 요소의 형태로 질소가 유입되면 가수분해가 되어 암모니아와 이산화탄소를 생성하였다. 일부 암모니아는 대기 중으로 휘산되고, 나머지는 암모늄 형태로 전환이 된다 (그림 12). 암모늄이온은 식물의 뿌리에 의해 흡수 되거나 일산화질소 형태 등으로 방출된다. 또한, 암모늄이온은 *Nitrosomonas* 의 작용으로 아질산 이온으로 산화되며, 이것은 다시 *Nitrobactor* 의 작용으로 질산이온으로 산화된다.

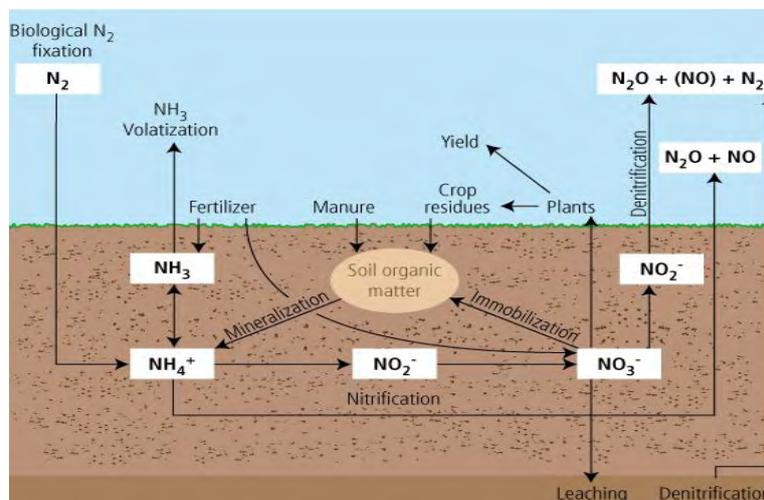
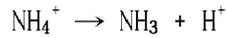
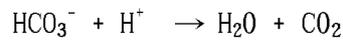


Fig. 12. The soil nitrogen cycle (Adapted from Hofman and Van Cleemput, 2004).

질산이온은 음이온이라 토양에 흡착되어 식물에 의해 흡수 되지만 일부는 탈질작용에 의해 휘산되거나 근권 밖으로 용탈된다. 한편 담수상태하에서 암모늄태 이온 용탈이 증가하는데 이는 담수상태하에서 상존 수두포텐셜이 증가하여 지하수쪽으로 지속적인 용탈을 발생하기 때문이다. 그러나 이러한 현상은 담수상태하에서 유기물을 시용한 경우에도 유사한 현상이 발생하는 것으로 보고되었다 (Kuichi and Omukai, 1959). 한편 토양의 pH가 7.5 이상의 알카리성으로 존재할 때 토양에서는 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 생성되어 대기로 휘발된다.



그리고 상기 과정에서 생성된 수소이온은 중탄산(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)에 의해 중화되어 토양은 계속 알카리성을 유지하였다.



그러나 어느 정도 시간이 경과되면 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> → NH<sub>3</sub> 전환과정에서 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 소모되어 pH는 감소하여 더 이상의 암모니아 휘발은 발생하지 않는다. 그림 3은 담수깊이를 5 cm 깊이로 유지하면서 조사한 토양 pH이다. 그림 13에서 보는 바와 같이 담수초기부터 약 80 시간(약 3.5일) 정도까지 담수상태하에서 토양 pH는 7.5 이상으로 유지되었다. 따라서 조사한 담수초기부터 약 3.5일에 이르는 기간에는 토양에 처리된 Urea는 암모니아 형태로 대기로 휘발돼 갈 것으로 추정된다.

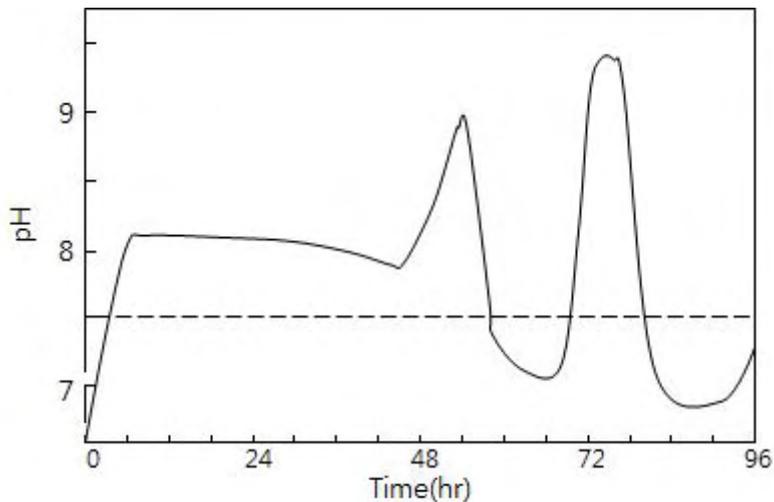


Fig. 13. Dynamics of floodwater pH following broadcast and incorporation of 100 kg N ha<sup>-1</sup> as urea. Floodwater depth 5 cm

Fig. 14는 Vlek and Craswell(1989) 발표한 대기온도와 pH 변화에 따른 암모니아 형태로의 요

소 손실률을 조사한 연구 결과로 대기온도와 pH가 증가할수록 요소손실률 지속적으로 증가하는 것으로 조사되었다.

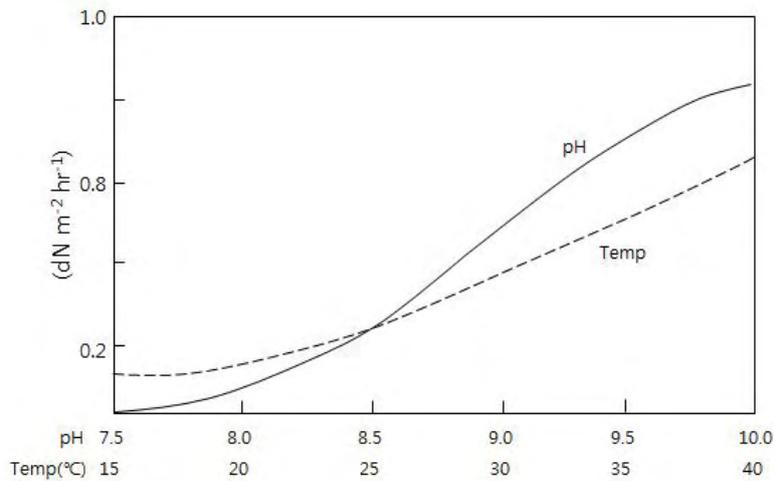


Fig. 14. Variation of ammonia volatilization with temperature and pH following broadcast and incorporation of 100 kg N ha<sup>-1</sup> as urea. Floodwater depth 5 cm. (Vlek and Craswell, 1989)

토양수분함량 조건에 따른 암모니아 휘발손실량에 대한 연구 결과를 살펴보면 (표 20) 토양수분함량이 증가함에 따라 요소손실량은 감소하며 반감기 또한 불포화상태인 50% 수준에서 약 2.32일 정도 소요되는 것으로 조사되었다 (Vlek and Craswell, 1989).

Table 20. Effect of moisture saturation on volatile losses of ammonia from applied urea (60 ppm N), reaction coefficient (k) and t<sub>1/2</sub> for alkali soil at field capacity. (Vlek and Craswell, 1989)

Treatment	N loss (%)	k (days <sup>-1</sup> )	t <sub>1/2</sub> (days)
50%	62.66	0.299	2.32
75%	49.33	0.233	2.97
100%	44.40	0.195	3.56
Water logged	34.90	0.066	10.46

Rao and Batra(1983) 조사한 요소처리 깊이별 암모니아휘발량 결과를 살펴보면 처리 깊이가 지표면에서 지중 7.5 cm 정도로 깊어짐에 따라 암모니아휘발량도 약 60 %에서 10% 이하로 감소하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 5).

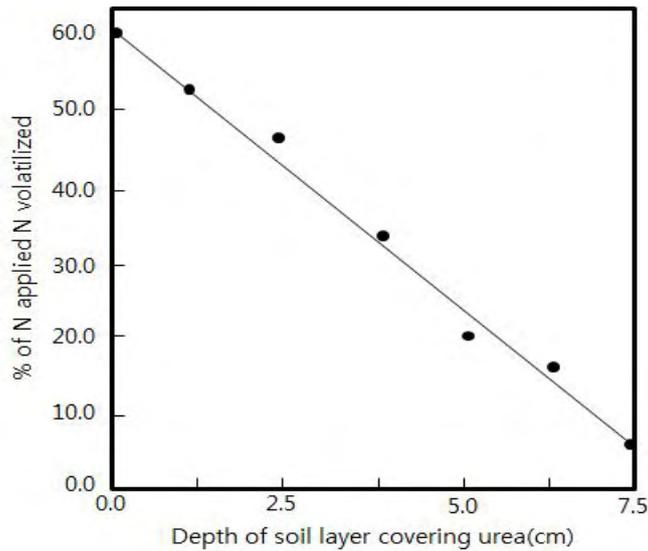


Fig. 15. Effect of depth of urea application (60 ppm-N) on ammonia volatilization from alkali soil at field capacity. (Rao and Batra, 1983)

특히 지하수위가 높은 해안지역의 간척지토양에서는 모세관상승에 의한 높은 농도의 해수가 지표면으로 상승하였다 (그림 16). 따라서 지속적인 모세관상승에 따라 염류도 상승하며 지표면에서 증발이 발생하면 염류는 뿌리 근처에 집적되어 saline-sodic 토양으로 변화였다.

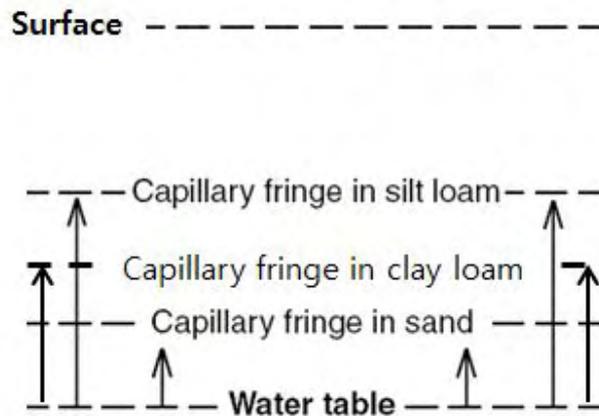


Fig. 16. Capillary rise from a water table depends on soil texture. Capillary rise will extend higher in a silt loam, silty clay loam and a very fine sandy loam than in a clay, clay loam or sand.

반면 점토가 많은 토양에서는 점토입자의 입단화에 의해 해수가 모세관을 따라 상승하는 경향이 낮아 뿌리 근처에 염류가 집적되는 현상은 거의 미미하다 (Knuteson et al, 1989). 그러나 지금까지의 간척지에서 제염에 관한 연구는 주로 담수를 통한 염류의 용탈 또는 환수를 통한

확산제염에 관한 것이 대부분으로 고염도의 간척지에서 염류의 모세관 상승을 막는 재염화 차단에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

### 3절 온난화가스 저감과 토양탄소 저장능

국외의 경우 석탄회를 이용하여 온난화가스 저감과 토양탄소 저장능에 대한 기술개발자료는 없었으나, 농경지나 토양에 투여하여 토양개량제로서의 효과를 평가한 기술개발자료들이 주를 이루었다. 인도의 Vimal Chandra Pandey, Nandita Singh(2009)에 따르면, 기존의 석탄회 폐기 방법은 농경지를 황폐화시킬 수 있다고 지적하였고, 황폐화된 토양에 석탄회를 첨가하면 토양의 이화학적 및 생물학적 성질을 개선하고 식물의 생장에 필요한 미량영양소 및 다량영양소를 공급할 수 있다고 하였다. 미국에서 수행된 연구로는 석탄회와 계분을 재료로 한 Biosolid 를 혼합 사용하여 토양에 사용하는 연구(Tracy Punshon et al., 2002)와 석탄회와 하수 슬러지 및 그를 혼합한 물질을 토양에 이용할 수 있는지에 대한 연구 (K.S Sajwana et al., 2003)등 석탄회의 단일 사용 및 혼합 사용의 효과를 알아보거나 수계에 미치는 잠재적인 영향에 대한 평가 등이 있었다. 이에 따르면 토양 개량제의 목적으로 중간 정도 또는 낮은 양의 석탄회를 단일 사용하거나 축분 및 슬러지와 혼합사용이 가능하고, 식물체 생체량 증가 등의 효과가 있다고 하였다. Prashanta K Sarangi et al., (2000)가 수행한 각기 다른 비율의 석탄회가 토양 개량제로써 사용된 토양에서 *Oryza sativa* 벼의 성장반응과 토양의 생물화학적 활동을 알아보는 연구에서도 역시 식물체생체량과 곡물수확량이 증가된다고 보고되었다. 녹비와 석탄회를 함께 부숙화하여 만든 조경용 토양의 이화학적 성질과 미생물상에 대한 연구(O.N. Belyaeva, R.J. Haynes, 2003)에 따르면, 조경용 토양 중 석탄회를 25%가량 첨가하였을때 수분보유력이 증가한다고 하였다.

국내의 경우에는 미생물의 담체로서 바텀애쉬의 활용가능성을 주제로 수행된 연구(윤명근, 2010) 가 있다. 이 연구에서는 바텀애쉬가 입체 다공성 구조로 많은 미생물들이 흡착하기에 좋은 구조를 가지고 있으며, 실제로 실험 과정에서 바텀애쉬의 다공성 표면 중 함몰된 부분에 많은 수의 균체가 부착되었음을 보고하였다. 기타 농업 분야에서의 연구는 연탄재 및 Fly ash 를 원료로 한 Zeolite 합성과 그 특성에 관한 연구와, Fly ash 사용이 수도(水澆)의 수량과 논토양의 유효규산함량에 미치는 영향을 주제로 한 연구가 있었다.

#### 1. 온실가스 저감기술

##### 가. 국내외 기술개발 현황

##### (1) 국내

- 지구온난화 및 기후변화대응을 위한 농업분야 국내 연구는 메탄, 아산화질소 등의 배출과

관련된 연구가 주를 이루고 있다. 그리고 우리나라 주요 농경지의 이용형태인 논에 대한 국내외 시각은 온실가스 배출원으로 인식되고 있으며 탄소흡수원으로서의 연구는 매우 미흡하다.

- 2013년 이후 새로운 방식의 기후변화에 대응하기위한 탄소흡수원으로서의 토양탄소축적에 대한 국제적 관심은 매우 급격히 증가하고 있으나 국내 토양유기탄소축적과 관련된 연구는 매우미흡하다.
- 전국 규모의 농업환경변동모니터링 등을 통하여 많은 토양데이터가 축적되어 있으나 이를 이용한 지속가능한 농업환경정책의 개발을 위한 연구는 매우 미흡하다.
- 국내 토양유기탄소연구는 1950년대의 기술수준에 머무르고 있어 선진화된 분석기술 및 탄소축적평가 기술 등의 도입이 시급히 필요하다.

## (2) 국외

- 미국, 캐나다, 호주 등 선진국에서는 교토협약서 이후의 기후변화대응을 위해 온실가스의 흡수원으로서의 토양탄소축적 연구를 수행하고 있으며 미국 오하이오주립대학교 Rattan Lal교수는 온실가스감축을 위한 토양관리기술에 대해 “사이언스” 등에 논문을 다수 게재하는 등 선도적인 연구를 수행하고 있다.
- 미국, 캐나다 등은 농경지의 관리방법에 따른 환경적 영향(토양탄소의 축적)의 개량화를 통해 농민에게 직접 보상정책을 시행하고 있다.
- 토양관리기술, 물관리기술, 농경지관리기술 등에 대한 토양탄소의 축적량계량화연구를 수행하고 있다.

# 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

## 1절 친환경 소재를 활용한 간척지 토양구조 개선과 관리 기술 개발

### 1. 연구과제 목표

본 과제는 새만금간척지 중 광활통에 속하는 간척지를 대상으로 하여 토양구조 개선과 관리를 위하여 지하수 상승 차단 토양구조층을 개발하는 것이다.

새만금 간척지는 전북 전북 옥구군 옥서면을 중심으로 금강, 만경강, 동진강 하구 갯벌을 개발한 간척지로 연구지는 전북 김제시 광활면에 소재한 광활통 간척지 토양을 대상으로 연구를 실시하였다. 새만금간척지내에 존재하는 토양통은 문포, 염포, 광활, 포승, 만경통 총 5개의 토양통이 카테나를 이루고 있으며 간척지 토양구조는 무구조, 판상형으로 수직배수가 불량하며 지하수위가 대부분 60cm 보다 높아서 제염효율이 떨어진다.

새만금 간척지 중 8570 ha가 농경지로 활용될 예정이지만 염농도가 높고 치환성  $Na^+$  함량이 높은 saline-sodic 토양으로 바닷가로부터 내륙으로 진행되어 감에 따라 염포통으로부터 포승통에 이르기까지 5개의 토양통으로 토양은 점토함량은 낮은 반면 미사의 함량이 높은 미사질양토의 토성을 가지고 있으나 지하수위가 높으며 수직배수가 매우 불량하며 염농도 또한 매우 높아 작물생육에 적합하지 않다 (그림 17).

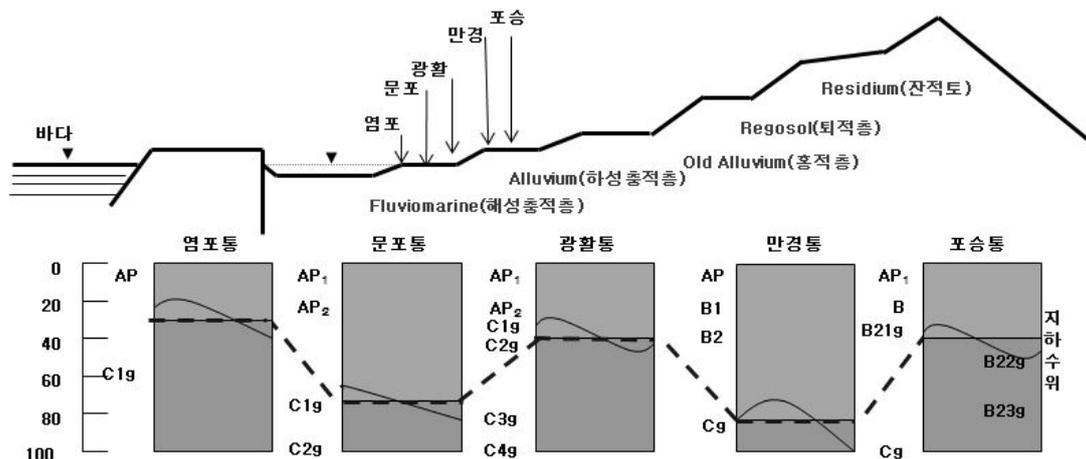


그림 17. 새만금 간척지 토양통과 지하수위 변동 특성

### 2. 연구 개발의 이론적 배경

우리나라의 해안선의 총연장은 11,542 km이며 해안선의 94%를 차지하고 있는 서남해안은 조수

간만(潮汐干滿)의 차가 심하고 큰 파도의 영향이 적고 해저경사가 비교적 완만하게 발달되어 있으며 또한 바다의 수심이 얕으며 리아스식해안으로 되어있다. 간석지는 이와 같은 해안에 잘 형성되는 퇴적 지형으로 대부분의 간석지가 서해안에 매우 넓게 발달되어 있을 뿐만 아니라 만(灣) 입구의 양단거리가 짧으면서도 내부간석지의 면적이 넓어 짧은 방조제를 축조하여 비교적 적은 비용으로 넓은 땅을 개발 할 수는 좋은 조건을 갖추고 있다.

이러한 간석지(Tidal flat)는 조류에 의하여 운반된 점토나 미사 등의 미립물질이 일반적으로 파도의 작용을 적게 받는 해안에 퇴적되어 생기는 평탄한 지형으로 만조 시에는 침수되나 간조 시에는 대기 중에 노출되는 특징이 있으며 퇴적물이 점차 쌓임에 따라서 수직으로 성장하여 지면이 높아진다. 이렇게 되면 점차 간석지가 대기 중에 노출되는 시간이 길어지고 결국 주로 “나문재, 갈대” 등의 염생 식물이 정착하기 시작하여 salt marsh로 변화되고 염생 식물이 정착하면 운반물질의 축적이 증가하여 간석지의 수직성장이 가속화되다가 결국 침수시간이 감소하여 수직성장은 둔화되어 안정 상태에 이르게 된다 (정, 2008). 이러한 상태는 지반이 비교적 단단하고 배수도 양호하여 간척사업의 대상이 되지만 우리나라에서 대부분 지역은 salt marsh로 발달하기 이전단계에서 방조제를 막고 간척사업을 하게 되므로 지하수위가 높아서 제염기간이 길고 또한 연약지반을 형성하여 농기계 작업이 어려운 경우가 많다

신간척지 토양은 대체로 지하수위가 높고 미사함량이 많아 투수성이 불량하기 때문에 수직배수에 의한 제염이 어렵다. 박(2008) 발표한 자료에 따르면 지하수위와 염농도 관계는 고도의 부의 상관성이 있으므로 지하수위의 고저가 염농도에 미치는 영향은 매우 크다. 즉 동일한 미사사양질인 염포통과 문포통간의 염농도를 비교하여보면 지하수위가 낮은 문포통은 지하수위가 높은 염포통에 비하여 염농도가 낮다(그림 18).

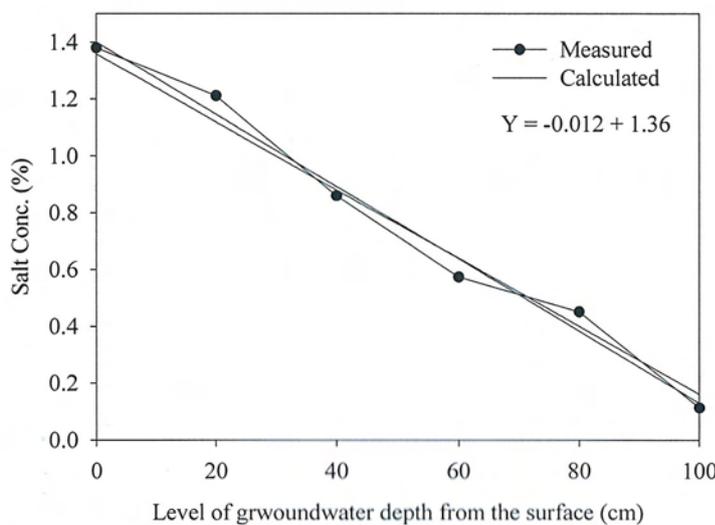


Fig. 18. Relation between salt concentration of a reclaimed tidal soils and ground-water table

또한 미사와 점토함량 역시 염농도에 미치는 영향이 매우 크다. 즉 지하수위가 거의 같은 문포통과 광활통의 염농도를 비교하여 보면 미사와 점토함량이 많은 광활통과 포승통에 비하여 조립질인 문포통에서 염농도가 낮다. 이러한 경향은 건기에 지하수층의 염분이 모세관상승현상으로 표면에 집적되며 토양층의 점토함량이 높을수록 모관력이 증가하고 미사함량이 높을수록 가비중이 증가하여 투수가 불량한데 기인된 것으로 추정되며 반대로 점토함량이 낮은 문포통은 염분의 표토 집적량이 감소되므로 염분농도가 비례적으로 낮다 (박, 2008). 따라서 서남해안 신간척지 토양은 대부분 점토함량이 낮은 반면 미사의 함량이 높고 지하수위가 높으며 투수성이 불량하고 염농도가 높기 때문에 객토와 동시에 Ca 및 생고등 시용과 지하 배수시설에 의한 제염방안을 제시하고 있다.

작물재배에 있어서 가장 기본적인 특성 중 가장 중요한 것은 토성이다. 현재 개발된 지역별 간척지 토양의 토성별 면적은 표 21과 같다 (정, 2008). 조사면적 264,805ha 중 사토는 16,394ha로 전면적의 6.2%를 차지하고, 양질사토는 57,420ha이며, 사양토는 40,629ha로서 이들 사질계 토양이 전 조사면적의 37%를 차지하고 있다. 미사와 점토를 모재로 한 미사질계 토양은 전 조사면적의 47.3%를 차지하고 식질계 토양은 9.5%를 차지하고 있다.

표 21. 토성별 지역별 분포면적

토성	지역별 면적(ha)						비율 (%)
	경기	충남	전북	전남	경남	계	
사토 (S)	1,189	4,845	920	8,748	692	16,394	6.2
양질사토(LS)	3,038	4,163	45,050	5,119	50	57,420	21.7
사양토 (SL)	4,730	3,066	29,450	2,706	677	40,629	15.3
미사토 (SI)	467	-	-	-	-	467	0.2
미사질양토 (SIL)	23,416	7,786	30,080	56,073	7,507	124,862	47.1
미사식양토 (SICL)	-	250	-	14,537	7,191	21,978	8.3
미사질식토 (SIC)	-	-	-	3,055	-	3,055	1.2
계	32,840	20,110	105,500	90,238	16,117	264,805	100

유(2008)이 조사한 간척지구별 연차간 토양염농도 및 지하수위 변화 결과를 살펴보면 토양 염농도는 모두 간척 년대가 경과할수록 낮아지는 경향을 나타내고 있으며 동일한 토양이라도 지선 및 간선의 깊이에 따라 배수성 정도에 따라 염농도가 차이가 있음을 알 수 있다. 예로 포승통의 경우 간척 년대가 7년이 늦은 서산A 지구에서 소포 지구보다 토양 염농도가 낮았고, 문포통은 간척 년대가 13년이 늦은 남포지구에서 서산A 지구보다 염농도가 낮았다.

지하수위는 토양 및 간척지구별 모두 100cm 이하였지만 염류농도는 점토함량과 배수성에 따라 포두통의 보전지구, 문포통의 남포지구에서는 여름과 가을에 약간 높게 나타났고 남포지구는 제염이 거의 완료되어 일반논과 같은 염농도를 보였다 (표 22).

표 22. 간척 지구별 논토양 염농도와 지하수위 변화

토 양 통	지구명	토양 염농도(%)		지 하 수 위(cm)					
		1년차	5년차	봄		여름		가을	
				1년차	5년차	1년차	5년차	1년차	5년차
포 승 통	만 덕	0.60	0.26	100	100	100	100	100	100
	서산A	0.14	0.10	100	100	100	100	100	100
	소 포	0.28	0.20	100	100	100	100	100	100
	해창만	0.17	0.16	100	100	100	100	100	100
포 두 통	완 도	0.74	0.61	100	100	100	70	100	88
	보 전	0.69	0.62	100	100	45	74	55	89
	강 산	0.49	0.43	91	100	91	83	100	100
	소 포	0.45	0.35	100	100	100	82	100	100
	해창만	0.44	0.33	100	100	100	100	100	100
	오 마	0.22	0.30	100	100	89	100	100	100
광 활 통	만 덕	0.43	0.14	100	100	100	100	100	100
	서 산	0.16	0.13	100	100	100	100	100	100
	계 화	0.16	0.14	100	100	100	100	100	100
염 포 통	보 전	0.70	0.46	100	100	100	100	100	78
	계 화	0.04	0.02	100	100	61	60	100	100
문 포 통	남 포	0.32	0.02	85	100	45	51	96	100
	서산A	0.22	0.15	100	100	100	100	100	100
	계 화	0.11	0.10	100	100	100	100	100	100

간척지구별 토양 염농도는 벼 재배가 가능한 염농도가 0.3%라 할 때 남포, 만덕, 서산A, 소포, 해창만, 계화, 오마지구를 들 수 있으나 완도, 보전, 강산지구는 염농도가 높아 벼 생육에 지장을 주는 수준에 달하고 있어 염류토양의 장기적이고 효과적인 개량을 위해서는 치환성 Na 비율을 10 이하로 낮추는 것이 중요하다.

간척 년대별 심토의 토양 물리성 변화에 대한 조사 결과를 살펴보면(유, 2008) 지구별 평균 수분함량은 간척 년대가 경과할수록 증가하며 토성별 포장수분함량은 세립질토양인 포승통과 포두통은 간척 년대가 경과할수록 포장수분함량은 감소하고 있는 반면 조립질 토양인 광활통,

염포통, 문포통은 증가하는 경향을 보였다. 또한 간척 년대가 짧은 포승통의 만덕지구와 포두통의 완도와 보전지구는 1년차에 비하여 5년차에 포장수분함량이 감소한 반면 간척 년대가 경과할수록 포장수분함량은 높아지는 경향으로 특히 세립질토양에서 뚜렷하다 (표 23).

표 23 토양통과 간척년대별 심토의 물리성 변화

토양통	지구명	용적밀도( $\text{g cm}^{-3}$ )		경도 (mm)		포장수분(%)	
		1년차	5년차	1년차	5년차	1년차	5년차
포승통	만 덕	1.331	1.464	10.8	21.6	36.1	31.2
	서산A	1.660	1.613	20.4	25.5	19.4	24.6
	소 포	1.656	1.599	17.0	23.6	20.3	23.9
	해창만	1.509	1.628	16.6	26.5	22.6	22.5
포두통	완 도	1.397	1.402	16.5	9.3	30.7	29.8
	보 전	1.484	1.541	22.4	19.6	26.5	25.4
	강 산	1.483	1.436	20.8	19.1	24.3	29.9
	소 포	1.342	1.455	13.2	23.2	29.6	23.8
	해창만	1.670	1.702	19.6	26.0	20.3	19.6
	오 마	1.587	1.578	18.2	24.8	23.6	25.2
광활통	만 덕	1.500	1.443	11.9	24.4	26.7	28.5
	서 산	1.670	1.582	19.3	22.5	19.6	24.3
	계 화	1.605	1.354	19.2	19.8	23.5	31.2
염포통	보 전	1.556	1.543	21.8	26.0	23.4	24.2
	계 화	1.586	1.548	18.5	23.6	23.8	26.4
문포통	남 포	1.454	1.490	18.6	17.0	7.5	16.9
	서산A	1.586	1.457	22.2	13.3	23.2	31.0
	계 화	1.548	1.535	19.2	26.1	24.4	26.8
평 균		1.535	1.521	18.1	21.8	23.6	25.8

토성별 용적밀도는 간척 년대가 경과할수록 세립질 토양인 포승통과 포두통은 증가하는 경향을 보였으나 조립질인 광활, 염포, 문포통은 낮아지는 경향이였다. 그리고 경도는 세립질 및 조립질 토양 모두 간척 년대가 경과할수록 증가하는 경향을 보였다.

김(2008)이 발표한 간척지 토양의 토성과 지하수위별 토양수분증발 결과를 살펴보면 (표 24) 지하수위가 30cm 미만일 때 일반토양에서의 토양수분 증발량은 자유수표면에서의 증발량보다

크며 지하수위가 깊어질수록 토양수분 증발량은 감소하였으며 토성의 경우 사질토양에서 가장 크고 세립질 토양일수록 감소하는 경향을 보였다고 보고하였다. 특히 간척지토양에서는 토양표면이 염분으로 포화되어 있으므로 보존된 염분에 의한 수증기압 강화현상이 일어나기 때문에, 간척지 토양의 수분증발량은 일반 토양보다 훨씬 적으며 항상 습윤한 상태로 존재한다고 추정하였다.

표 24. 토양 및 지하수위별 토양수분 평균증발량 (단위 : mm)

토 양	지하수위 (m)	일 증발량				총 증발량	평균 증발량	증발 지수
		8월 하순	9월	10월	11월 상순			
자유수표면(담수)		1.239	3.216	2.760	2.269	237.04	2.63	100
자유수표면(염분포화)		0.514	1.297	1.210	0.915	95.52	1.05	40
S	0.3	2.321	3.261	2.645	2.686	263.62	2.99	111
	0.5	0.995	1.471	1.182	1.111	112.28	1.24	47
	1.0	0.497	0.221	0.288	0.347	27.19	0.30	11
SL	0.3	2.321	3.261	2.773	2.537	253.68	2.81	107
	0.5	1.658	2.542	1.890	1.924	184.71	2.04	78
	1.0	1.326	1.492	1.106	1.046	112.74	1.24	48
Si	0.3	2.321	3.688	3.161	3.340	294.46	3.26	124
	0.5	2.321	3.205	2.740	2.189	225.49	2.50	95
	1.0	1.326	0.602	0.760	0.878	84.56	0.93	36
간사지	0.3	0.663	0.718	0.553	0.663	58.03	0.64	25
SiL	0.5	0.663	0.608	0.409	0.464	47.09	0.52	20

토양 내에서 수분상승은 액상으로 용존된 염류와 함께 이동하였다. 물 분자의 상승속도와 염분의 상승속도는 유사하기 때문에 또한 김(2008b)이 조사한 모세관수 상승에 따른 염분상승 결과를 살펴보면 수분이동은 모세관공극 특성에 따른 수분장력 구배에 따라 사질일수록 토양 내 수분함량이 적고 식질일수록 수분함량이 증가한다고 보고하였다 (표 25)

따라서 이러한 가정 하에서 토양수분 증발량이  $1\text{mm day}^{-1}$ 일 때, 염분상승 속도는  $1.5\sim 3\text{mm day}^{-1}$ 이며, 수분증발이  $5\text{mm day}^{-1}$ 일 때 염분상승 속도는  $8\sim 15\text{mm day}^{-1}$ 정도인 것으로 조사되었다.

표 25. 토양깊이별 부피수분함량과 토양내 수분 이동속도

토주깊이 (cm)	수분함량(%)			수분이동속도(mm day <sup>-1</sup> )		
	LS	SL	SiCL	LS	SL	SiCL
1	3.7	12.5	27.5	37.2	20.6	14.5
7	7.5	19.0	35.0	18.4	13.6	11.4
14	14.0	30.5	41.0	9.9	8.5	9.7
21	24.1	37.0	45.0	5.7	6.9	8.9
27	29.7	38.0	48.0	4.8	6.7	8.3

포화와 불포화 상태에서의 물질 확산은 많은 차이를 보인다. 일반적으로 확산은 수분함량과 정비례 관계를 보이며 포화토양수분상태에서 확산계수는 (김, 2008c) 액상상태 확산계수의 30~50% 정도에 달한다 (표 26).

표 26. 수분과 염분 함량에 따른 확산계수

구 분	양 토		식양토	
	20%	30%	20%	30%
수 분 함 량				
염분함량(%)	0.26	0.33	0.20	0.27
확산계수(10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> sec <sup>-1</sup> )	0.36	0.62	0.15	0.32

신간척지 표토의 염분함량은 미세지형에 따라 매우 불균일하며 일반적으로 0.8~1.7% 정도이며 신간척지에 담수 후 경운하면 약 3일 이내에 0.65% 정도로 쉽게 희석에 의하여 제염된다. 이와 같이 초기 염분함량이 0.65%인 토양에 증류수로 담수하면 확산에 의해 담수 시간이 증가함에 따라 벼생육이 가능한 염류농도인 0.3% 이하의 염류농도에 도달하였다. 따라서 신간척지 토양의 확산계수를 5.4×10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup> sec<sup>-1</sup>이라고 가정 시 그림에서 보는 바와 같이 토양염류도가 0.3%에 도달하는 정도를 살펴보면 약 4일 후에 약 1.2cm, 16일 후에는 약 3cm 그리고 64일 후에는 약 6cm 깊이로 이동하는 것으로 추정된다 (그림 19).

그러므로 확산에 의한 제염은 토양염분함량구배에 비례하므로 제염초기에는 빠르지만 시간이 경과함에 따라 토양염분함량구배(Salt content gradient)가 감소하여 확산에 의한 제염은 매우 느릴 것으로 추정된다. 따라서 신간척지 토양에 작물을 재배 시 작물생육 최저 염류농도를 기준한 토양제염 계획이 수립되어야 하며 이는 토양이 가지는 기존 확산특성을 근거하여 수립하여야 하였다.

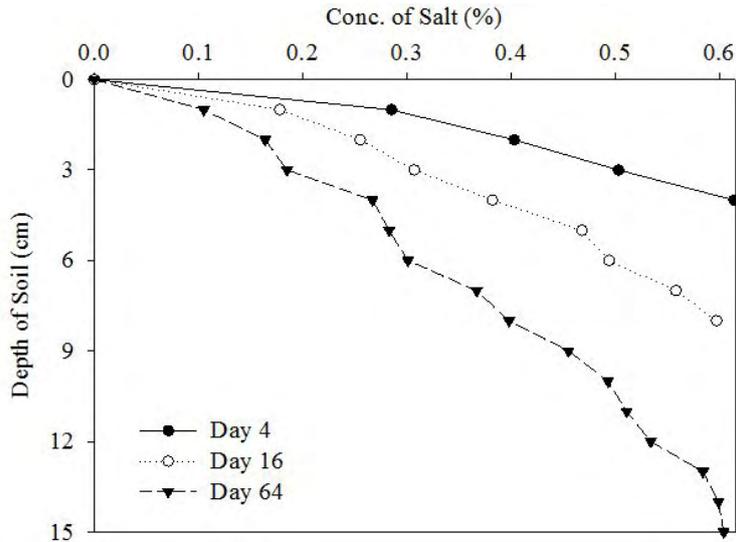


그림 19. 담수일자별 토양내 염류분포 특성

### 가. 토양의 역학적 특성

간척지토양은 NaCl의 영향으로 토성에 비하여 액성한계와 소성지수가 높다. Cole값은 점토함량, 유기물함량, Atterberg limits와는 정의 관계이나 수분함량과는 부의 상관성을 가지고 있다. 액성 및 소성한계와 소성지수는 액성한계가 표토보다 심토에서 약간 높으며 부의 상관성을 나타내는 것은 심토의 점토 함량이 높은 것이 원인으로 추정된다.

경운 등 농경지에서 농기계작업과 관련한 요인은 원추지수, 원판침하량, 그리고 마찰저항 등이 있다. 광활통의 경우 간척 5년차까지 원추지수가  $3\text{kg}/\text{cm}^2$  이하로 트랙터 로터리작업이 불가능한 범위이지만 미사함량이 많기 때문에 작업이 가능하며 포승통은 간척 12년차 까지는 작업에 지장을 받는 저항치를 나타냈다. 한편 광활통은 33년차부터 포승통은 49년차부터 경반층이 생성되고 있으나 광활통보다 포승통에서 두껍게 생성되고 있었다 (표 27, 28).

표 27 광활통의 토양 역학적 특성

유형	깊이	간 척 년 대					r(n=13)	
		5	21	33	52	65		
Cole	표토	0.026	0.035	0.047	0.052	0.055	0.966	
	심토	0.025	0.032	0.041	0.047	0.050	0.974	
Atterberg limits (%)	액성한계	표토	36.7	35.4	33.2	28.8	25.5	-0.984
		심토	37.4	35.9	33.5	29.3	26.1	-0.988
	소성한계	표토	23.5	22.6	20.2	17.9	16.3	-0.990
		심토	23.5	23.3	21.0	18.4	16.8	-0.982
	소성지수	표토	13.2	12.8	13.0	10.9	9.2	-0.917
		심토	13.9	12.6	12.5	10.9	9.3	-0.977

표 28 포승통의 토양 역학적 특성

유형	깊이	간척년대					r(n=13)	
		5	21	33	52	65		
Cole	표토	0.082	0.070	0.072	0.065	0.064	0.062	
	심토	0.085	0.074	0.074	0.068	0.066	0.062	
Atterberg limits (%)	액성한계	표토	58.2	56.7	55.1	51.3	48.8	45.5
		심토	59.4	57.8	55.7	50.8	48.9	45.3
	소성한계	표토	27.6	26.5	25.5	22.5	18.8	17.5
		심토	27.9	26.7	25.2	22.8	18.7	17.2
	소성지수	표토	30.6	30.2	29.6	28.8	30.0	28.0
		심토	31.5	31.1	30.5	28.0	30.2	28.1

구형판 침하량은 수직압 1.6kg cm<sup>-2</sup>에서 3cm 이하로 트랙터의 로터리 작업이 가능한 침하량을 보였다. 전단 및 마찰저항의 변화는 전단저항은 경작 년수가 경과할수록 낮아지는 경향이며 마찰저항은 경작 년수가 경과할수록 광활통에서 높아져 농기계 주행성에 유리하다 (표 29).

표 29. 토양통별 토심의 경도 변화

구 분	토심 (cm)			
	5	10	15	20cm
문포통	12.5	14.5	23.0	26.1
염포통	13.0	14.5	22.2	25.3
광활통	14.3	15.4	22.7	26.3
평 균	13.1	14.7	22.6	25.9

간척연대별 토양과 지하수의 염농도 변화 조사 결과를 살펴보면 (김, 2008e) 간척 년대가 동일한 5년차와 33년차의 경우 광활통보다 포승통에서 토양이나 지하수의 염농도가 높으며, 포승통에서 염농도가 높고 탈염이 낮은 것은 점토함량이 높고 공극이 미세하며 흡착력이 높아 투수가 불량하며 지속적 관배수에 의해 지하수위도 낮아졌기 때문이다.

#### 나. 간척지 염류 제거 기술

가장 보편적인 방식은 작물이 재배되고 있는 농경지로부터 간선 배수구까지 다단계 배수구를 설치하는 다단계 명거배수로 모구(毛溝), 집수지(集水地)와 농구(農溝), 두구(斗溝)와 지구(支溝)를 이용하는 염류 배제방식이다 (그림 20, 21). 그리고 깊이 4~5m의 干溝를 설치하여 지구별 배수체계를 구축하여 지하 염류수가 작물 근권과 멀어지게 되어 제염효율이 향상되어 옥수수, 콩, 면화, 밀 등의 작물생산이 가능하다.

소택지를 조성하고 소택지 조성된 굴토한 토양을 농경지에 객토하여 상대적 지하수위를 저하

시켜 강우 시 물의 수평과 수직 이동을 통하여 토양 중 염농도를 낮추는 방법이다. 수목을 이용하여 집적된 토양염류를 저감시키는 방법도 이용되고 있다. 예로 농경지 주변에 수고 13.1m, 수관폭 3.8m의 포플러 단지를 조성한 결과 봄철 바람의 속도가 완화되어 표면증발량이 감소하며, 수목류의 그늘로 인해 일 평균온도는 0.7~0.9℃ 낮아지고, 수목류의 증산작용에 의한 상대습도는 5~15% 증가하여 결과적으로 토양 표면증발량이 10~18% 감소된다. 여기에 수목류를 통한 지하수의 펌핑작용 (증산작용)에 의해 지하수위가 낮아져서 농경지의 염류집적을 방지할 수 있다.

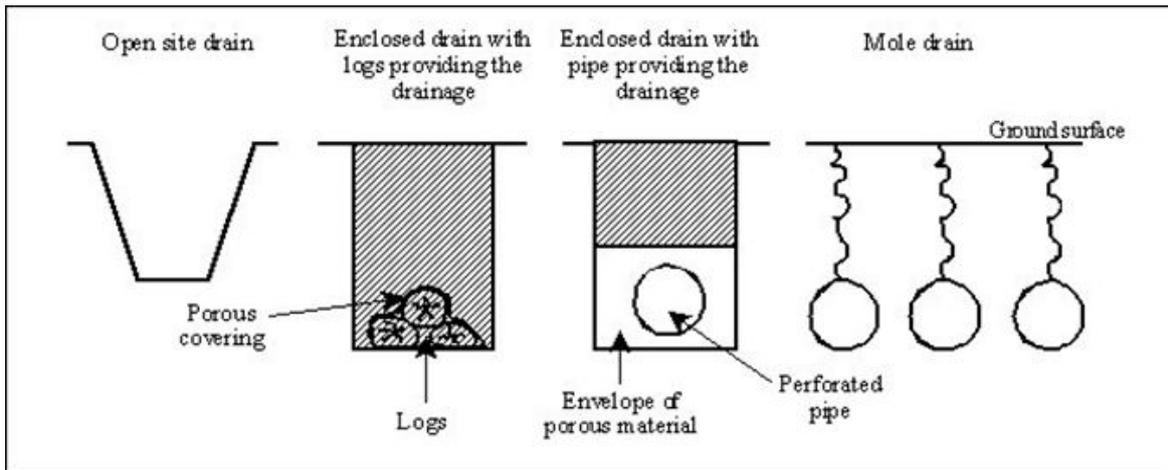


Fig. 20. Various types of drains

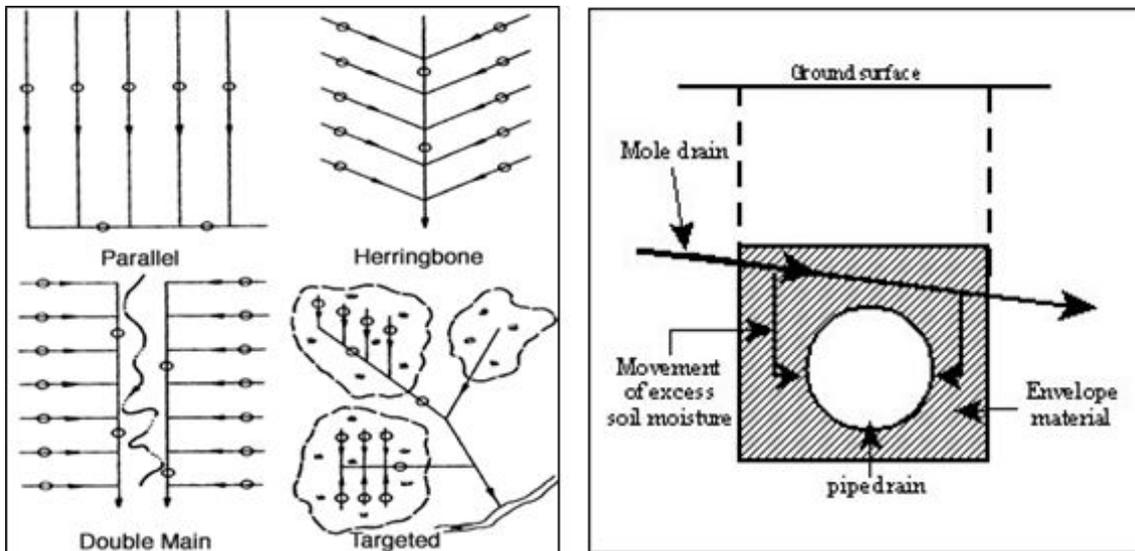


Fig. 21. Various drainage system layout alternatives

## 다. 지하수위 조절 배수 방법

### (1). 명거배수

명거배수는 배수할 물의 양이 많거나 배수할 면적이 넓을 때 혹은 지표면에 물이 고일 경우에

배수로를 지표면에 노출되게 설치하여 배수하는 방법으로 시설하기가 간단하다 (그림 22). 배수로는 넓게 파기보다는 깊게 파는 것이 수직적인 배수를 양호하게 하여 지하수위를 낮추는데 효과가 높다.

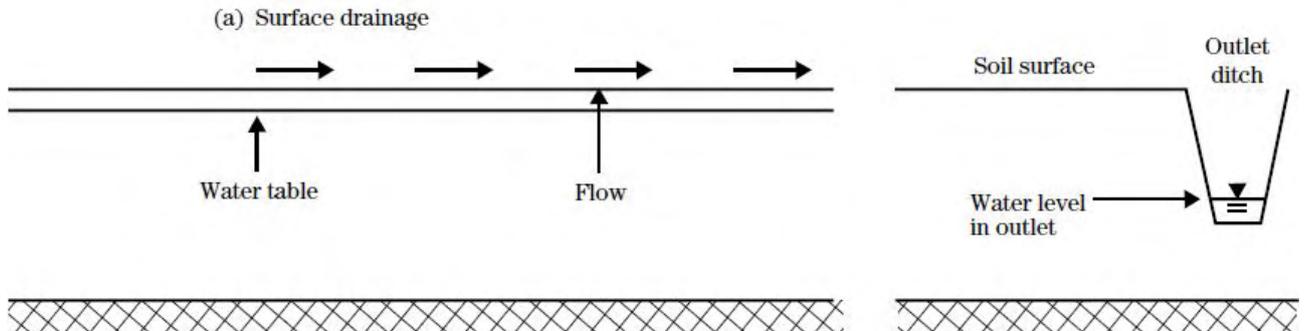


그림 22. 명거배수 모식도

(2) 암거배수

암거배수는 배수로를 지하에 설치하여 배수하는 방법이다 (그림 23). 암거배수는 배수에 소요되는 시간이 많이 걸리므로 명거배수에 비해 지선이나 간선 배수로의 설치 간격을 좁게 하고 배수로의 수를 많게 하여야 하였다. 배수로 속에 물을 재료로서는 자갈, 통나무, 대나무, 토관, 시멘트관 등이 있으나 가능하면 토관이나 시멘트관을 사용하는 것이 좋다. 토관을 물을 때에는 토관의 밑바닥이나 옆 부분의 이음매로 물이 흘러들어갈 수 있도록 좌우에 짚이나 자갈 등으로 메우지 않도록 시멘트 등으로 막고 흙으로 메우는 것이 좋다.

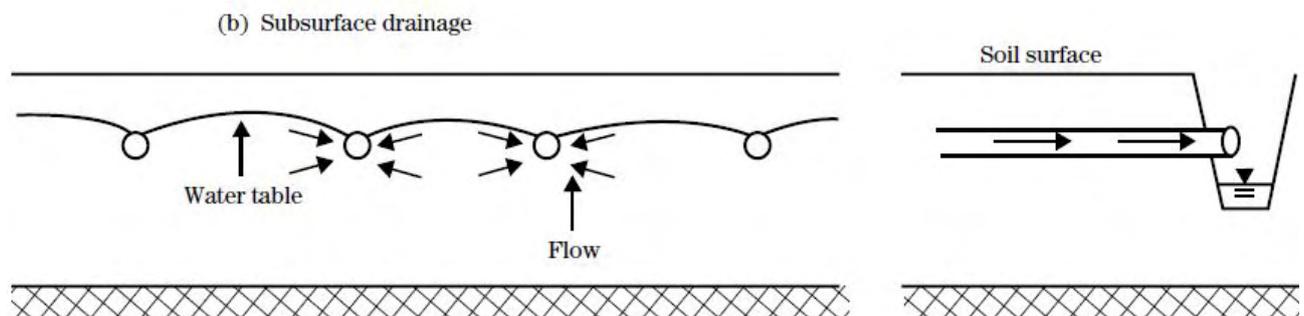


그림 23. 암거배수 모식도

암거배수를 실시하고자 할 때 사용되는 암거용 유공관의 최저 침투속도는  $60 \text{ cm sec}^{-1}$  이상이어야 하였다 (표 30). 만약 침투속도가 이보다 낮을 경우 퇴적물이 배수용 유공관 상부에 집적된다. 표 30은 토양특성별 암거배수 유공관 최대 침투속도를 나타낸 것으로 토양내 점토함량이 증가함에 따라 최대 침투속도도 증가하여야 하였다.

표 30. 토양특성별 암거배수 유공관 최대 침투속도

토성	최대 허용 속도 (cm sec <sup>-1</sup> )
사토 또는 사질양토	76.2
미사질 양토	91.44
사질식양토	106.68
식양토	121.92
식토	152.4
분리 미사 또는 자갈(교질)	167.64
점판암, 경반층과 조립 자갈	182.88

라. 투수성(permeability)

간척지는 대부분 인위적 방조제 구축으로 형성된 토양으로 지하수위가 높고, 염농도가 높으며 투수성이 불량하여 수직배수에 의한 제염이 어렵다. 따라서 토양의 특성을 고려하여 식물지 자라는 토층구간내의 염류를 인위적으로 제거해야 하였다. 따라서 지표층에 위치하는 염류를 담수를 통하여 제거하고자 할 때 우선적으로 고려할 요인은 토양의 투수성이다.

투수성과 연관된 가장 중요한 토양매질특성은 공극률, 매질을 구성하는 입자의 크기와 모양, 입자의 배열, 고상의 비표면적이다(Michaels and Lin, 1954). 토양내 가용성염류와 치환성소듐은 각각 토양입자의 응집현상과 분산현상에 밀접한 관계가 있으며 토양의 투수성에 큰 영향을 미치고 있다. 또한 가용성염류는 토양용액의 삼투압을 증가시키고 치환성소듐은 토양용액의 sodicity를 증가시키는 주원인이 된다.

점토광물의 응집(flocculation)과 해교(deflocculation) 및 팽윤(swelling)의 용이성은 공극의 구조에 영향을 미치고 결국 수리전도도에 영향을 준다. 점토입자의 팽윤으로 공극의 일부 또는 전체가 막힐 수 있고, 해교·분산·점토 이동에 의해 토양의 공극이 막힐 수 있다(Quirk and Schofield, 1955).

침투수의 전해질농도가 어느 한계치 이하인 경우 토양의 치환성소듐백분률이 증가함에 따라 수리전도도가 감소하지만 전해질농도가 한계치 이상이면 치환성소듐백분률이 높을지라도 수리전도도는 크게 감소하지 않는다(Quirk and Schofield, 1955). 그러나 이 한계치는 토양의 종류에 따라 다르며 토성이 비슷한 토양이라 할지라도 실험을 하지 않고 일반적으로 예측하기는 대단히 어렵다(Frenkel et al., 1978, McNeal and Coleman, 1966; Rhoades and Ingvalson, 1969).

유(2009)가 조사한 바에 따르면 치환성 Na의 수준을 달리한 토주실험 결과, 소듐염류액

(sordic water)으로 관개된 표토 토양에서 수리전도도 감소의 주된 원인은 분산된 점토입자에 의한 공극의 막힘이었다(Frenkel et al, 1978).

적갈색 사질토양의 수리전도도 변화에 있어 치환성소듐율이 높고 0.01N 이상의 염농도 조건에서는 점토의 팽윤이 수리전도도 저하의 주된 기작이고, 낮은 치환성소듐백분률(ESP)와 매우 낮은 농도의 토양용액에서는 점토의 분산과 이동이 토양공극을 막는 주요 기작이 된다(Pupisky et al, 1979).

점토(smectite)-모래 혼합물에서 점토의 팽윤(swelling)과 분산은 수리전도도의 변화를 설명하였는데, 각각의 기여도는 토양의 치환성소듐율(ESP)과 토양용액의 전해질 농도에 의존하였다(Alperovitch et al, 1985). Rhoades and Ingvalson(1969)은 토양의 투수능력을 감소시키는 실질적인 작용은 점토의 팽창보다는 분산에 의한 것이라고 말함으로써 토양의 HC에 영향을 미치는 점토분산의 중요성을 강조하였으며, Frenkel et al.(1978)은 분산된 점토입자에 의한 토양공극의 폐쇄현상은 ESP가 20이하일 때 모든 점토에 있어서 HC를 감소시키는 주요한 원인이라고 결론지었다. Felhender(1974) 등은 토양의 HC를 ESP 와 삼투수 염분농도의 함수로서 표시하였고 Shainberg et al.(1981)은 HC 와 분산률의 변화는 치환성소듐과 염분농도에 매우 민감하며 염분농도가 3.0meq L<sup>-1</sup> 일때 ESP가 12%를 초과하는 경우 HC와 분산률이 감소된다고 발표했다.

세립질 토양에서 포화조건하에서의 수리전도도는 토양의 미세구조에 의존하고, 이는 다시 토양내에 존재하는 점토광물의 종류와 치환성양이온의 조성 및 공극수의 전해질 농도에 의존하였다. 바다점토(Marine clay)의 수리전도도는 흡착된 양이온의 원자가와 크기에 크게 영향을 받으며 흡착된 양이온의 원자가 증가는 압밀(consolidation)속도를 빠르게 하고, 수리전도도를 높이며, 흡착된 양이온의 원자가가 같은 경우에는, 흡착된 양이온의 수화된 반지름이 커질수록 수리전도도와 압밀속도가 낮아졌다. 수리전도도의 감소는 점토의 분산과 해교(deflocculation)에 관련이 되었고, 치환성양이온의 낮은 원자가와 큰 수화반지름은 확산이중층의 반발력을 우세하게 하여 분산과 해교(deflocculation) 을 증가시켰다(Rao et al., 1995).

토양내 수분 이동은 주로 중력에 의해 작용되며 반면 토양수 이동에 영향을 미치는 요인은 수분과 토양공극내 공극벽과의 마찰력과 수부 자체의 마찰 즉 점도에 의하였다. 토양의 특성(토성)과 용적밀도 변화 등에 따라 그 토양이 갖는 고유의 수분을 유출하는 토양의 고유계수를 투수계수(hydraulic conductivity, K)라 하였다.

포화상태의 흐름은 중력에 의한 물의 이동이라고 할 수 있으며, 논토양에 있어서 투수성

(permeability)과 매우 중요한 관계에 있다. 물이 토양을 통과할 때 에너지손실 즉 수두손실이 발생하는데 단위 거리를 흐르는 동안에 발생된 수두차를 동수경사(hydraulic gradient, I)라 하였다. 물이 거리 L을 흐르는 동안에 h만큼의 수두차가 발생되면 동수경사 i는  $i=h/L$ 이고, 토양을 통과하는 물이 층류일 때에 단면적 A인 지반을 흐르는 단위시간당 유량 q는 동수경사 (i)에 선형 비례하였다. 그런데 유량 q는  $q=Av$ 이므로 침투속도( v )와 동수경사( i )사이에는 선형비례관계가 성립되어 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = - K A I$$

여기서 I는 수리편차(hydraulic gradient)라 하고  $I = \frac{Ha-Hb}{L}$ 로 표시하였다. 이는 다음과 같이 표시하였다. 여기서 -는 감소되는 수두흐름의 방향을 표시하였다.

$$q = \frac{Q}{A \cdot t} = - K_{sat} \frac{dH}{dL}$$

여기서 q는 유속(flux)를 그리고  $K_{sat}$ 는 포화수리전도도를 나타내며 이는 토주 내에서 수분이 통과하는 면적(A)와 유량(Q)를 얻는데 소요된 시간(t)로 나눈 값으로서 일정 단위시간 동안 단위 면적을 통과하는 수분의 유동을 의미하였다. 토양수분압력이 +일 때 포화수부이동이 발생하며 위에서 본 바와 같이 이때 메트릭 퍼텐셜은 0이다. 대부분 토양 공극의 약 95 % 정도가 수분과 나머지 5 % 정도가 공기로 채워져 있을 때 포화수분 이동은 발생하기도 하였다.

간척지와 같이 대규모 면적의 토양에서의 수리전도도는 균일하지 않다. 따라서 이러한 경우 기하학적(geometric)인 평균 수리전도도 값을 구하여 이를 대표 값으로 사용하였다. 예로 아래와 같이 10ha 면적의 토양 조사 시 조사지점은 1ha 당 1개 지점을 기준하여 총 10개 지점을 선정하여 기하학적(geometric) 평균 수리전도도 값을 구하여 이를 배수기준으로 정하였다 (그림 24).

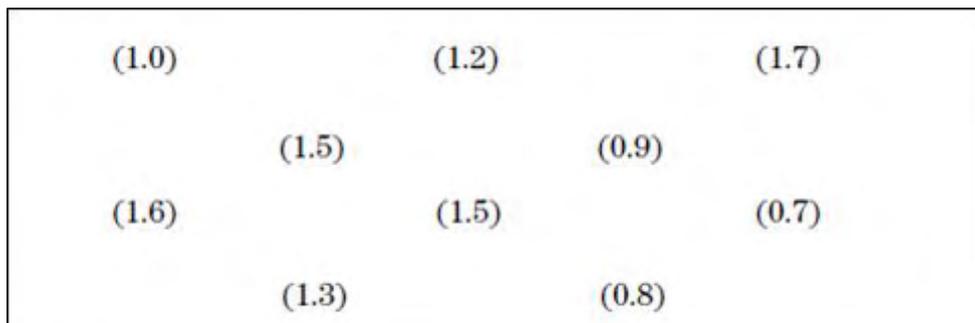


그림 24 수리전도도 등급별 수리전도도 조사 방법

$$\text{기하학적(geometric) 평균 수리전도도} = \sqrt[N]{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_{10}}$$

여기서 N은 총 조사지점을 의미하며  $k_i$ 는 I번째 수리전도도를 의미하였다.

수리전도도 등급별 수리전도도 조사 방법은 조사지점의 각각의 수리전도도를 측정한 다음 조사자의 기준에 따라 유사 수리전도도로 분리 등급화 하여(그림 25) 각각의 그룹에 속한 수리전도도를 대상으로 그룹의 평균 수리전도도 값을 구하여 배수설계 시 기본 자료로 활용하였다.

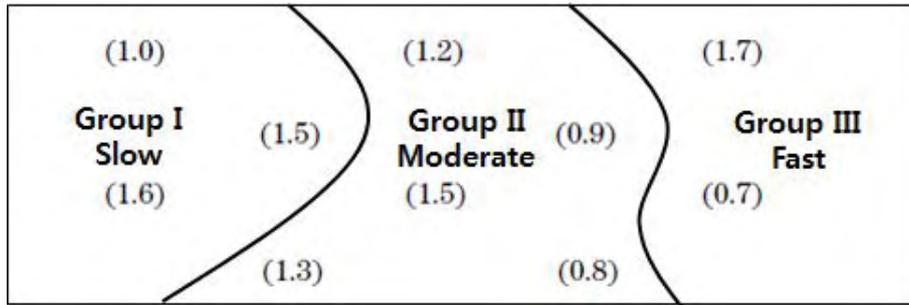


그림 25 수리전도도 등급별 수리전도도 조사 방법

$$\text{등급별}(G_i) \text{ 평균 수리전도도} = \sqrt[N]{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N}$$

수리전도도 값은 현장에서 채취한 시료를 대상으로 교란 또는 비교란 형태의 포화 또는 불포화 수리전도도 값을 구할 수 있다. 그러나 실내에서 측정된 수리전도도 값은 현장에서 직접 측정된 수리전도도와 상이할 수 있다. 따라서 배수시스템 설치 시 현장에서 직접 수리전도도를 측정하는 방법이 바람직하다.

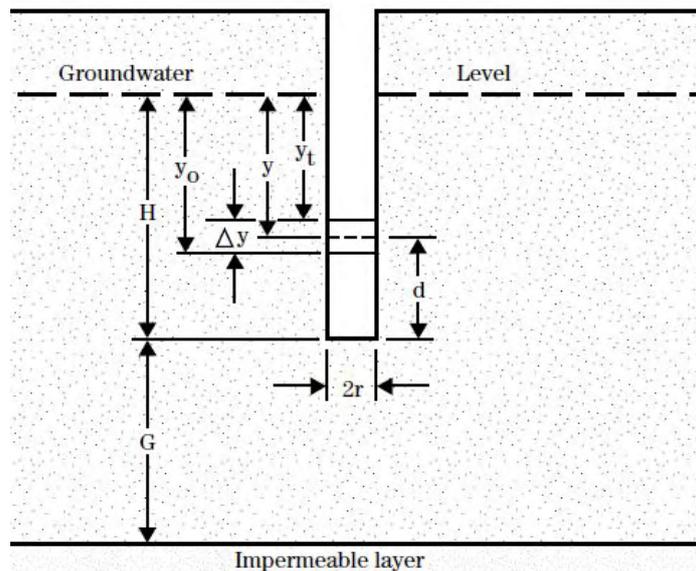


그림 26. Auger 활용 현장 수리전도도 측정 방법

$$K = \left( \frac{220r}{SH} \right) \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right)$$

여기서

S = a function dependent on the geometry of the hole, the static depth of water, and the average depth of water during the test

K = hydraulic conductivity (in/hr)

H = depth of hole below the ground water table (in)

r = radius of auger hole (in)

y = distance between ground water level and the average level of water in the hole (in) for the time interval t (s)

$\Delta y$  = rise of water (in) in auger hole during  $\Delta t$

t = time interval (s)

G = depth of the impermeable layer below the bottom of the hole (in). Impermeable layer is defined as a layer that has the permeability of no more than a tenth of the permeability of the layers above.

d = average depth of water in auger hole during test(in)

그리고 수평이동 포화수리전도도 값은 아래 공식을 이용하여 구하였다.

$$K_e = \frac{D_1K_1 + D_2K_2 + \dots\dots D_nK_n}{D_1 + D_2 + \dots\dots D_n}$$

여기서 D는 동일 또는 유사 수리전도도 값을 가지는 토양의 깊이를 의미하며 K는 각각의 포화 수리전도도를 의미하였다.

그리고 배수계수(Drainage coefficient) 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$D \text{ (in day}^{-1}\text{)} = \frac{Q(\text{ft}^3 \text{ sec}^{-1}) * 1,036,800}{\text{Length}(\text{ft}) * \text{spacing}(\text{ft})}$$

상기와 같은 공식을 이용하여 도랑(ditch)나 유공관을 설치하기 위한 간격은 다음과 같은 식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$S_d = \left[ \frac{4K_e m (2d + m)}{q} \right]^{0.5} \quad \text{도랑간격(Ellipse eq. 적용 시)}$$

$$S_d = \left[ \frac{4K_e m (2d_e + m)}{q} \right]^{0.5}$$

배수관 간격(Hooghoudt eq. 적용 시)

$S_d$  = ditch or drain spacing needed for drainage, ft

$K_e$  = equivalent lateral hydraulic conductivity, in/hr

$m$  = height of water table above ditch or drain (gradient), ft

$d$  = distance from bottom of ditch or tubing to impermeable layer, ft

$q$  = required drainage coefficient, in/hr

$d_e$  = equivalent distance from bottom of tubing to impermeable layer, ft

$$= \frac{d}{1 + \frac{d}{S_d} \left[ \frac{8}{\pi} \ln \left( \frac{d}{r_e} \right) - 3.4 \right]}$$

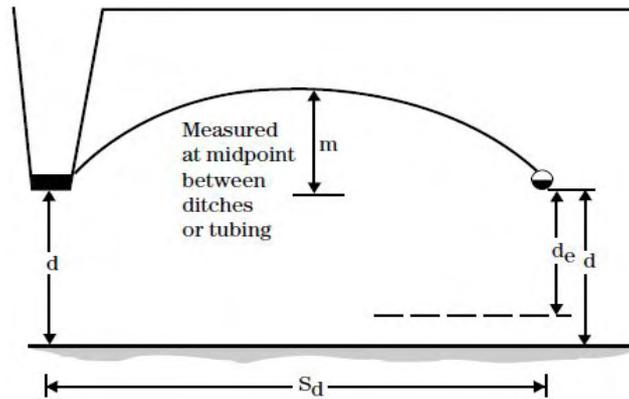


Fig. 27 Estimating ditch or tubing spacing for drainage only using the ellipse equation

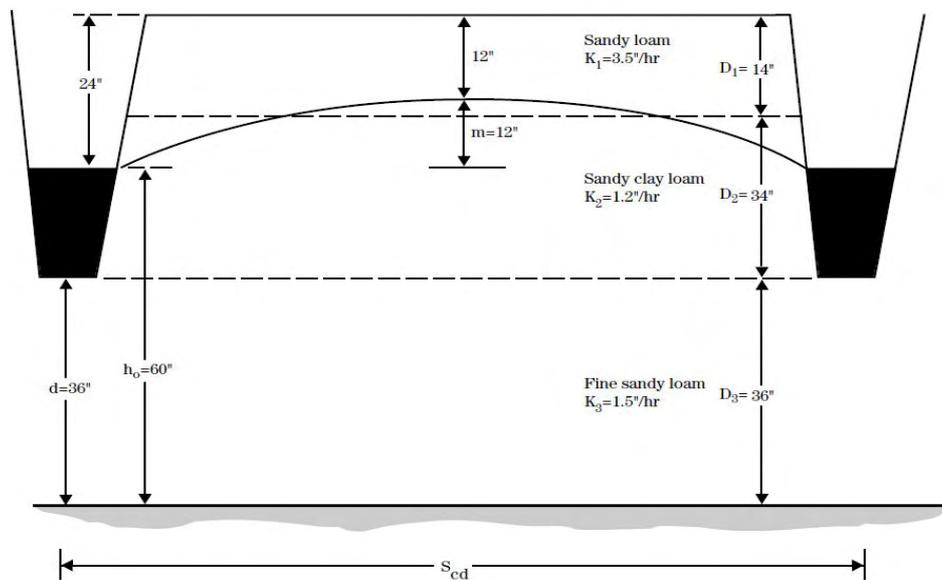


Fig. 28 Determining the ditch spacing needed for controlled drainage

마. 모세관 현상

토양내에서 토양입자 배열형태에 따라 다양한 크기의 공극이 형성되며 이러한 공극은 계속하여 연결되어 있는데 이중 중공극 이하의 크기로 연결된 것을 모세관이라 하였다. 한편 토양에 존재하는 수분은 토양입자 벽면에 흡착과 표면장력 즉 응집에 의해 수분이 하부에서 상부로 이동하는데 이를 모세관 상승이라 한다 (그림 29).

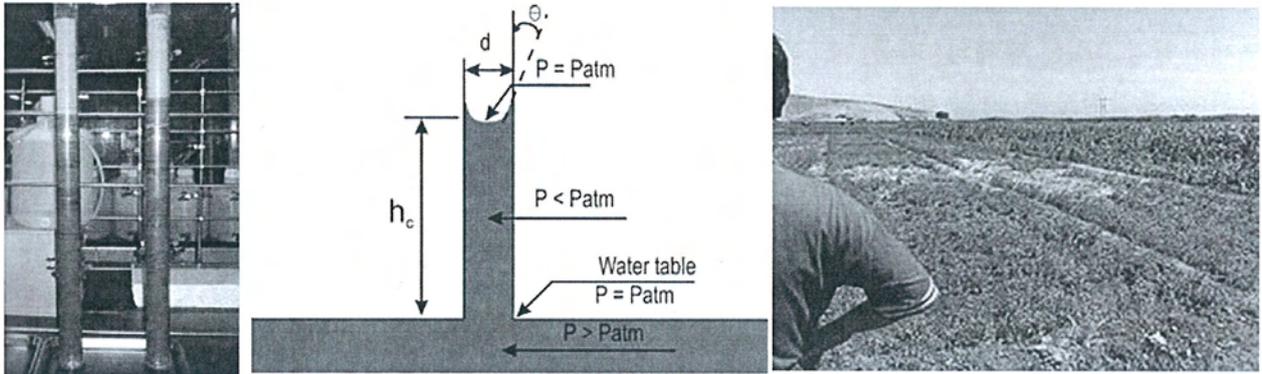


그림 29. 모세관상승 모식도(중)와 모세관상승에 의한 염해피해에 의한 작물생육 부진 포장(좌)

모세관상승 높이는 지하수의 높이뿐만 아니라 지하수가 상승하는 통로인 공극의 크기와 토양구성 요소와 지표면에서 증발산 특성에 따라 많은 영향을 받는다 (그림 30). 반면 점토가 많은 토양에서는 점토입자의 입단화에 의해 해수가 모세관을 따라 상승하는 경향이 낮아 뿌리 근처에 염류가 집적되는 현상은 거의 미미하다 (Knuteson et al, 1989). 그러나 지금까지의 간척지에서 제염에 관한 연구는 주로 담수를 통한 염류의 용탈 또는 환수를 통한 확산제염에 관한 것이 대부분으로 고염도의 간척지에서 염류의 모세관 상승을 막는 재염화 차단에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

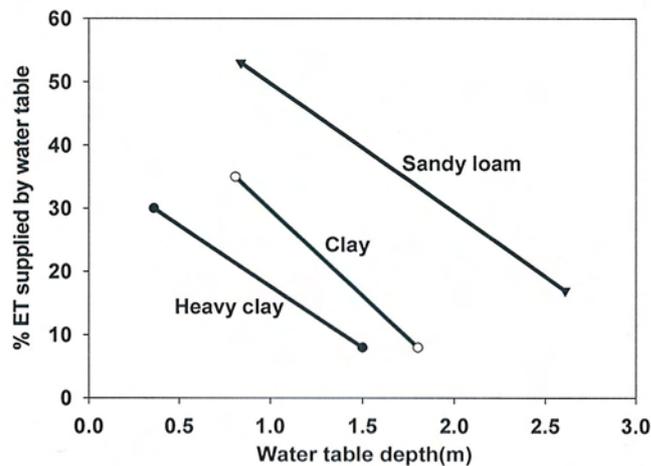


Fig. 30. Evapotranspiration supplied by a saline water table as affected by water table depth. (Gismer and Gates, 1988).

일반적으로 모세관 상승 높이는 관의 반경에 반비례하며 이외에 액체의 점도에 반비례하고, 용액의 표면장력과 흡착에 비례한다 (공식 1).

$$H = \frac{2T \cos \alpha}{rdg} \quad [\text{공식 1}]$$

여기서 H는 모세관 높이, T는 표면장력,  $\cos \alpha$ 는 물의 표면과 모세관 벽면과의 흡착각도, r은 모세관반경, d는 액체의 비중, 그리고 g는 중력을 의미하며 토양입자와 수분의 흡착은 매우 강하여 흡착각도는 거의 0에 가까워 토양의 흡착각인  $\cos \alpha$ 는 1로 추정하였다. 한편 20 °C 조건하에서 물의 표면장력(T)은 72.8 dyne  $\text{cm}^{-1}$ , 중력(g)는 9.8 m  $\text{s}^{-2}$ ,  $\cos \alpha$ 는 1, 비중(d)은 1g  $\text{cm}^{-3}$ 으로 환산 시 공식 1은 아래 공식 2와 같이 된다.

$$H (\text{cm}) = \frac{15(\text{cm}^2)}{r(\text{cm})} \quad [\text{공식 2}]$$

한편 불포화상태에서 모세관상승에 의한 수분이동 높이는 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Z_2 = Z_1 + \left[ \frac{h_2 - h_1}{1 - \frac{q}{K(\theta)}} \right]$$

$Z_{1,2}$ , = 지하수면부터 수직거리(m)

$h_{1, 2}$  = 토양압력수두(m)

$K(\theta)$  = 불포화수리전도도 ( $\text{cm day}^{-1}$ )

한편 모세관상승은 다음과 같이 공극비율로서 환산할 수도 있다.

$$h = \frac{C}{e \cdot D_{10}} \quad [C = 0.1 - 0.5 \text{ cm}^2]$$

h는 모세관상승 높이 (cm)

C는 상수(0.1-0.5 $\text{cm}^2$ )

e는 공기공극비율

$D_{10}$ 은 10%의 미세입자 통과 크기(cm)

## ② 모세관 상승 특성별 수분 분포 특성

전기전도도가 높은 해수의 상승을 차단하기 위한 완충층(Buffer layer) 구조 개발을 위한 소재 선정 조건 설정을 모세관상승 특성 공식을 이용하여 토양구조 개발 선정 소재의 크기를 결정하고 이를 실내에서 실험을 실시하여 입자를 선정하였다. 이에 대한 모세관 상승 정도를 결정하기 위하여

1973년 Lobacz 등이 제시한 공식을 이용하여 조사하였다. 이에 대한 공식은 아래와 같다.

$$h_c = \frac{C}{e * D_{10}}$$

여기서

$h_c$  = capillary rise (cm)

$C$  = constant (can range from 0.1 to 0.5  $cm^2$ )

$e$  = void ratio

$D_{10}$  = soil particle size, 10 percent finer passing (cm)

바. 토양과 수분함량 상관성 이론적 배경

Brooks and Corey(1964)는 아래 토양이 가지는 실질포화도에 대해 다음과 같은 정의하고 있다. 실질포화도는 포화수분함량에서 잠재수분함량을 제한 후 토양이 가지는 수분함량과 잠재수분함량의 차이의 비로 정의하고 있다.

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{h_d}{h} \right)^n \quad h \geq h_d$$

$$S = 1 \quad h < h_d$$

여기서

$\theta$  : 토양수분함량 ( $cm^3 \ cm^{-3}$ ),

$\theta_s$  : 포화수분함량 ( $cm^3 \ cm^{-3}$ )

$\theta_r$  : 잠재수분함량 ( $cm^3 \ cm^{-3}$ ),

$S_e$  : 실질 포화도

$h_d$  : 공기흡수력(air entry suction, cm),

$n$  : 계수 .

또한 Brooks와 Corey(1964)는 상기와 같은 수분함량이 가지는 수리전도특성을 아래와 같은 공식으로 나타내고 있다

$$K(S) = K_s \left( \frac{h_d}{h} \right)^m = K_s S^{l+1+2/n}$$

$$k(h) = k_s \left( \frac{h_d}{h} \right)^m = k_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{m}{n}}$$

여기서  $k_s$ 와  $k_h$ 는 포화수리전도도와 불포화수리전도를 1는 토양공극굴곡요인,  $m$ 은  $(1 + 1/n) + 2$ 로 나타내고 있다. 토양공극굴곡요인은 아무 수나 가능하나 주로 2를 적용하고 있다.

### 3. 연구 내용 및 방법

#### 가. 새만금 간척지 현장 조사 후 시료 채취 후 시료 이화학 특성 검토

##### (1) 토양

시험토양은 전라북도 김제시 광활면 새만금 간척지의 문포동 토양을 선택하였다. 이 토양은 하해혼성층적층을 모재로 생성된 토양으로 시료채취 당시 작물재배가 아직 이루어지지 않은 토양이었다 (그림 31).

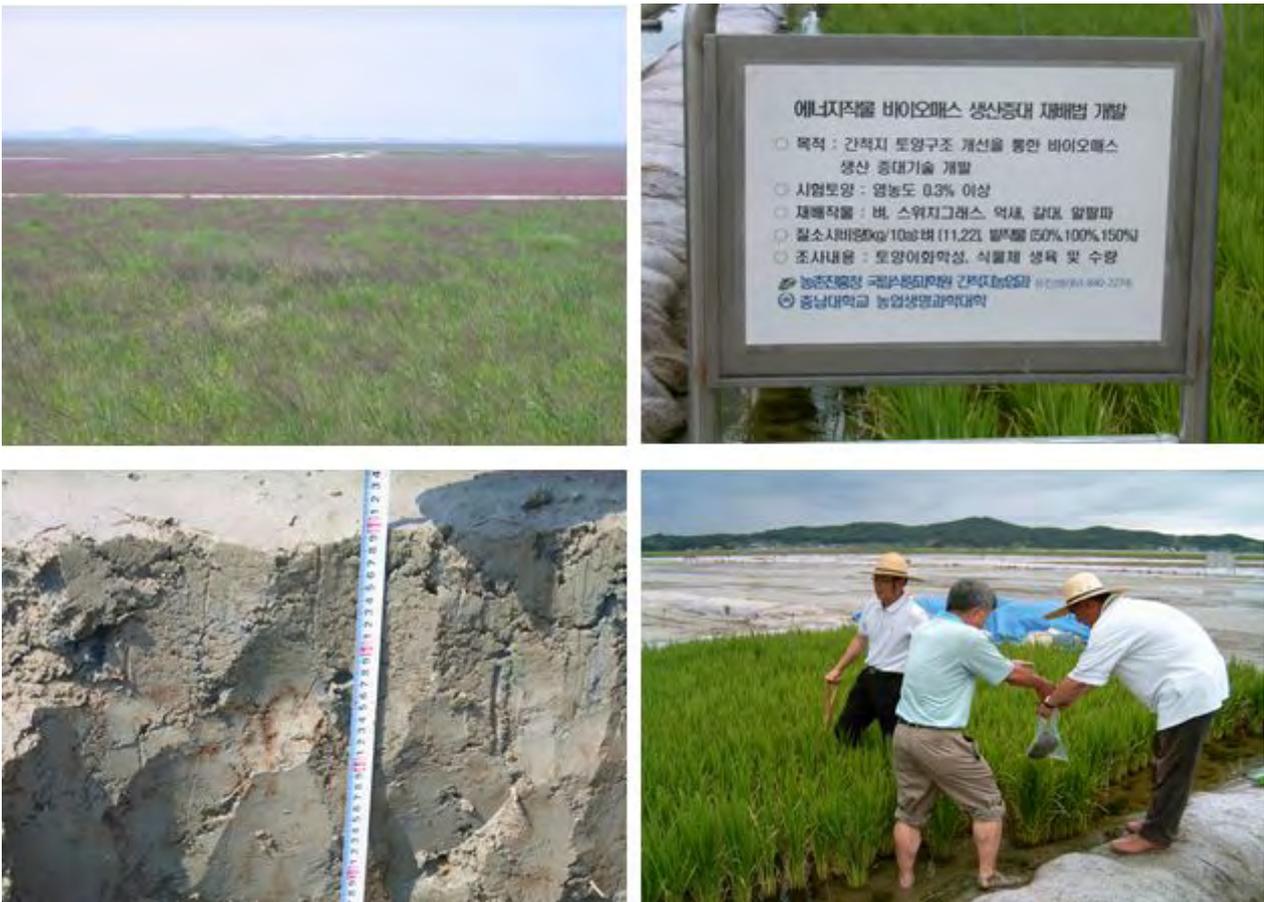


그림 31. 새만금 간척지 시험포 현장 (전북 김제 광활면 창제리 소재)

토양시료는 농촌진흥청 국립식량과학원에서 조성한 시험포장(그림 31)에서 채취하였는데, 이 포장의 대표지점에서 토양 깊이별로 0~60cm까지 10cm단위로 용적밀도 측정을 위한 비교란 시

료와 토양화학성 분석을 위한 교란시료를 채취하였다. 또한 이 토양의 지표면에서 30cm 깊이까지의 표토와 30~60cm 깊이까지의 심토를 채취하여 음건 후 2mm체를 통과시킨 것을 토양의 이화학성 분석과 토주(Soil column) 실험에 사용하였다.

토양분석은 농촌진흥청의 토양화학분석법(1988)에 준하여 실험을 실시하였다. 토성(Soil texture)은 토양을 5% Sodium hexameta- phosphate 용액에 의해 분산시킨 후 ASTM #152 Hydrometer를 이용해 측정하였고, pH와 EC는 물에 의한 1:5 용출법으로 측정하였다. 양이온치환용량(cation exchange capacity, CEC)은 1N-Ammonium acetate법으로 분석하였고, 유기물함량(organic matter, OM)은 Tyurin법으로 분석하였다. 토양의 치환성양이온분석은 토양시료에 80% 에탄올을 1:10의 비율로 가하고 30분간 진탕한 뒤 원심분리하여 상등액을 제거하는 방식으로 3회 세척하여 가용성 양이온을 제거한 후 토양을 1N NH<sub>4</sub>OAc 용액(pH 7.0)으로 침출하여 침출액의 양이온을 ICP(Varian Vista-MPX)를 사용하여 분석하였다.

Table 31과 32에 시험토양의 물리·화학성을 나타내었다. 시험토양은 점토함량이 적고, 미사의 함량이 많은 미사질양토(Silt loam)로 토양의 pH는 표토 7.7, 심토 7.8이었고, 전기전도도(Electric conductivity; EC)는 표토 33.9 dS m<sup>-1</sup>, 심토 14.7 dS m<sup>-1</sup>로 높았으며, 치환성소듐백분률(Exchangeable sodium percentage; ESP)은 표토 45.1%, 심토 56.2%를 나타내어 시험토양은 염농도가 높고 치환성 Na<sup>+</sup>함량이 높은 saline-sodic soil이었다.

Table 31. Physico-chemical properties of the soil collected from the Saemangeum reclaimed land

Soil	pH	EC <sup>1</sup>	OM <sup>2</sup>	CEC <sup>3</sup>	ESP <sup>4</sup>	Particle Size Distribution			
	(1:5)	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	%	Clay	Silt	Sand	Soil Texture
Surface	7.7	33.9	1.5	7.11	45.1	---- % ----			
Subsurface	7.8	14.7	1.5	7.19	56.2	6.1	56.1	37.8	SiL
						5.4	57.1	37.5	SiL

Notes) <sup>1</sup> : Electric conductivity; <sup>2</sup> : Organic Matter; <sup>3</sup> : Cation exchange capacity

$$\text{Exchangeable sodium percentage}(ESP) = \frac{\text{Exchangeable Na}^+(\text{cmol}_c \text{kg}^{-1})}{\text{CEC}(\text{cmol}_c \text{kg}^{-1})} \times 100$$

Table 32. Distribution of soluble and exchangeable phases of cation in soils collected from the Saemangeum reclaimed land

Cations											
Exchangeable				Soluble				Total			
K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na
----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----											
0.75	0.84	2.01	3.06	1.29	1.40	7.55	19.30	2.04	2.24	9.56	22.36
0.50	0.85	1.69	2.17	1.17	1.07	4.19	13.45	1.67	1.92	5.88	15.62

(2) 석탄바닥재 분석

석탄바닥재의 화학적 조성은 시료와 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>의 비율을 1:10으로 혼합하여 micro processing system으로 용융시켜 plate를 만든 후 X-선 형광분석기(PW 2400, Phillips)로 분석하였다. X-선 회절분석(D/Max-B, Rigaku)은 Ni-filter와 CuKα X-radiation을 사용하여 powder법으로 100 KV, 40 mA, scanning speed 4°/min의 조건으로 5~40°의 범위를 측정하였다. 적외선분광분석은 시료와 KBr을 1:99의 비율로 혼합하여 KBr disk를 만들어 Fourier Transmittance Infrared spectrophotometer (MB104, Bomen)로 4000에서 500 cm<sup>-1</sup> 범위를 측정하였다.

나. 토양의 보수력 및 수분흡착압력별 이온분포 특성

보수력 측정은 증류수로 16시간 동안 충분히 포화시킨 토양시료를 압력챔버(Pressure porous plate chamber)에 넣고 0.3 bar의 압력을 48시간 가한 후 토양의 무게를 측정하고, 이 시료를 105°C에서 24시간 건조 후 무게를 측정하여 0.3bar 압력에서의 수분함량을 조사하였다. 이와 동일한 방법으로 1bar, 3bar, 5 bar, 10 bar, 15 bar 압력에서 수분함량을 조사하여 압력별 보수력을 건조에 대한 무게비로 조사하였다.

$$\Theta_g(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Θ<sub>g</sub>(%) : 중량수분함량

W<sub>w</sub> : 수분함량 = 습윤토양 무게 - 건조토양 무게

W<sub>s</sub> : 건조토양 무게

또한 토양시료의 증류수로 16시간 동안 포화시킨 토양시료를 48시간동안 정치하여 자연배수시킨 후 토양의 무게를 측정하고, 105°C에서 24시간 건조 후 다시 무게를 측정하여 시험토양의 포장용수량(Field capacity)을 측정하였다.

(1) 용적밀도별 수리전도도 변화

간척지토양의 용적밀도에 따른 투수성을 밝히고자 용적밀도별 토주를 만들어 투수성을 조사하였다.

(가) 토주(Soil Column) 조건

토주는 직경 40cm의 Acryl column(I.D 4.9cm)에 2mm체를 통과시킨 표토를 Table 33과 같이 5가지 용적밀도로 충전하여 만들었고 토주의 높이는 20 cm로 하였다.

Table 33. Bulk densities for measuring hydraulic conductivities(K) of the top soil

Bulk Density (g cm <sup>-3</sup> )	Pore volume (cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
1.30	192.13	50.94
1.35	185.02	49.06
1.40	177.90	47.17
1.45	170.78	45.28
1.50	163.67	43.40

(2) 용적밀도별 수리전도도

수리전도도(hydraulic conductivity, K)의 측정은 토주를 증류수를 이용하여 하향 포화시킨 후 토주의 상단부에 10cm깊이로 일정수위(Constant head method)를 유지하면서 조사하였다. 이때 토주의 바닥면에서 용출수를 수집하여 시간과 공극수량(Pore volume)에 따른 K값의 변화를 조사하였다. 이 때 K는 Darcy's Law에 따라 계산하였다(Hillel, 1998).

$$K = \frac{q}{\left(\frac{\Delta H}{L}\right)}$$

여기서, K : 수리전도도(Hydraulic conductivity)

q(flux) :  $\frac{Q}{A}$ 로 단위시간당 단위 단면적을 통과하는 물의 양

(Q : 유량, A : 토주의 단면적)

$\frac{\Delta H}{L}$  : 단위 토양길이 당 수두차이(Hydraulic gradient)

(3) 석고 혼입비율에 따른 수리전도도 변화 및 이온용출 특성

간척지토양의 석고 혼입비율에 따른 토양의 투수성 및 용질이동 양상을 밝히고자 석고의 혼입비율별로 토주를 만들어 토양의 K값 값 및 양이온 용출 특성을 조사하였다.

#### (가) 토주(Soil Column)의 조건

토주는 2mm체를 통과시킨 표토에 분말상태의 시약용 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )를 건조 중량 기준으로 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% 비율로 완전히 혼합한 후 50cm의 Acryl column(I.D 4.9cm)에 토주의 높이를 30cm로 충전하여 만들었다. 이때 토주내 용적밀도는  $1.30 \text{ g cm}^{-3}$ 로 하였다.

#### (나) 수리전도도 및 용출액의 화학성

K의 측정은 토주를 증류수를 이용하여 하향 포화시킨 후 토주의 상단부에 10cm깊이로 일정수두(Constant head method)를 두고 토주의 바닥면에서 용출수를 수집하여 시간과 공극수량(Pore volume)에 따른 K의 변화를 조사하였고 용출수의 EC 변화와 양이온의 용출특성 변화를 조사하였다. 또한 토주의 용출시험을 종료한 후 토주의 토양을 5cm 단위로 절단하여 토양의 화학성을 분석하였다. 여기서 토양의 양이온 분석은 1.1에서 제시한 방법과 같다.

#### (4) 다층토양에서 수분과 이온의 용출 특성

##### (가) 단일층 토양의 수리전도도

###### ① 표토와 심토의 수리전도도

K의 측정을 위한 토주는 2mm 체를 통과시킨 시험토양을 Acryl column(I.D 4.9cm)에 토주의 높이를 표토는 30 cm, 심토는 20cm, 토주내 용적밀도를 표토는  $1.30 \text{ g cm}^{-3}$ , 심토는  $1.45 \text{ g cm}^{-3}$ 로 충전하여 만들었다. K의 측정은 토주를 증류수로 하향 포화시킨 후 토주의 상단에 10cm깊이의 일정수위(Constant head method)를 두고 토주의 바닥면에서 용출수를 수집하여 시간 경과와 공극수량(Pore volume)에 따른 K값의 변화를 조사하였다. 이 때 용출수를 분석하여 EC와 양이온의 용출 특성을 조사하였다. 또한 용출을 마친 후 토주를 5cm 단위로 절단하여 토주내 토양의 화학성을 분석하였다. K값은 Darcy's Law에 따라 계산하였고(Hillel, 1998), 용출수 및 토양의 양이온은 ICP(Varian Vista-MPX)를 사용하여 분석하였다.

##### (나) 석탄바닥재의 수리전도도

###### ① 석탄바닥재의 이화학적 특성

석탄바닥재(coal bottom ash, CBA)의 화학적 특성은 Table 34과 같다. 석탄바닥재의 pH는 9.2로 높았고 EC는  $2.83 \text{ dS m}^{-1}$ 이었으며 CEC는  $0.64 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타내었다. 석탄바닥재는 바닥재 표면과 내부에 공극을 지닌 다공체로 입경 조성을 Table 35와 같다. 석탄바닥재는 직경 4 mm 이상이 15.5%, 직경 2mm 이상이 30.0%를 차지하여 45.5%가 국제토양학회의 입경구분상 자갈(gravel)에 해당되었다. 따라서 석탄바닥재는 다량의 대공극을 가진 자재이었다.

Table 34. Chemical properties of coal bottom ash.

pH (1:5)	EC	CEC	Cations <sup>†</sup>			
			K	Ca	Mg	Na
	dS m <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	-----	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	-----	
9.2	2.83	0.64	0.09	0.42	0.51	1.27

<sup>†</sup> 1N NH<sub>4</sub>OAc extraction

Table 35. Particle composition of coal bottom ash.

Particle size (mm)	Ratio (%)
4.0 <	15.5
2.0 ~ 4.0	30.0
1.0 ~ 2.0	32.0
0.5 ~ 1.0	11.3
< 0.5	11.4
Total	100.0

### ② 석탄바닥재의 수리전도도 및 이온용출 특성

석탄바닥재의 투수성을 측정하기 위해 각각 40cm와 50cm의 Acryl column(I.D 4.9cm)에 석탄바닥재를 20cm와 30cm로 충전하여 컬럼내 용적밀도를 0.96 g cm<sup>-3</sup>로 하였다. K의 측정은 토주를 증류수로 상향 포화시킨 후 토주의 상단부의 수두를 10cm 깊이로 일정수하게 유지하면서 조사하였다. 이때 토주의 바닥면에서 용출수를 수집하여 시간경과에 따른 K값을 Darcy's Law에 따라 계산하였고(Hillel, 1998), 용출수의 EC와 양이온을 ICP(Varian Vista-MPX)를 사용하여 분석하였다.

### ③ 다층토양(Multi-layered soil)의 수리전도도 및 이온용출 특성

Macroporous layer를 가진 간척지 다층토양에서 수분과 이온의 이동특성을 구명하기 위하여 표토 하부에 대공극층(석탄바닥재층)을 가진 다층토주(Fig. 32)를 제작하여 K 값을 측정하였다.



Fig. 32 Multi-layered soil columns used for measurement of hydraulic conductivity

또한 다층토주에서 K의 직접 측정과 함께 Jury와 Gardner(1991)에 의해 제안된 effective hydraulic conductivity( $K_{eff}$ ) 계산식을 적용하여 단일토층의 K로부터 다층토양의 전체 K를 계산하고 실측치와 비교하였다.

$$K_{eff} = \frac{\sum_{j=1}^N L_j}{\sum_{j=1}^N \left(\frac{L_j}{K_j}\right)}$$

여기서 L : 전체 토양의 깊이

$L_j$  : 각 층의 토양 깊이

$K_{eff}$  : Effective hydraulic conductivity

$K_j$  : 각 층의 수리전도도

(다) 수리전도도 및 이온의 용출특성

① 토주(Soil Column)의 제작

다층토주는 표토층과 심토층 및 석탄바닥재층을 표 37과 같은 용적밀도 조건으로 충전하여 만들었다.

- 표토층 토주 : 2mm를 통과한 표토에  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $5\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 을 완전 혼입하여 Acryl Column(ID4.9cm×L50cm)에 용적밀도를  $1.30\text{ g cm}^{-3}$ 로 30cm 깊이로 충전하였다.
- 심토층 토주 : 심토를 내경(ID4.9cm)의 Acryl Column에 20, 30cm 깊이로 충전하였다. 이때 용적밀도(Bulk density)는  $1.45\text{ g cm}^{-3}$ 으로 조정하였다.
- 석탄바닥재층 토주 : 석탄바닥재를 내경(ID 4.9cm)의 Acryl Column에 10, 20, 30cm 깊이로 충전하였다. 이때 용적밀도(Bulk density)는  $0.96\text{ g cm}^{-3}$ 로 조정하였다.
- 다층 토주
  - ☞ 표토층+석탄바닥재층 토주는 표토 토주(30cm)에 10, 20cm의 석탄바닥재 토주를 연결하여 40, 50cm의 다층토주를 제작하였다.
  - ☞ 표토층+석탄바닥재층+심토층 토주는 표토 토주(30cm)에 20, 30cm의 석탄바닥재 토주를 연결하고 하단에 20cm 심토 토주를 연결하여 70, 80cm의 다층 토주를 제작 하였다.
  - ☞ 표토+심토 토주는 표토토주(30cm)에 30cm 심토토주를 연결하여 60cm의 다층토주를 제작 하였다.

Table 36. Physico-chemical properties of the top soil used for elution experiment of multi-layered soil column

pH (1:5)	EC <sup>1</sup> dS m <sup>-1</sup>	Cations											
		Exchangeable				Soluble				Total			
		K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na
7.7	33.9	0.82	1.29	2.79	3.48	1.40	1.10	7.37	24.72	2.22	2.39	10.16	28.20

Notes) <sup>1</sup> : Electric conductivity

Table 37. Soil bulk densities in soil columns for measuring hydraulic conductivity(K) and ion elution pattern.

Material	Bulk densities (g cm <sup>-3</sup> )	Pore Volume (cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
Top soil(30cm)	1.30	288.20	50.94
CBA	10cm	91.61	48.58
	20cm	183.21	48.58
	30cm	274.82	48.58
Subsoil(20cm)	1.45	170.78	45.28

## ② 수리전도도 측정

K의 측정은 각각의 다층토주를 증류수로 하향 포화시키고 수두(water head)의 높이를 10cm로 일정하게 유지하면서 토주의 바닥면에서 용출액을 수집하여 시간 경과에 따른 용출액의 부피를 측정하여 Darcy's Law에 따라 K값을 계산하였고(Hillel, 1998) 또한 용출액의 화학성을 분석하였다.

### (라) 다층토양의 양이온 분포

K의 측정 후 다층토주를 5cm 단위로 절단하여 건조 후 토양의 화학성을 분석하였다.

### (마) 다층토양에서 수분과 이온의 모세관 상승 특성

모세관상승 실험에 사용한 토양은 고염도의 표토를 세척하여 사용하였는데 이는 간척지 토양의 제염이 이루어진 후 지하수의 모세관 상승에 의한 재염화(resalinization) 양상을 구명하기 위함이었다. 즉, 표토에 1N NH<sub>4</sub>OAc를 1:5의 비율로 가한 후 1시간 동안 진탕하고 8시간 후 상등액을 제거하는 방식으로 토양을 2회 세척하여 토양중 양이온을 제거하였고 이 토양을 건조하여 토주실험에 사용하였다. 표 36~37에 모세관상승 실험에 사용한 다층토주 토양의 화학성을 나타내었다. 토양의 수용성양이온 및 총양이온은 토양에 증류수와 1N NH<sub>4</sub>OAc를 각각 1:10의 비율로 가한 후 30분간 진탕하여 용출액의 양이온을 분석하였다. 분석결과 토양의 양이온은 세척전과 비교하여 볼 때 대부분의 양이온이 제거된 결과를 나타내었다(Table 38).

Table 38. Chemical properties of the soil used for capillary rise experiment.

pH	EC	Water-soluble Cations				Extractable cations <sup>1</sup>			
		K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na
	dS m <sup>-1</sup>	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----							
5.5	7.53	0.05	0.10	0.13	0.18	0.09	0.31	0.36	0.21

<sup>1</sup> : 1N NH<sub>4</sub>OAc extraction

① 토주(Soil Column)

토주는 직경 5cm의 Acryl column에 토양과 석탄바닥재를 표 3-8와 같은 용적밀도로 충전하여 토양과 석탄바닥재를 60cm로 충전한 토주와 표토층 30cm와 심토층 10cm 사이에 석탄바닥재층을 각각 5, 10, 20, 30cm 깊이로 충전한 토주를 제작하였다.

- 표토층(TS) 토주 - 표토층 토주는 내부직경 5cm의 Acryl Column에 토양을 용적밀도 1.47 g cm<sup>-3</sup>로 하여 30cm, 60cm 깊이로 충전하여 만들었다.
- 심토층(SS) 토주 - 심토층 토주는 내부직경 5cm의 Acryl Column에 토양을 용적밀도 1.47 g cm<sup>-3</sup>로 하여 10cm 깊이로 충전하여 만들었다.
- 석탄바닥재층(CBA) 토주 - 석탄바닥재층 토주는 석탄바닥재를 내부직경 5cm의 Acryl Column에 용적밀도를 0.96 g cm<sup>-3</sup>로 하여 각각 5, 10, 20, 30, 60cm 깊이로 충전하여 만들었다.
- 표토층+석탄바닥재층+심토층(TS+CBA+SS) 토주 - 표토층 30cm 토주에 5, 10, 20, 30cm의 석탄바닥재층 토주를 각각 연결하고, 그 하단에 심토층 10cm 토주를 연결하여 45, 50, 60, 70cm의 길이의 다층 토주를 만들었다.

Table 39. Bulk densities of multi-layered soil columns used for capillary rise experiment.

Soil column		Bulk densities	Pore Volume	Porosity
		(g cm <sup>-3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(%)
TS	30cm	1.47	262.3	44.53
	60cm	1.47	524.6	44.53
CBA	5cm	0.96	47.7	48.58
	10cm	0.96	95.4	48.58
	20cm	0.96	190.8	48.58
	30cm	0.96	286.1	48.58
SS	60cm	0.96	572.3	48.58
	10cm	1.47	87.43	44.53

① 단일층토양의 모세관 상승 특성

단일층 토양의 모세관상승 특성을 구명하고자 2mm를 통과시킨 표토를 직경 4.9cm의 Acryl

column에 용적밀도를 각각 1.30, 1.45 g cm<sup>-3</sup>로 충전하여 1m 높이의 토주를 각각 제작하였다. 각 토주의 하단에 바닷물을 이용하여 1cm 깊이의 수위를 두고 용적밀도별 해수의 모세관상승 특성을 조사하였다.

② 다층토양에서 수분과 이온의 모세관 상승 특성

표토 하부에 대공극 층위(macroporous layer)를 가진 간척지 다층토양에서 염류의 모세관 상승 특성을 구명하고자 석탄바닥재층을 대공극 층으로 한 다층토주(multi-layered soil column)를 제작하여 모세관상승 실험을 수행하였다.



Fig. 33. Soil columns used for capillary rise experiment for mono- and multi-layered soils.

(바) 모세관 상승시험

토주실험은 토주의 하단에 해수 1cm 깊이의 지하수위를 두고 시간경과에 따른 해수의 모세관 상승속도를 측정하였다. 토주시험에 사용한 해수는 전북 김제시 심포항에서 채취하였고, 해수의 주요 양이온 함량은 Table 40과 같다.

Table 40. Major cation concentrations in sea water used for capillary rise experiment.

Sampling site	pH	EC	Cations of sea water			
			K	Ca	Mg	Na
		dS m <sup>-1</sup>	----- cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> -----			
Simpo port	8.17	41.8	1.13	1.80	8.60	35.67

(사) 다층토양에서 수분과 이온의 분포

70일간의 모세관 상승시험 후 각 토주를 2.5cm 단위로 절단하여 토양수분 및 양이온 함량을 분석하였다. 이때 토양수분 함량은 건토중량법으로 하였고, 양이온은 ICP(Varian Vista-MPX)를 사용하여 분석하였다.

다. 구조층 시험 설계 및 모사 시험

간척지 토양구조를 개선하여 염류 제어 및 작물 생육에 적합한 수분을 조절하기 위해서는 토양구조 개선 대상 토양과 처리 소재에 대한 특성을 조사하였다.

- 지하수위를 적정 깊이 이하로 낮추고, 배수에 의한 제염 시 투수속도 향상시키고 지하수 상승을 차단하는 심토 토양관리 기술 개발 필요하며 작부층인 표층의 경우 작물 생육 가능한 적정 유효심 50cm 정도를 확보하는 토양개선 기술 개발이 필요하다.
- 이에 대한 개선방법으로는 심층토의 경우 지하수위와 작부층인 표토 사이에 지하수의 모세관상승을 방지하기 위한 차단층 설치 및 표토의 경우 토양개량제를 처리하여 작부층 유효토심을 확보하여야 하였다.



그림 34. 신속제염과 지하수 모세관상승 차단 토양구조

- 담수나 관개 등의 방법으로 제염 시 용출수가 쉽게 빠져나갈 수 있도록 배수환경을 개선하여야 한다.
- 이에 대한 추정 개선 토양구조는 다음과 같이 정하였다.

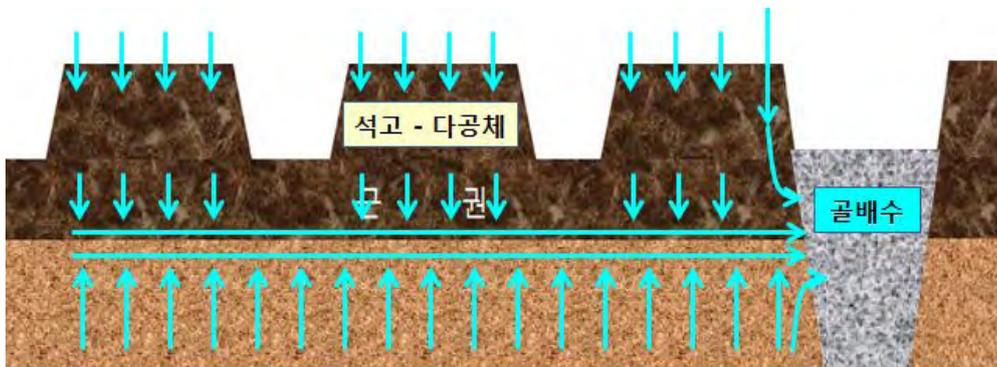


그림 35. 표층 토양개량제 처리와 골구조 개선에 의한 배수 효율 증대 제염화 구조

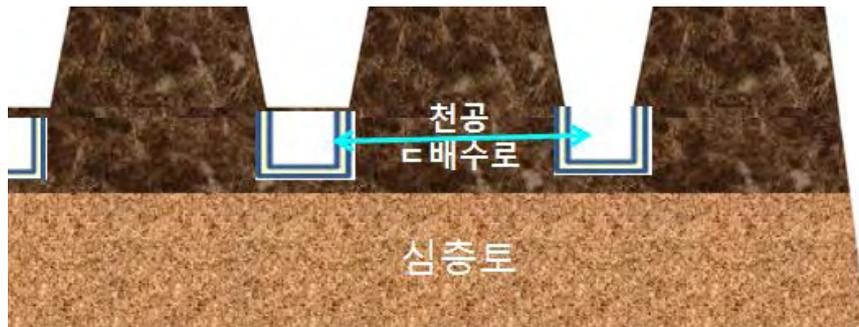


그림 36. 골에 천공 ㄷ자 천공배수로 설치에 의한 제염 구조



그림 37 지중암거배수에 의한 제염관리구조

## 라. 연구 결과

### (1) 토양의 물리·화학적 특성

시험토양은 하해혼성층적층을 모재로 한 문포통 토양으로 토양구조의 발달이 미약한 무구조의 토양으로 갈색의 철반문을 다량 함유하고 있었다. 깊이별로 토성을 분석한 결과 0~30cm 깊이의 토양은 미사질양토(Silt loam)였고, 30~60cm 깊이의 토양은 사양토였다. 또한 지표면에서 20cm까지의 점토함량은 하층토보다 3% 정도 높게 나타났는데, 이는 토양표면의 풍화 작용에 기인한 것으로 추정되었다.

10cm 깊이별로 조사한 토양의 용적밀도는 표토 10cm 깊이 이내의 토양은  $1.35 \text{ g cm}^{-3}$ 로 비교적 낮은 용적밀도 값을 유지하고 있었으나 그 하부의 10cm~20cm 깊이에서는  $1.54 \text{ g cm}^{-3}$ 로 높은 용적밀도를 나타내었고 그 하부에서도  $1.50 \text{ g cm}^{-3}$  내외의 용적밀도를 나타내었다 (Table 41). 이와 같이 높은 용적밀도는 간척지토양의 토양구조가 무구조토양이고 토양 중 미사의 함량이 매우 높으며, 토양 중 Na염이 토양 콜로이드의 분산제 역할을 하여 토양입단을 불량하게하고 토양 공극률을 낮추기 때문으로 추정된다(Hwang et al., 1991).

Table 41. Physico-chemical properties of the soil collected from the Semangeum reclaimed land through the soil profile

Depth (cm)	Particle Size Distribution			Soil Texture	BD <sup>1</sup>	pH (1:5)	EC <sup>2</sup>
	Clay	Silt	Sand				
	---- % ----				g cm <sup>-3</sup>		dS m <sup>-1</sup>
0~10	11.7	53.3	35.0	SiL	1.35	7.8	40.6
10~20	10.0	51.7	38.3	SiL	1.54	7.6	22.5
20~30	6.7	53.3	40.0	SiL	1.51	7.5	19.0
30~40	6.7	48.3	45.0	SL	1.50	7.5	16.5
40~50	6.7	46.7	46.7	SL	1.49	7.8	17.8
50~60	6.7	43.3	50.0	SL	1.47	7.8	14.8

<sup>1</sup> : Bulk density    <sup>2</sup> : Electric conductivity

토양의 pH는 토양깊이별로 7.5에서 7.8로 높은 값을 나타내었고 특히 표토 30cm이내에서는 지표면에 가까울수록 높은 pH 값을 나타내었는데 이는 토양중 양이온의 모세관 상승과 토양 표면에서의 수분증발로 인해 토양중 양이온이 표토의 상부에 집적된 결과로 판단된다. 토양의 EC는 토양내 양이온과 음이온의 함유량에 의해 결정되어 토양중의 염농도의 지표로 이용된다. 간척지토양은 해수의 영향을 받아 매우 높은 염류를 함유하고 있으며 따라서 매우 높은 EC를 나타낸다.

시험포장의 토양깊이별 EC는 14.8~40.6 dS m<sup>-1</sup>로 매우 높은 값을 나타내었고 또한 지하부위로부터 지표면에 가까울수록 높은 값을 나타내었는데 이는 토양수분의 모세관 상승 및 토양 표면에서 증발로 인해 토양중의 염류가 지표면 가까이에서 축적된 결과로 추정된다. 그러나 이러한 경향은 강우의 여부와 강우 후 시간 경과에 따라 달리 나타날 것이므로 간척지토양의 염농도는 일정한 상태로 유지되기보다는 기상의 영향을 받아 가변적인 것으로 판단된다.

석탄바닥재의 입도분포는 0.25~2.0 mm 사이가 76.6% 이었으며, 자갈(2 mm 이상) 함량도 19.1%로서 입자크기가 매우 큰 것으로 나타났다. 또한, 0.1 mm 이하의 크기도 4.3%로서 대부분이 모래 또는 자갈 성분인 것으로 나타났다 (그림 40).

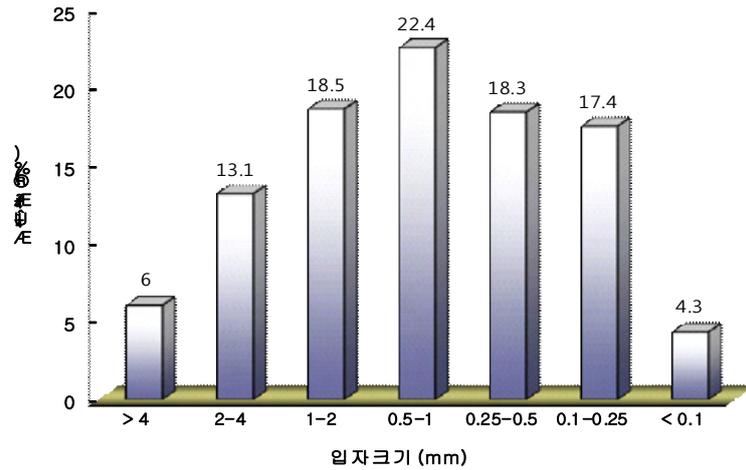


그림 38. 석탄바닥재의 입도 분포

한편 간척지 토양구조개선재로 사용할 석탄바닥재의 광물학적 특성과 이화학적 특성을 조사하였다. 석탄바닥재의 결정학적 특성을 조사하기 위하여 X-선 회절분석한 결과 quartz, mullite 및 felspars가 주요 결정상으로 존재하였다. Quartz는 4.26, 3.35, 2.29 및 2.13 Å, mullite는 5.39, 2.70, 2.55 및 2.21 Å의  $d$ -space에서 peak가 나타났다. 일반적으로 quartz는 규산염광물 중에서도 매우 안정한 것으로 알려져 있으며, 또한 비산재에서는 잘 나타나지 않는 felspar의 peak가 4.08 및 3.20 Å에서 확인되었다(그림 38).

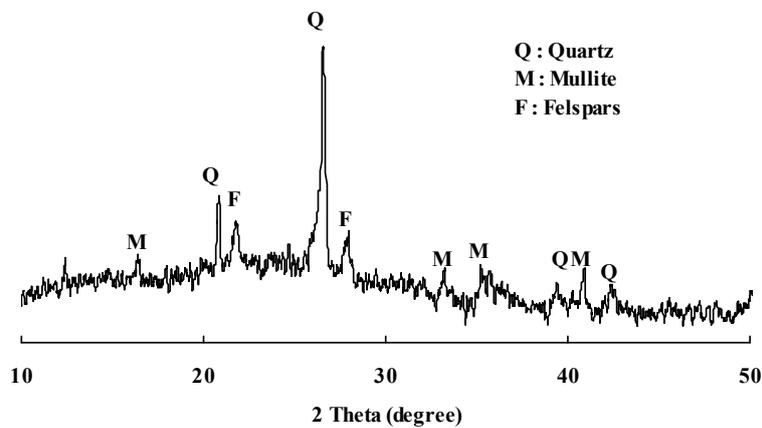


그림 39. 석탄바닥재의 X-선 회절분석 패턴.

석탄바닥재의 기능성 그룹을 확인하기 위하여 FT-IR을 이용하여 분석한 결과, 3430과 1600  $\text{cm}^{-1}$  부근의 흡수 band는 O-H의 stretching과 bending에 의한 것이 1108  $\text{cm}^{-1}$  부근의 흡수 band는 quartz에 의한 것으로 판명되었다 (그림 39).

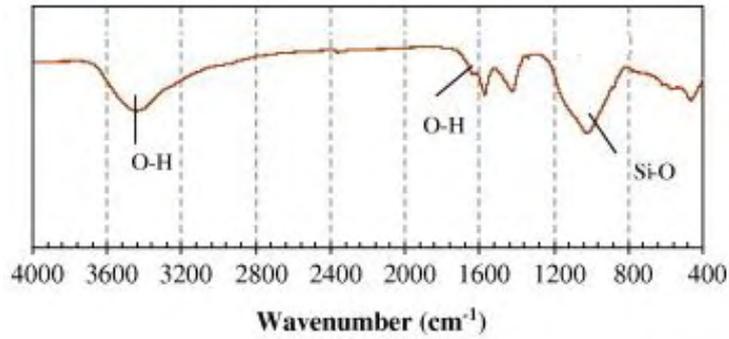


Fig. 40. FT-IR spectra of bottom ash

석탄바닥재의 주요 구성성분은  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  및  $\text{CaO}$  등 이었으며, 이들의 함량은 각각 48.1%, 17.1%, 19.1% 및 7.3% 이었다. 이와 같은 결과는 기존에 보고된 석탄바닥재 및 석탄재의 화학적 조성은  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$  순이었으나, 본 연구에 사용된 석탄바닥재는  $\text{SiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$  순으로  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  및  $\text{CaO}$  함량이 높고,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 상대적으로 낮은 특성을 나타내었다 (표 42). 이와 같은 결과로 판단할 때, 석탄의 종류 및 연소조건 등에 따라 석탄바닥재의 광물학적 및 이화학적 특성이 상이하지만, 본 연구에서 활용된 석탄바닥재는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  함량이 높고,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량 및 pH가 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

표 42. 석탄바닥재의 광물 조성

Composition	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MnO	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	Trace
(%)	48.1	17.1	19.1	0.2	7.3	1.7	1.8	1.4	3.3

석탄바닥재의 pH는 활산도 8.1 및 잠산도 8.5로서 일반적으로 무연탄의 연소로부터 발생하는 석탄재(pH 8.5-10.0)에 비해 약간 낮은 경향을 나타내었다. 또한, 전기전도도 2.46 dS/m, 총 인 0.31% 및  $\text{SO}_3$  2.38%로서 황의 함량이 다소 높은 것으로 나타났다 (표 43).

표 43. 석탄바닥재의 이화학적특성

pH (1:5)		EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	T-N ( $\text{g kg}^{-1}$ )	O.M	Av- $\text{P}_2\text{O}_5$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
Active	Residual				
8.1	8.5	2.46	0.43	13.2	13.1

석탄바닥재를 증류수와 0.1N HCl을 이용하여 추출되는 중금속을 조사한 결과 수용성과 교환성 모두 토양환경보전법상의 우려 기준보다 매우 낮은 것으로 조사되었다 (표 44)

Table 44. Amount of heavy metals recovered as soluble and exchangeable from coal bottom ash

Extraction methods	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	As
	(mg kg <sup>-1</sup> )						
Soluble(Distilled water)	-	0.473	0.025	-	0.012	-	0.006
Exchangeable(0.1N HCl)	0.018	0.004	0.266	0.942	0.328	0.184	0.023
Threshold	1.5	50	100	300	40	4	6

Table 45. Changes in chemical properties of the bottom ash with sequential washing

No. Washing	pH (1:5H <sub>2</sub> O)	EC dS m <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> -N mg kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> -N mg kg <sup>-1</sup>	Avail P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Exchangeable Cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )			Cl %
						K	Ca	Mg	
None	8.76	6.98	10.21	2.05	11.9	0.12	3.57	2.02	0.04
1	8.83	2.15	5.53	2.13	9.93	0.05	3.55	1.31	0.01
2	8.96	2.08	4.73	1.92	9.12	0.05	3.47	1.26	< 0.01
3	8.90	1.68	4.05	1.59	8.53	0.05	3.42	1.23	< 0.01
4	8.89	1.68	3.84	1.43	8.33	0.05	3.22	1.16	< 0.01
5	8.77	1.63	3.60	1.39	7.67	0.04	3.31	1.13	< 0.01

바닥재의 함유된 중금속성분을 조사한 결과 발전소 매립지에 매립된 바닥재에 함유된 중금속 함량은 우려 기준치 이하로 조사되었다. 그리고 이 바닥재와 증류수의 비를 1:5로 연속 세척한 결과 5회 세척 후 안정화 상태로 더 이상 세척수에서 중금속은 검출되지 않았다 (표 46).

Table 46. Amount of heavy metals remained on the bottom ash after sequential washing with distilled water

No. Washing	Heavy metals (mg L <sup>-1</sup> )						
	Cd	As	Cu	Cr	Pb	Ni	Zn
None	0.018	0.029	1.24	0.18	1.26	0.42	4.34
1	0.010	0.023	0.85	0.09	0.47	0.24	0.89
2	0.008	0.011	0.62	0.06	0.11	0.16	0.67
3	0.005	0.009	0.41	0.03	0.05	0.08	0.22
4	0.002	0.005	0.26	0.01	0.01	0.04	0.12
5	< 0.001	0.005	0.19	0.01	0.01	0.04	0.12
Threshold	1.5	6.0	50.0	4.0	100.0	40.0	300.0

## (2) 토양의 보수력 특성

간척지토양의 보수력은 0.3bar에서 3bar까지는 압력의 증가에 따라 크게 감소하였으나 3bar~

15bar까지는 압력의 증가에 따른 보수력의 감소폭이 적게 유지되었다. 이는 시험포장의 토성이 미사질양토로 점토함량이 적어 낮은 수분흡착압력 범위에서 크게 수분함량이 감소한 것으로 추정된다. 또한 표토는 심토보다 모든 수분흡착압력에서 보수력이 약간 더 높았는데 이는 표토의 점토함량이 심토보다 0.7% 정도 더 많기 때문으로 판단된다. 시험토양의 토양수분흡착력별 수분 보유력을 그림 41에 나타내었다. 시험토양은 포장용수량 조건에서 표토 45.8%, 심토 41.1%의 수분을 보유하고 있었고, 영구 위조점의 토양수분흡착력(15bar)에서 표토 5.1%, 심토 4.2%의 수분을 보유하고 있었다. 따라서 시험토양의 포장용수량에서 영구위조점의 수분 함량을 뺀 토양의 유효수분 함량은 표토 40.7%, 심토 36.9%를 나타내었다(Fig. 41).

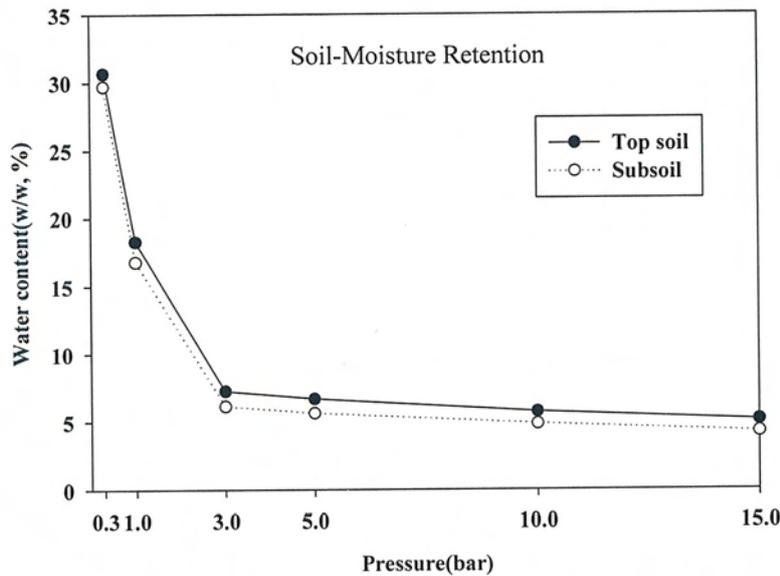


Fig. 41. Changes of water content in top soil and subsoil under different matric potentials measured with pressure plate chamber ranging from 0.3bars to 15.0bars.

### (3) 용적밀도별 수리전도도 변화

간척지토양은 토양의 단면조사에서도 알 수 있듯이 매우 높은 용적밀도를 가지고 있었다. 용적밀도가 증가되면 토양의 공극률이 감소되고, 공극의 크기와 모양 등에 변화가 생기며 따라서 K의 변화가 생길 것으로 판단된다. Jung and Yoo(2007)는 염류도 제어와 관리 문제는 미사가 많은 간척지토양에서 제염과정에서 생성된 경운 반층에 의한 낮은 투수속도와 밀접한 관련이 있다고 하였고 또한 간척지토양은 일반적으로 투수성이 매우 불량하다고 알려져 있다.

용적밀도별 초기 K는 용적밀도  $1.30 \text{ g cm}^{-3}$  토주에서 0.68 공극수량(pore volume) 용출 후  $0.10 \text{ cm hr}^{-1}$ 을 나타내었고, 용적밀도  $1.35 \text{ g cm}^{-3}$  토주에서 0.38 공극수량 용출 후  $0.06 \text{ cm hr}^{-1}$ 을 나타내었으며, 용적밀도  $1.40 \text{ g cm}^{-3}$  토주에서는 0.29 공극수량 용출 후  $0.04 \text{ cm hr}^{-1}$ 를 나타내었다. 또한 용적밀도  $1.45 \text{ g cm}^{-3}$ 에서는 0.38 공극수량 용출 후  $0.06 \text{ cm hr}^{-1}$ 를 나타내었고 용

적밀도  $1.50 \text{ g cm}^{-3}$ 에서는  $0.11 \text{ cm hr}^{-1}$  공극수량 용출 후  $0.02 \text{ cm hr}^{-1}$ 을 나타내었다 (그림 42).

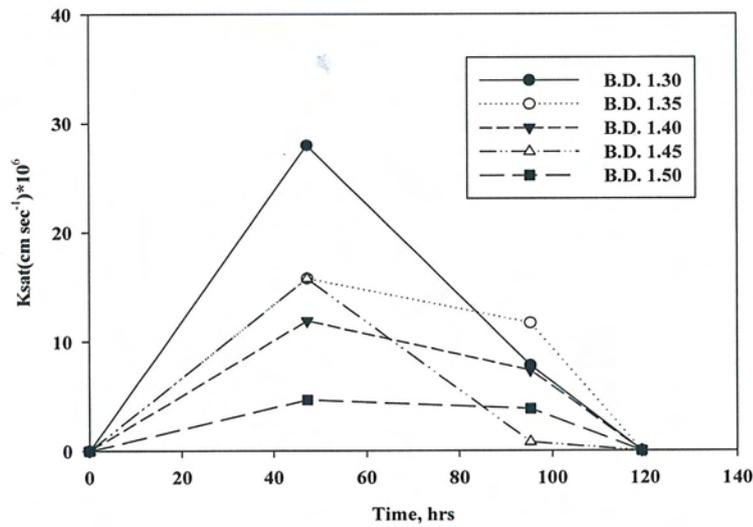


Fig. 42. Changes of saturated hydraulic conductivities(K) of soil columns packed with top soil with different bulk densities.

토주의 초기 K는 용적밀도의 증가에 따라 대체로 감소하는 경향이 보였으나 시간 경과에 따라 투수성은 크게 저하되어 용적밀도에 관계없이 투수가 되지 않아 결국 K값은 0을 나타내는 특성을 보였다(Fig. 41). 이러한 투수 특성은 간척지토양의 가장 두드러진 특징으로 판단되며, 이는 토양중의 높은 치환성  $\text{Na}^+$  함량과 관계되는 것으로 해석되었다. 즉, 많은 연구결과들을 종합해볼 때, 치환성  $\text{Na}^+$  함량이 높은 간척지 토양에 전해질 농도가 낮은 일반 용수를 담수하면 토양의 점토 입자가 분산되고 분산된 점토는 공극수와 함께 중력에 의해 하향 이동하다가 미세한 공극의 막힘이 발생하여 K가 감소되고 결국 투수가 정지되는 것으로 추정된다(Frenkel et al., 1978, Pupisky et al., 1979, Alperovitch et al., 1985).

#### (4) 수리전도도의 변화

토양에 석고를 시용함으로써 얻어지는 효과는 전해질 농도의 증가와 양이온치환 효과에 따른 수리전도도의 증가에 있다(Koo et al., 1986). 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )의 혼입비율별 K의 변화를 그림 4-5에 나타내었다. 석고 0.2%를 혼입한 토주의 초기 K는  $0.57 \text{ cm hr}^{-1}$ 을 나타냈고 이 후 계속 감소하여 241시간 경과 후 안정화된 수리 전도도  $0.01 \text{ cm hr}^{-1}$ 을 나타냈다. 석고 0.4% 혼입 토주의 초기 K는  $0.89 \text{ cm hr}^{-1}$ 이었고, 이후 투수성은 계속 감소하여 222시간(8.29 pore volume) 경과 후 안정화된 K  $0.30 \text{ cm hr}^{-1}$ 의 투수속도를 보였다. 석고 0.6% 혼입토주의 초기 K는  $1.06 \text{ cm hr}^{-1}$ 이었고, 194시간(8.73 pore volume) 경과후 안정화된 K  $0.32 \text{ cm hr}^{-1}$ 의 투수속도를 보였다. 석고 0.8% 혼입토주의 초기 K는  $1.09 \text{ cm hr}^{-1}$ 이었고, 241시간(12.68 pore volume) 경과 후 안정화된 K  $0.54 \text{ cm hr}^{-1}$ 을 보였다(Fig. 42). 석고 혼입비율과 K 사이의 상관관계를 조사한 결과  $K(\text{cm hr}^{-1})$ 와 석고혼입 비율(%) 사이에는  $Y = 0.695X - 0.044$  ( $r = 0.9585$ )의 관계식이 성립

하여, 석고혼입비율의 증가에 의해 간척지토양의 K는 정의 상관관계를 보였다(Fig. 43).

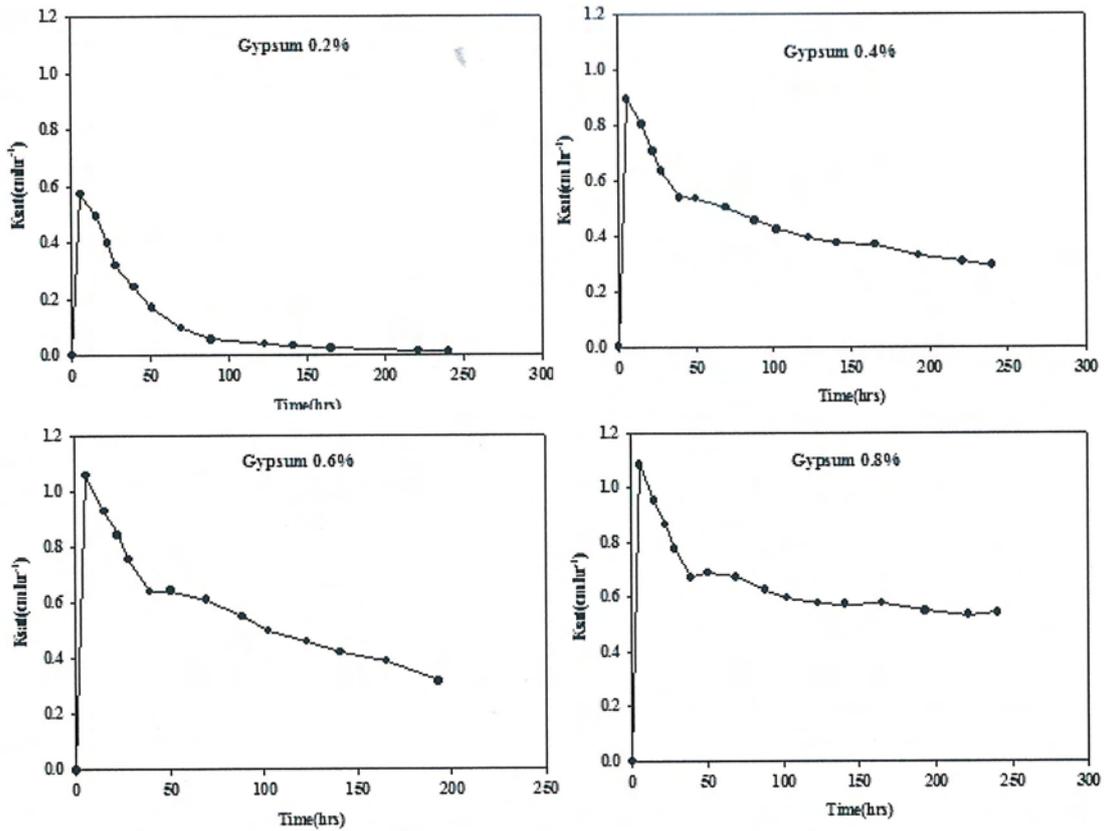


Fig. 43. Changes of saturated hydraulic conductivities(K) of soil columns packed with top soil as affected by gypsum application ratio.

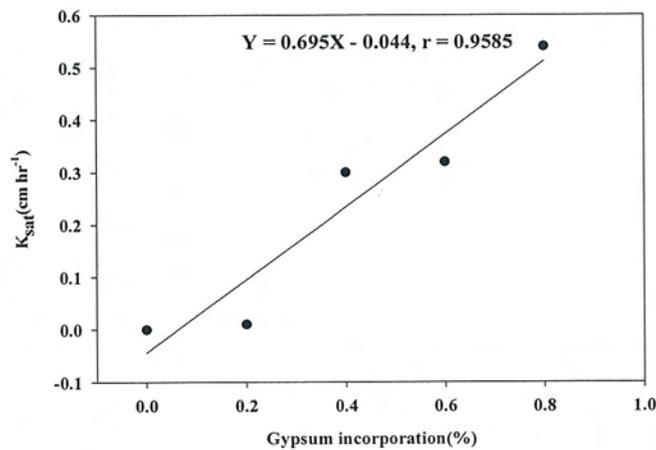


Fig. 44 Relation between percentage of gypsum application(X) and saturated hydraulic conductivity(Y)

(5) 전기전도도의 변화

토양용액중의 EC는 용액내에 존재하는 염류이온의 농도에 비례하기 때문에 EC는 토양용액중의 염분농도의 지표가 된다. 석고혼입 토주(soil column) 용출수의 EC를 시간경과에 대하여 조사한 결과 석고 0.2% 혼입처리 토주의 용출액 EC는 5.7시간(0.24 pore volume)에 매우 높은 수치인  $164.8 \text{ dS m}^{-1}$ 을 나타내었으나, 이후 빠르게 감소되어 28시간(1.02 pore volume) 후  $0.73 \text{ dS m}^{-1}$ 으로 감소하였고 141시간(1.80 pore volume) 후에는  $0.57 \text{ dS m}^{-1}$ 까지 감소하였다. 석고 0.4% 혼입처리 토주의 용출액 EC는 초기  $123.5 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 28시간(1.76 pore volume) 후  $0.43 \text{ dS m}^{-1}$ 로 감소하였고 141시간(6.05 pore volume) 후  $0.12 \text{ dS m}^{-1}$ 까지 감소하였다.

석고 0.6% 혼입토주의 용출액 EC는 초기 (0.48 pore volume)  $106 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 28시간(2.09 pore volume) 후  $3.03 \text{ dS m}^{-1}$ 로 감소하였고, 141시간(7.18 pore volume) 후에는  $0.10 \text{ dS m}^{-1}$ 까지 감소하였다. 석고 0.8% 혼입토주의 용출액 EC는 초기(0.5 pore volume)  $104.2 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 28시간(2.16 pore volume) 후에  $3.07 \text{ dS m}^{-1}$ 까지 감소하였고 141시간(8.08 pore volume)이 경과한 후  $0.09 \text{ dS m}^{-1}$ 까지 감소하였다 (그림 45).

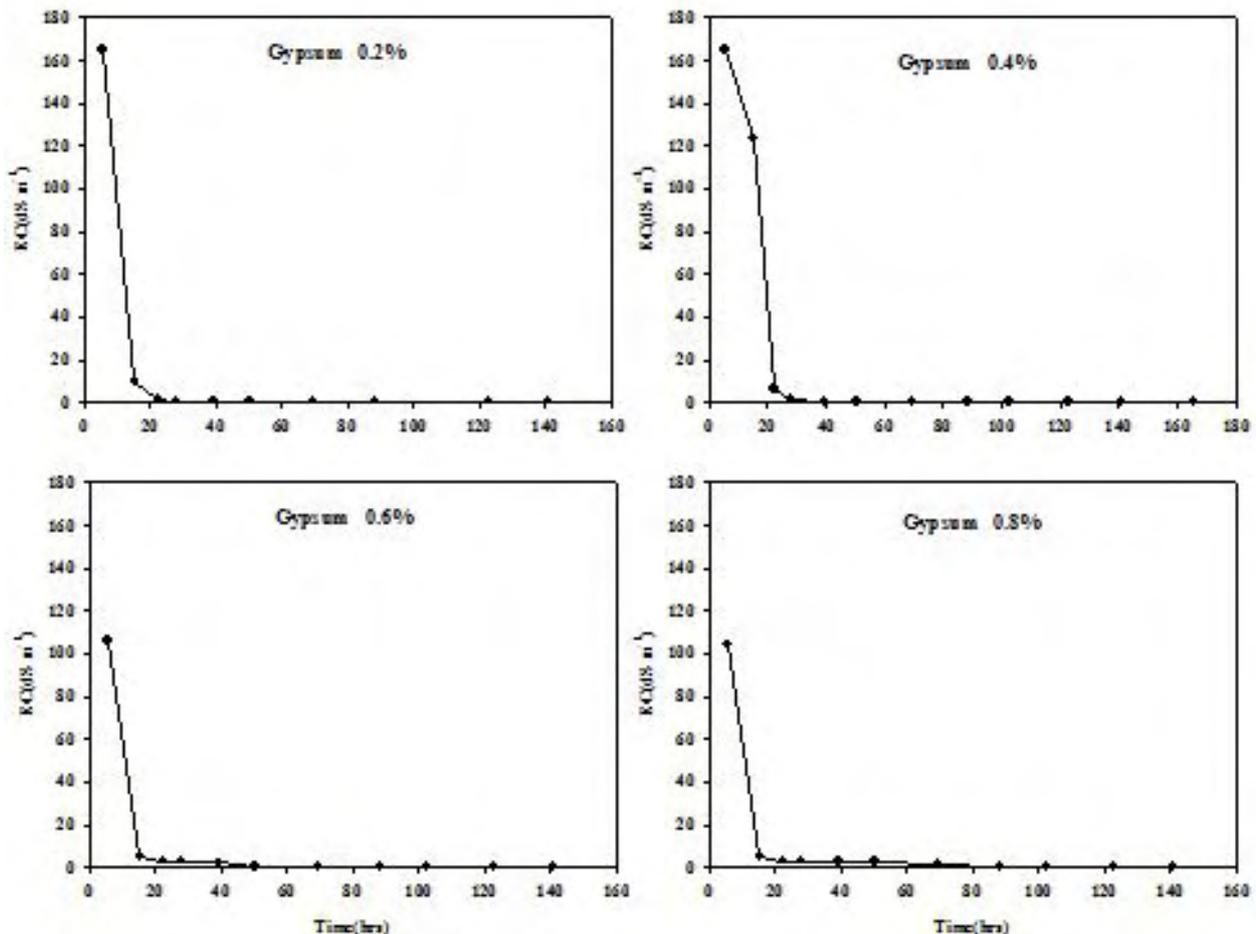


Fig. 45 Changes of EC of effluent collected at the bottom of the soil columns packed with top soil as affected by gypsum application rate.

용출수의 EC는 모든 석고 혼입처리에서 28시간(1.0~2.16 pore volume) 내에 크게 감소하여 석고 혼입비율에 따라 0.73~3.08 dS m<sup>-1</sup>을 나타내었다. 시험토양은 일단 투수가 시작되면 제염은 비교적 단시간 내에 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다. EC는 석고혼입량이 증가할 수록 용출수의 EC값은 낮게 감소하는 경향을 띠었는데 이는 혼입된 석고에서 유래된 Ca<sup>2+</sup> 이온의 용출에 따른 EC의 증가로 판단되었고, 용출이 계속 진행됨에 따라 가용성 Ca<sup>2+</sup>의 대부분 용출된 후에 용출수의 EC는 석고혼입량이 증가할수록 낮았다 (Fig. 45).

(6) 토주토양의 깊이별 EC

용출시험 후 토주 내 토양의 EC를 조사한 결과(Table 45) 모든 토주에서 초기 토양 대비 98.8% 이상 제염되었다. 석고 혼입량이 가장 적은 석고 0.2% 혼입 토주에서는 EC값이 깊이별로 0.26~0.42 dS m<sup>-1</sup>의 범위에 있었고, 토주의 깊이가 깊어질수록 EC는 다소 증가하였는데 이는 토주 토양내 염류가 증류수에 용해되어 하향 이동하여 나타난 것으로 생각된다. 석고가 0.4% 이상 혼입된 토주에서는 토양 EC값이 0.30 dS m<sup>-1</sup> 이하의 수치를 나타내었다 (표 47).

Table 47. EC measured at each depth after leaching

Soil depth (cm)	Amount of Gypsum incorporated (%)			
	0.2	0.4	0.6	0.8
	----- dS m <sup>-1</sup> -----			
0~5	0.26	0.22	0.21	0.21
5~10	0.33	0.23	0.22	0.22
10~15	0.34	0.24	0.23	0.23
15~20	0.34	0.25	0.25	0.25
20~25	0.37	0.25	0.25	0.26
25~30	0.42	0.27	0.26	0.25

용출시험 후 토주내 토양의 양이온분포를 깊이별로 나타내었다(Fig. 45). 토주토양의 깊이별 양이온 함량은 Ca<sup>2+</sup>가 석고혼입량에 따라 0.22~0.30 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>범위로 가장 많은 양을 차지하고 있었고, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> 이온은 0.10 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>이하의 함량을 가지면서 석고 혼입량에 따라 깊이별 분포를 달리하였다.

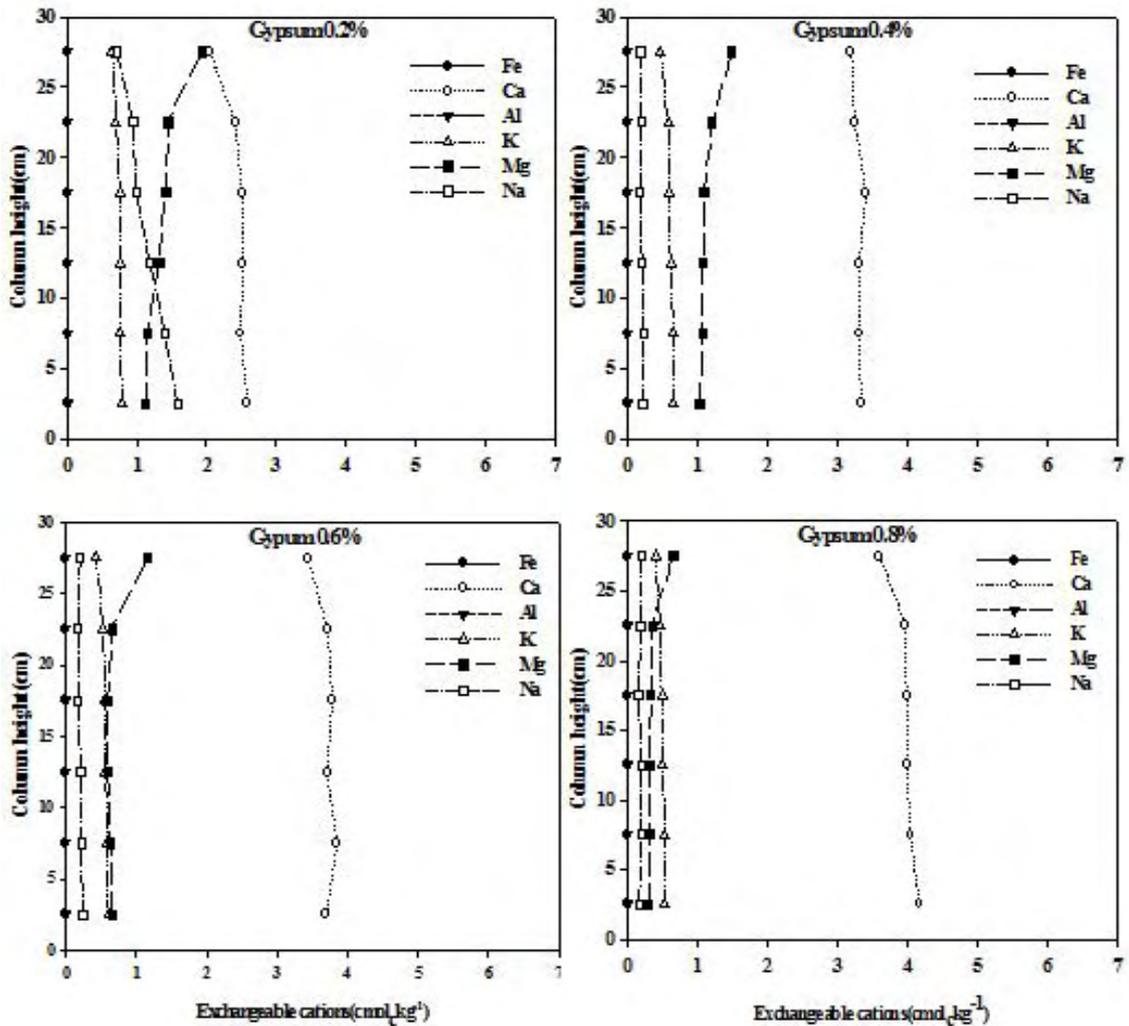


Fig. 46. Cation distribution with soil depth after elution by water.

### (8) 다층토양에서 수분과 이온의 용출 특성

#### (가) 단일층(Single-Layered Soil) 토양의 수리전도도

##### ① 표토와 심토의 수리전도도

단일층 표토토양의 K 값의 변화를 시간 경과에 따라 조사한 결과 표토의 초기 K는  $0.25 \text{ cm hr}^{-1}$  이었으나 시간 경과에 따라 감소하여 24시간(0.5pore volume 용출) 경과 후 최종 K는 0으로 조사되었다. 반면 심토의 경우 초기부터 K 값은 0을 나타내었다. 이와 같이 표토와 심토의 최종적인 K가 0을 나타낸 것은 간척지 토양내 토양 중 함량이 높은 치환성  $\text{Na}^+$  이온에 의한 점토의 해교(deflocculation)와 분산에 의한 영향으로 추정된다.

표토의 용출수의 EC는 초기  $194.5 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 급격히 감소하여 0.45 pore volume에서  $2.8 \text{ dS m}^{-1}$ 으로 낮아졌고, 0.5 pore volume에서  $5.41 \text{ dS m}^{-1}$ 까지 다시 증가하였고 이 후에는 용출액이 배출되지 않았다 (Fig. 47). 따라서 사질의 간척지 토양은 투수가 일단 시작되면 간척지 토양의 제염은 매우 빠르게 일어남을 알 수 있었고, 따라서 간척지 토양의 투수성 개선이 간척지토양

의 제염을 위한 핵심임을 알 수 있었다.

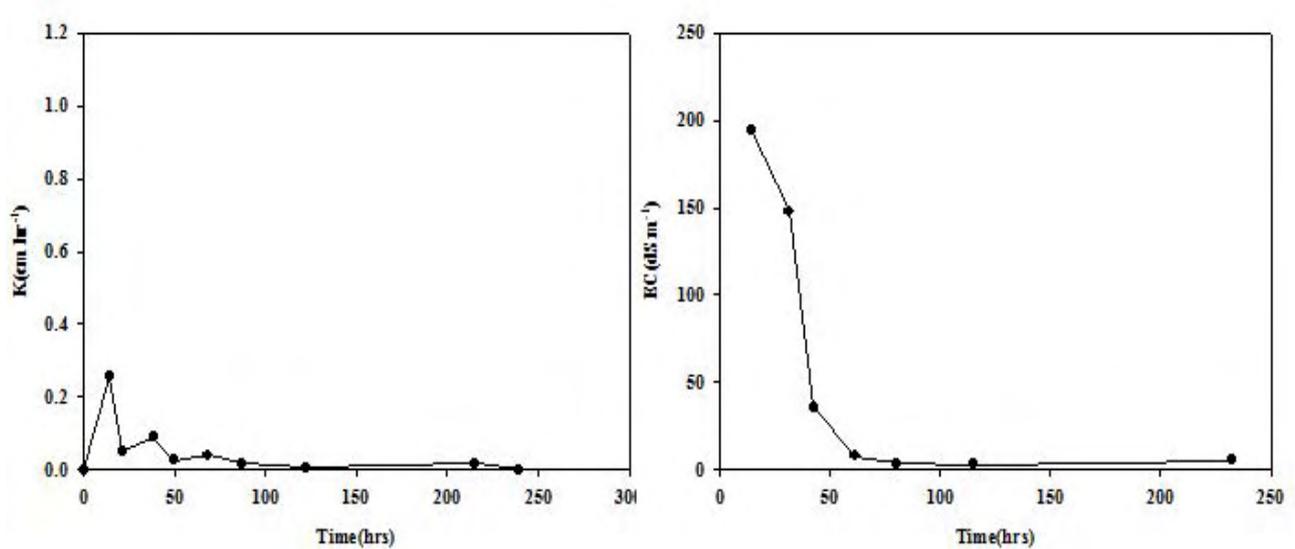


Fig. 47 Changes of saturated hydraulic conductivities(K) and EC in top soil and subsoil.

단일층 토양의 K 측정 후 토양 깊이별 EC를 조사한 결과(Table 48) 표토의 EC는 0.30 ~ 0.83 dS m<sup>-1</sup> 범위로 토주의 표면에서부터 깊어짐에 따라 EC는 대체로 높아지는 경향을 나타내었다. 심토의 EC는 0.58 ~ 39.62 dS m<sup>-1</sup> 범위로 표토와는 달리 투수가 되지 않아 심토의 하층부위에 염류가 집적되어 매우 높은 EC값을 나타내었다.

Table 48. Soil EC through the single-layered soil columns after elution experiment.

Soil	Soil depth	EC (dS m <sup>-1</sup> )	Soil	Soil depth	EC (dS m <sup>-1</sup> )
Surface	0 ~ 5 cm	0.30	Subsoil	0 ~ 5 cm	0.58
	5 ~ 10 cm	0.36		5 ~ 10 cm	1.62
	10 ~ 15 cm	0.46		10 ~ 15 cm	6.83
	15 ~ 20 cm	0.44		15 ~ 20 cm	39.62
	20 ~ 25 cm	0.56			
	25 ~ 30 cm	0.83			

용출 후 표토의 양이온 분포를 조사한 결과(Fig. 48) 토주의 바닥에서 최대 값인 3.7cmolc kg<sup>-1</sup>으로 조사되었으며 표토 5cm 깊이까지는 Mg<sup>2+</sup> 이온이 Na<sup>+</sup> 보다 높았으나 Na 이온은 표토에서부터 깊어질수록 높은 농도를 나타내었는데 이는 토양중 과량의 Na 이온이 침출수에 용해되어 하향 이동하다가 투수가 정지됨에 따라 토주의 하층부에 Na<sup>+</sup> 이온이 상대적으로 높게 분포하는 것으로 생각된다. 심토의 경우 토양깊이별 이온분포는 Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > Ca<sup>2+</sup> ≃ K<sup>+</sup> 순이나 확산에

의해 하층부로 갈수록 높은 농도를 나타내었다.

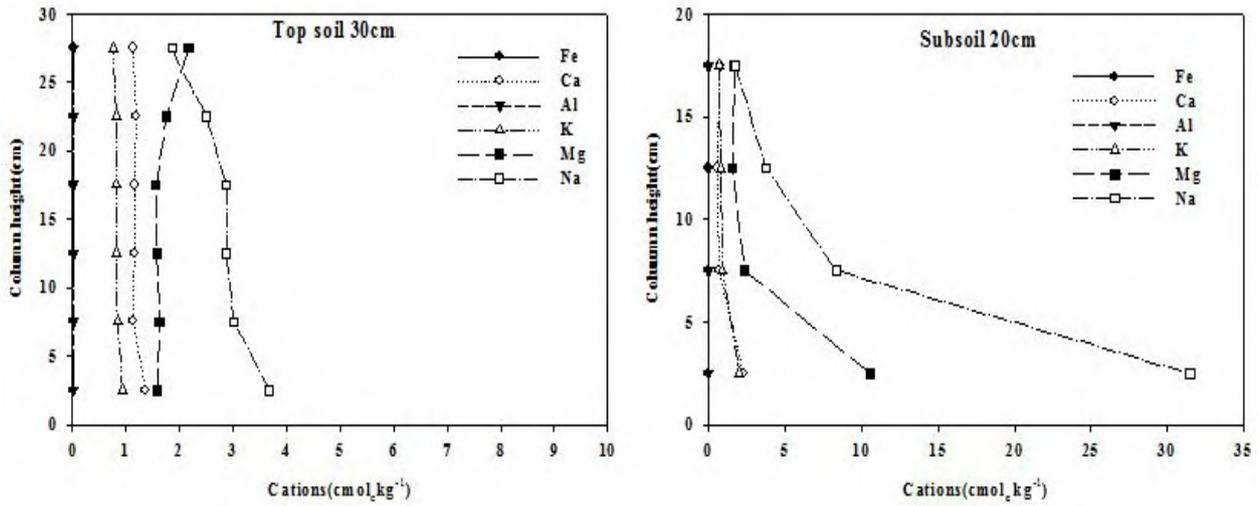


Fig. 48. Distribution of cations through the soil column packed with surface and subsurface soil after elution experiment.

## ② 석탄바닥재의 수리전도도

석탄바닥재층의 K 변화를 조사한 결과(Fig. 49) 석탄바닥재 20cm 토주는 초기 19cm min<sup>-1</sup>에서 점차 감소하여 5분 후에 11.8cm hr<sup>-1</sup>의 안정화된 K값을 나타내었고, 석탄바닥재 30cm 토주는 초기 5.8cm min<sup>-1</sup>에서 점차 감소하여 18분 경과 후 4.1cm min<sup>-1</sup>의 안정화된 K를 나타내었다. 전형적인 바다 모래의 K 값이 0.01cm sec<sup>-1</sup> 정도임을 감안할 때(Brady and Weil, 2002), 석탄바닥재의 K는 20cm 토주는 모래에 비해 20배 정도 투수가 빨랐고, 30cm 토주의 경우는 7배 정도 투수가 빨랐다.

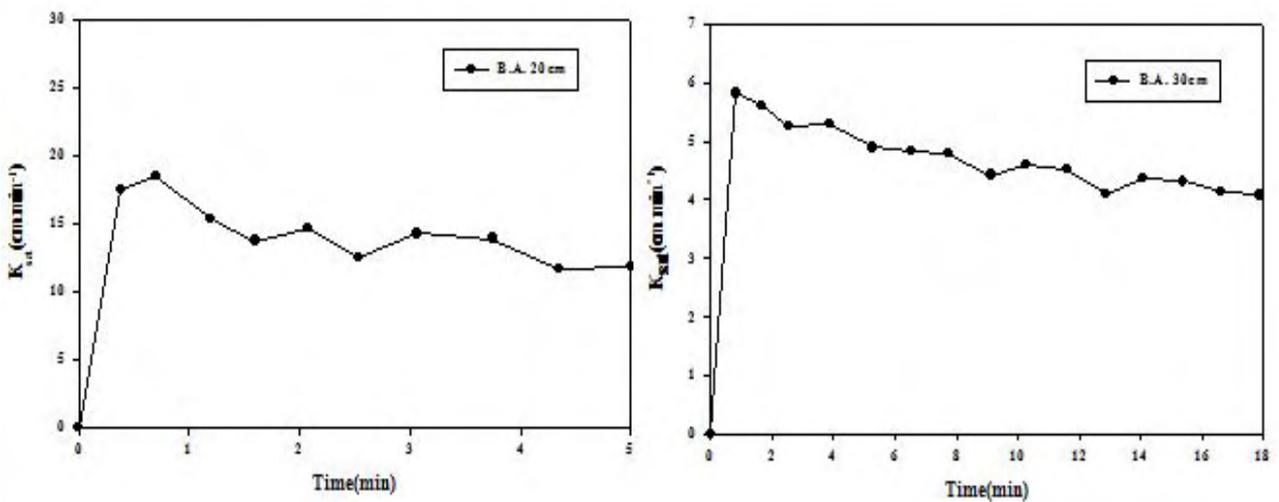


Fig. 49 Saturated hydraulic conductivity of coal bottom ash

(나) 다층(multi-Layered Soil) 토양의 수리전도도

① 석고 처리 다층토주의 수리전도도

표토에 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )를  $\text{Ca}^{2+}$  기준  $5\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 혼입한 다층토양(Multi-layered soil) K는 표토 30cm, 표토30+BA10cm 토주에서  $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$ 의 K값을 나타내었고, 표토30+BA20cm 토주는 석탄바닥재층의 두께가 증가함에 따라 K는 다소 저하되어  $0.64 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$ 의 K값을 나타내었다 (Fig. 50). 토주는  $0.39 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$ 의 K값을 나타내었고, 표토30+BA30+심토20cm토주는  $0.31 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$ 의 K값을 나타내었다. 그러나 표토30+심토20cm토주는 대공극층위(macro-porous layer)를 가진 다층토양에 비해 투수성이 급격히 저하되어  $0.064 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$ 의 K값을 나타내었다,

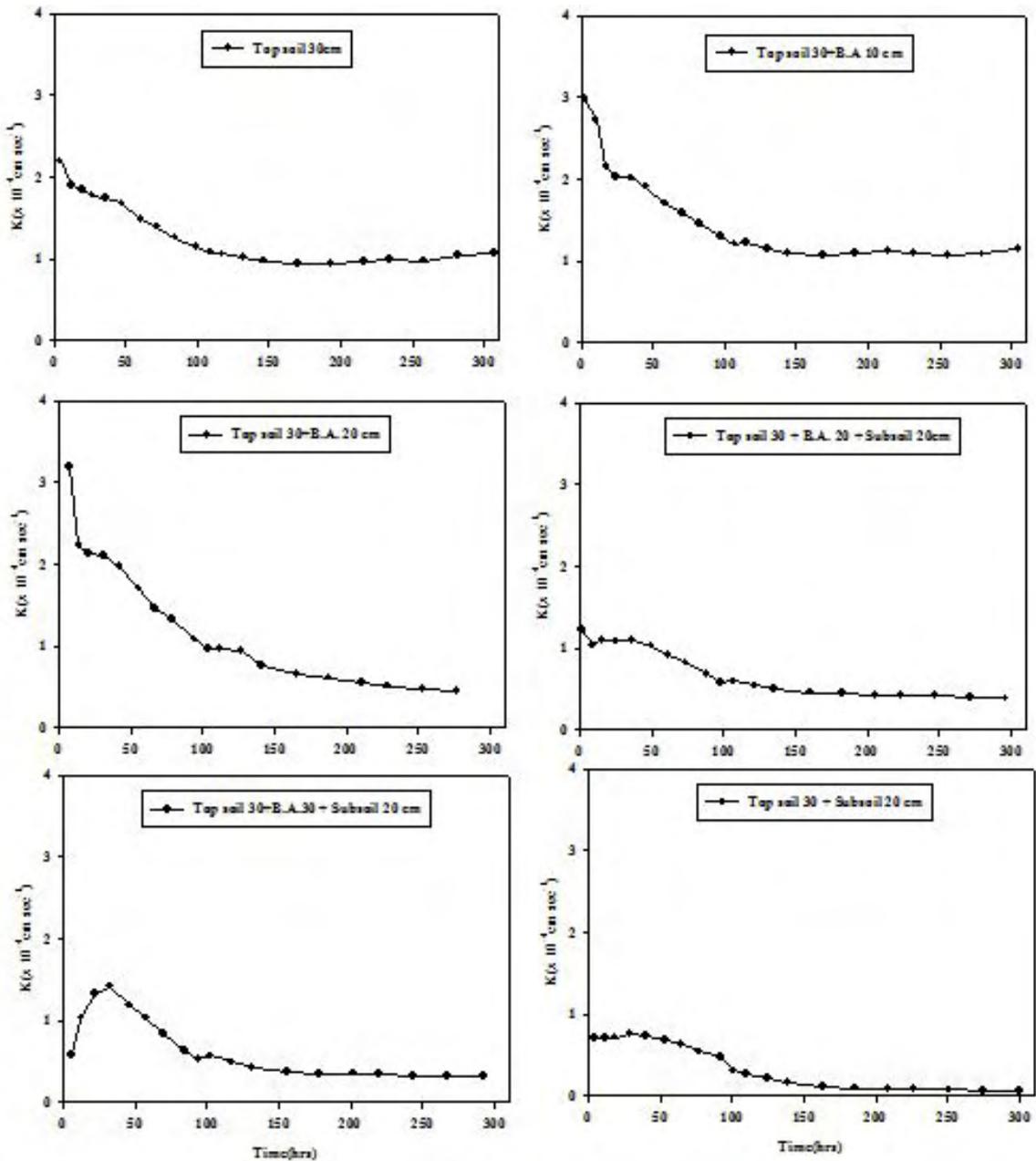


Fig. 50 Saturated hydraulic conductivities of single- and multi-layered soil columns.

### ② 단일층토양의 모세관 상승 특성

단일층토양의 용적밀도별 모세관상승 높이를 시간경과에 따라 조사한 결과 (Fig. 51) 토주의 모세관 상승은 토주 높이 60cm까지는 시간당 0.5cm 이상의 빠른 속도로 모세관상승이 일어났으나, 이 후 지속적으로 모세관 상승속도는 감소하였다. 시험토양의 모세관상승속도는 초기에는 용적밀도 1.30 Mg m<sup>-1</sup>토주가 더 빨랐으나 24시간 이후에는 용적밀도 1.45 Mg m<sup>-1</sup> 토주가 더 빨라져 62시간 경과 후에는 용적밀도 1.45 Mg m<sup>-1</sup>인 토주의 모세관 상승 높이가 62.5cm로 BD 1.30 Mg m<sup>-1</sup> 토주의 모세관상승 높이 62.7에 근접하였고, 이 후에는 용적밀도 1.45 Mg m<sup>-1</sup> 토주의 모세관 상승높이가 더 높았다.

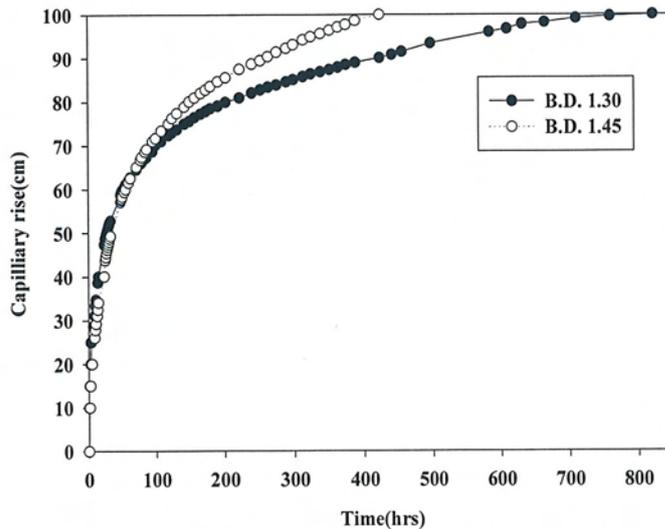


Fig. 51. Capillary rise height depending on bulk density

### ③ 다층토주의 수분 분포

다층토주의 모세관 상승에 의한 수분함량을 조사한 결과(Fig. 52) 석탄바닥재(60cm) 토주는 토주의 하단에서 20cm 높이까지는 높이가 증가함에 따라 수분함량은 감소하여 12.5~27.5%의 수분함량을 나타냈고, 20~50cm까지는 1.2~9.3%의 수분함량을 보였으며, 50cm이후는 1% 미만의 수분함량을 나타냈다. 토양(60cm) 토주는 전체적으로 23.5~29.5%의 수분함량을 나타내었는데, 토주의 하단과 상단 10cm 부위는 수분함량이 상대적으로 낮아 23.5 ~27.2%의 수분함량을 나타내었고, 토주 중간의 30~50cm 부위는 상대적으로 높은 27.4~29.5%의 수분함량을 나타냈다.

표토 30+BA5+심토10cm 토주는 토주의 하단에서 10cm 높이까지는 23.1~27.0%의 수분함량을 나타냈으나, 석탄바닥재층 10~15cm까지는 16.1~18.4%의 낮은 수분함량을 나타내었고, 15cm 이상의 높이에서는 24.9~31.7%의 수분함량을 보였다. 표토 30+BA10+심토10cm 토주는 토주의 하단에서 10cm 높이까지는 25.9~27.3%의 수분함량을 나타냈으나, 석탄바닥재층 10~20cm까지는 9.8~13.1%의 낮

은 수분함량을 나타내었고, 20cm 이상의 높이에서는 18.3~24.6%의 수분함량을 보였다.

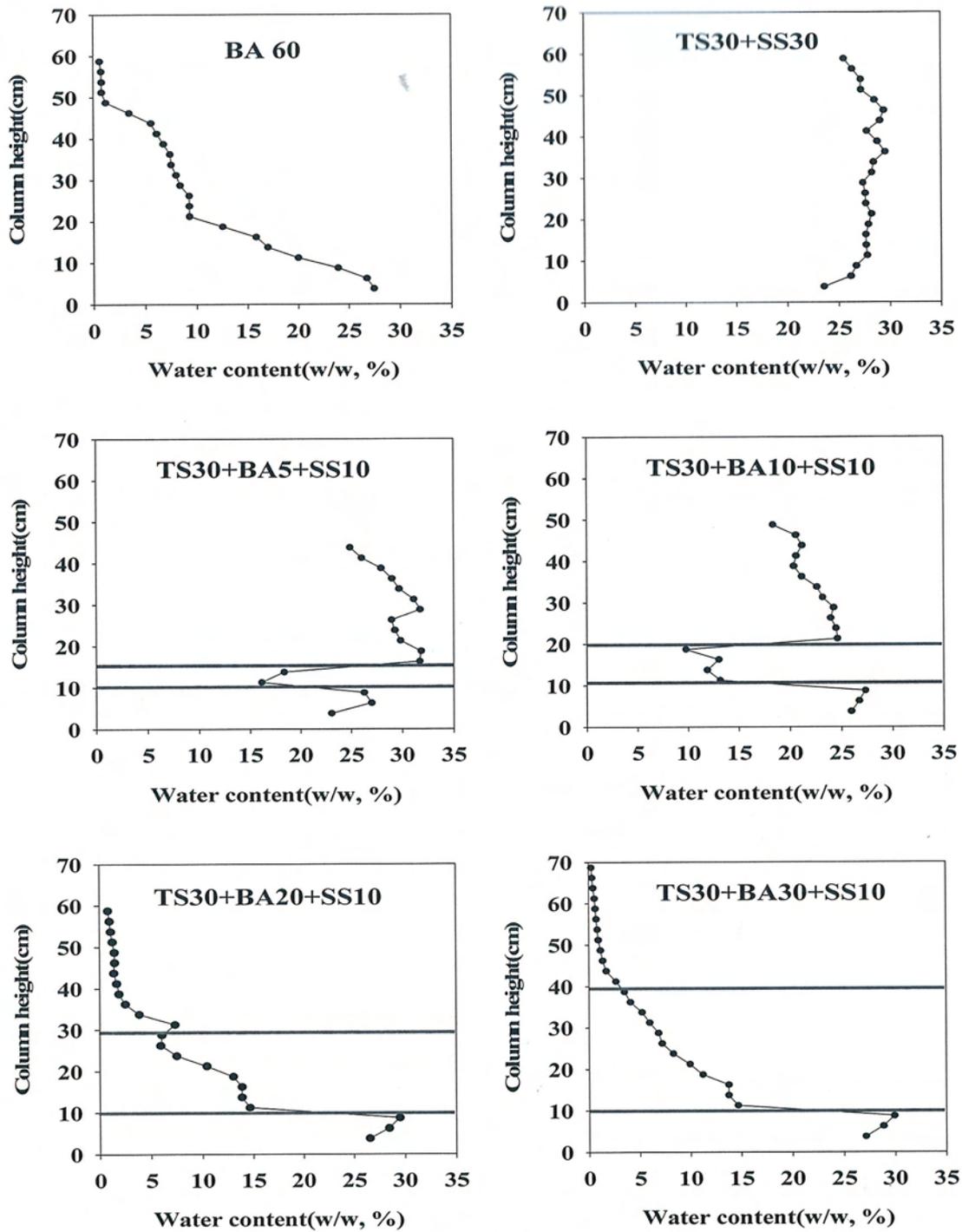


Fig. 52 Capillary rise in a single layered soil column

#### ④ 수분보유력과 수리전도도

토양수분흡착력별 수분보유력을 시료의 용적밀도를  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ 로 조절한 후 Pressure plate chamber를 이용하여 조사한 결과 포장용수량 조건에서 표토 45.8%, 심토 41.1%의 수분을 보유하고 있었고, 영구 위조점의 토양수분흡착력(15bar)에서 표토 5.1%, 심토 4.2%의 수분을 보유하고 있었다.

하였다. 표토의 수분 보유력이 심토보다 다소 높은 것으로 조사되었다.

토양의 용적밀도를 1.3부터 1.5까지 0.5 단위로 증가시켜가면서 포화수리전도도를 측정한 결과 간척지표층토의 포화수리전도도는 용적밀도가 증가함에 따라 초기 약 50시간 정도까지는 증가하다가 이 이후 감소하여 표면 담수 시작 후 약 100시간 이후부터 수분이동이 정지하는 것으로 조사되었다. 이러한 수리전도 특성은 간척지토양의 특징으로 판단되며 이는 간척지 토양의 높은 치환성  $\text{Na}^+$  함량과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 표층이라 하더라도 담수에 의한 제염효과는 크지 않을 것으로 판단되어 이에 대한 해결 방법을 찾아야 하였다.

간척지토양에서 제염을 위하여 사용되는 토양개량제로써는 염화칼슘, 석고 및 탄산칼슘과 같은 석회물질을 사용하며 높은 pH에서도 칼슘의 활동도가 높은 석고가 가장 많이 사용되고 있다. 조사 결과 석고의 혼입비율이 증가할수록 포화수리전도도는 증가하였으나 용출수의 공극수량이 증가함에 따라 급격히 감소하여 약 20시간 정도 지난 후에 거의 유사한 경향을 보였다 (Fig. 53). 한편 유속(Flux)의 경우 석고함량이 1% 일 때 유속이 최대로 유지되었다(Fig. 53). 유속의 순서는 가장 1% > 0.5%  $\approx$  1.5% > 2%로 조사되었다. 이는 토양내  $\text{Ca}^{2+}$  이온이 증가할수록 양이온치환반응에 의한 점토입자의 치환성  $\text{Ca}^{2+}$ 의 함량은 증가되고 이에 따라 점토입자가 안정화되고 분산이 감소하여 포화수리전도도가 증가하며, 둘째는 석고의 혼입비율이 증가할수록 점토의 표면에서  $\text{Ca}^{2+}$ 와의 치환으로 토양용액으로 나온 유리  $\text{Na}^+$  이온의 양이 증가할수록 침출수의 전해질 농도는 증가하여 포화수리전도도는 증가되는 것으로 추정하였다.

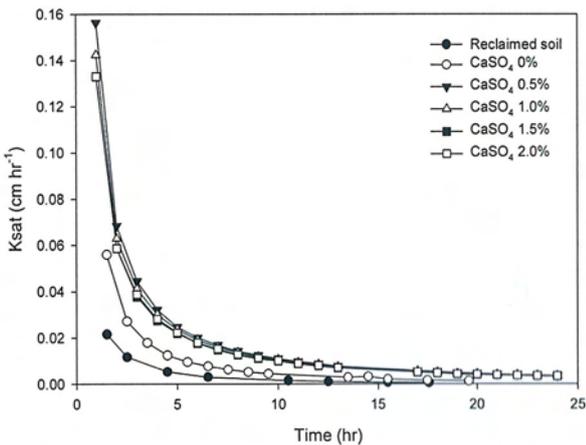


Fig. 53 Saturated hydraulic conductivities of soil columns packed with surface layer of the reclaimed tidal soils amended with gypsum from 0 to 2.0% with 0.5% increment

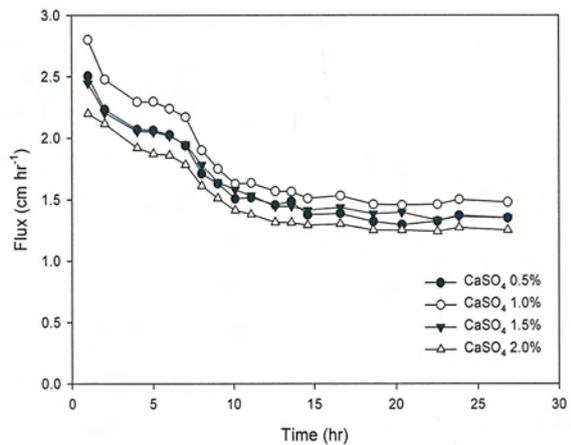


Fig. 54 Fluxes of soil columns packed with surface layer of the reclaimed tidal soils amended with gypsum from 0 to 2.0% with 0.5% increment

석고의 혼입비율과 포화수리전도도 사이의 상관관계식을 구하면  $Y = 0.695X - 0.044$  ( $r =$

0.9585)의 관계식이 성립하여, 석고 혼입 비율의 증가에 의해 간척지토양의 포화수리전도도는 정의 상관관계를 보였다(그림 55).

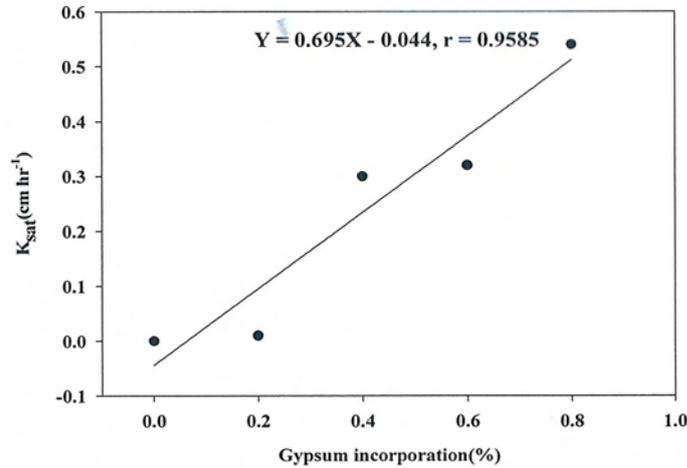


Fig. 55. Correlation between rate of gypsum incorporation and saturated hydraulic conductivity.

⑤ 수분이동에 따른 토층의 이화학성과 용출 특성

토양용액중의 EC는 용액 중 존재하는 염류이온의 농도에 비례하기 때문에 EC는 토양용액중의 염분농도의 지표가 된다. 한편 직경 2 mm 이하의 CBA 10%와 석고가 혼입된 표토토양으로 충전된 토주 용출수의 pH와 EC 변화를 살펴보면 pH는 다소 증가하나(Fig. 56) EC는 급격히 감소하는(Fig. 57) 경향을 보여주었다. 이는 석고 단독으로 처리할 때보다 제염속도가 증가하는 것으로 조사되었다. 특히 CBA만 10% 정도 혼합된 동일 수준의 제염 농도에 도달하는 시간이 증가되는 것으로 조사되었다. 따라서 제염효과와 효율성을 기준 시 CBA와 석고를 동시에 처리하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

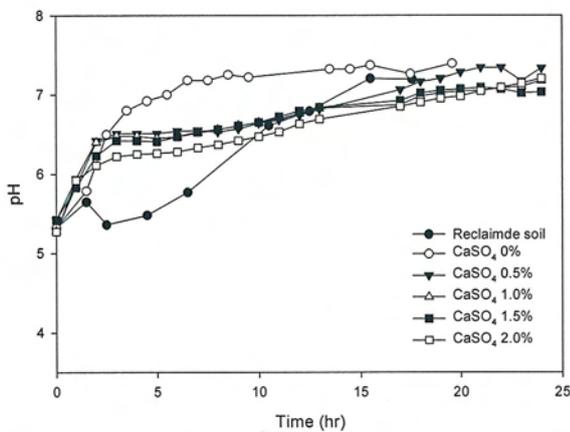


Fig. 56 Changes of pH in effluent collected from the bottom of the soil column packed with surface soils of the reclaimed tidal soils amended with different amount of gypsum.

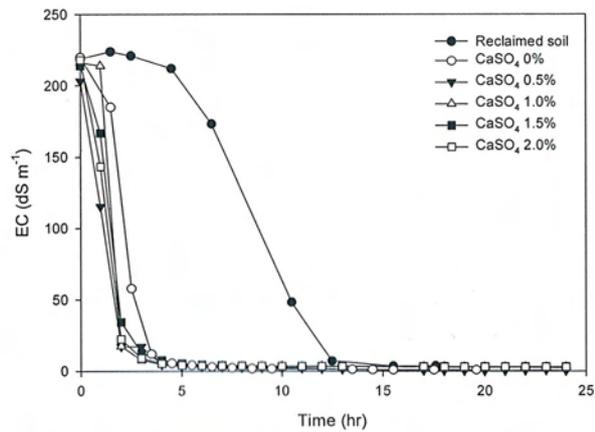


Fig. 57 Changes of EC in effluent collected from the bottom of the soil column packed with surface soils of the reclaimed tidal soils amended with different amount of gypsum.

### ⑥ 모세관 상승에 따른 토주내 수용성양이온 분포

다층토주의 모세관 상승 70일 후 토주를 2.5cm 단위로 분석하여 토양의 수용성 양이온 함량을 조사한 결과는 토주내 수용성양이온은  $\text{Na} > \text{Mg} > \text{K} \approx \text{Ca}$  순으로 조사되었다. CBA 토주(60cm)의 수용성  $\text{Na}^+$ 는 2.1 ~ 12.6  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 범위에 있었고, Na 함량은 대체로 토주의 높이 증가에 따라 대체로 감소하였으며 40~60cm에서는 1.0~ 3.1 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 낮은 함량을 보였다.

토양토주(60cm)의 수용성  $\text{Na}^+$ 는 대체로 6.2 ~ 34.8 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 높은 함량을 나타냈고, 토주의 높이증가에 따라 감소하는 경향을 보였으나 토주의 55~60cm 부위에서는 다시 증가하여 Na 이온이 토양 표면 부위에 축적되는 경향을 나타냈다. 표토 30+BA5+심토10cm 토주의 수용성  $\text{Na}^+$ 는 토주의 하단에서 10cm 높이까지는 27.5 ~ 39.5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 높은 함량을 나타냈고, CBA 층위(10~15)는 15.8~16.2  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타내었으며 15~45cm의 표층토 부위는 6.2~18.5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 보였다. 토주의 높이 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으나 토주의 55~60cm 부위에서는 다시 증가하여  $\text{Na}^+$ 이온이 토양 표면 부위에 집적되어 13.9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타냈다. 표토 30+BA 10+심토 10cm 토주의 수용성  $\text{Na}^+$ 는 토주의 하단에서 10cm 높이까지는 34.0 ~ 50.3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 높은 함량을 나타냈고, CBA 층위(10~20)는 14.2~18.2  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타내었으며 20~ 50cm부위는 3.4~24.6 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 보였다.

토주의 높이 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으나 토주의 55~60cm 부위에서는 다시 증가하여 Na 이온이 토양 표면 부위에 집적되어 9.3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타냈다. 표토 30+BA 20+심토 10cm 토주의 수용성  $\text{Na}^+$ 는 토주의 하단에서 10cm 토주 높이까지는 15.1~29.3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 함량을 나타냈고, CBA 층위(토주 높이 10~20cm)는 3.5~7.9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타 낸 반면, CBA 층위(토주 높이 20~30cm)는 2.5~40.6  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타내었는데, 특히 CBA층(토주 높이 25~27.5cm)에 다량의  $\text{Na}^+$  함량을 나타내어 다량의  $\text{Na}^+$ 이온이 집적되어 있음을 알 수 있었다. 이는 토양수분의 모세관상승력이 약화됨에 따라 더 이상의 수분상승이 이루어 지지 않아 이 부위에 염류가 고농도로 집적된 것으로 생각된다. 토주 30 ~40cm부위는 0.2~2.7 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 보였고 토주의 높이 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 토주의 40~60cm 부위는 0.4~0.63 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 낮은  $\text{Na}^+$  함량을 나타냈다. 표토 30+BA30+심토10cm 토주의 수용성  $\text{Na}^+$ 는 토주의 하단에서 10cm 높이까지는 8.1~31.0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 함량을 나타냈고, CBA 층위(10 ~40cm)는 2.4~5.8 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 을 나타내었다. 토주 40~70cm부위는 0.2~ 0.5  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 낮은  $\text{Na}^+$  함량을 나타냈다

### ⑦ 바닥제 입경별 모세관상승 높이 검정

토양의 용적밀도를 최대다짐밀도의 95% 이상으로 조절한 토양의 입경별 모세관 수분 상승을 조사한 결과 모세관 수분상승은 평균 공극의 반경이 증가할수록 상승 높이는 감소하는 경향을 보여주었으며(그림 57) 한편 실측치와 계산치를 비교하여 보면 실측치가 계산치보다 약간 높은 경향을 보여주고 있다. 그리고 바닥제 그대로의 모세관 수분상승 높이는 약 6.5cm 정도이

며 각각의 인접한 입경이 다른 입자를 50:50으로 혼합하여 조사한 상승 높이는 단일 입경의 상승 높이보다 약 5% 정도 높이가 상승하는 것으로 조사되었다(그림 58, 59).

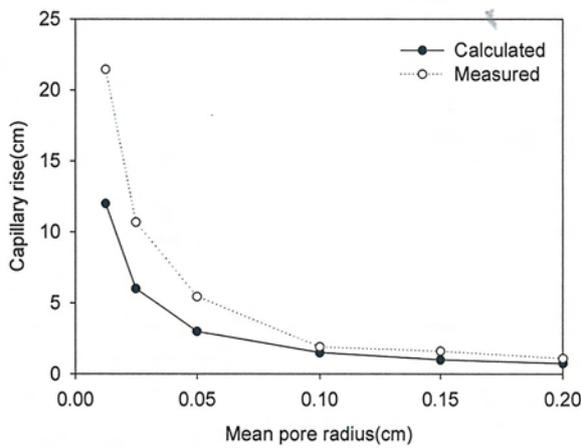


그림 58. 평균 공극크기별 모세관 상승 높이

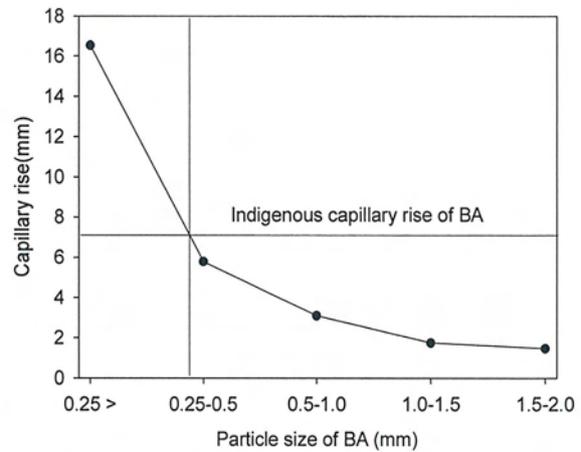


그림 59. 바닥제 입경 혼합별 모세관 상승 높이

간척지 표층토양에 바닥제를 혼합한 토양의 수리전도도는 바닥제의 혼합비율이 증가함에 따라 50% 바닥제가 혼합된 토양에서 10cm/min으로 증가하는 경향을 보여주었다(그림 60).

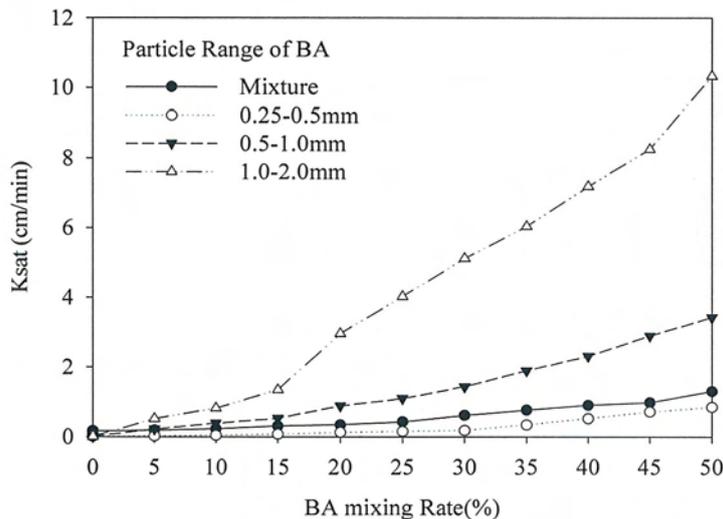


그림 60. 영산강 간척지 표층토와 바닥제 혼합비율별 포화수리전도도 변화

### (9) 현장 시험 결과 및 시공계획

작물이 자라는 근권층 아래에 모세관상승 방지 차단층을 전면에 설치하는 방안이 있는 이는 전면 차단층 처리를 위한 작업의 용이성과 경제성 문제로 인하여 차선의 방안으로 판단된다. 특히 차단층 소재로 적용하기 위한 입경이 3.5 mm 정도의 광물소재를 확보하여야 하는데 본 연구에서 적용한 석탄바닥제의 경우 안정성 문제뿐만 아니라 현재 간척지토양의 토양구조상 트

랙터와 같은 대형기계작업을 실시하는데 다소 문제점이 따를 것으로 판단하고 있다. 따라서 간척지 제염 및 재염화 방지를 위한 토양구조 개선 시 우선적으로 고려할 사항은 다음과 같다.

#### 해결 우선순위

- 1) 작물재배를 위한 토양구조 유지 기술 개발
- 2) 배수 환경 개선
- 3) 제염과 재 염화 방지
- 4) 토양미생물상 개선
- 5) 시비 기술 개발
- 6) 토양 pH 조절 기술 개발
- 7) 작목 선정과 작부 체계 선정

#### 해결방안

- 1) 작물재배를 위한 토양구조 유지 기술 개발

토양 입단화 축진을 위한 적정 완속 유기물 또는 PAM과 같은 입단화제 처리가 필요하다. 그러나 하절기 강우 등에 의해 유기물 시용에 의한 입단화 효과에 대한 의문 시 되며 한편 PAM과 같은 입단화제는 간척지와 같은 대규모 토양의 입단화를 축진하는데 비용이 많이 소요되어 비용면에서 문제가 있다. 따라서 손쉽게 구할 수 있는 축분이 적합하다.

그리고 영산강 간척지에서 문제점 중 하나가 현재 지역에서 사용하고 있는 퇴비는 사용상 편의를 위하여 대부분 조립질입상퇴비를 사용하고 있다. 이 경우 상대적으로 분상형태의 일반 퇴비보다는 토양입단화에 미치는 영향이 작을 것으로 추측된다, 따라서 지역 농협이나 지역에 위치한 퇴비생산업체에서 간척지 토양물리성 개선을 위한 분상상태의 완속퇴비를 생산하여 간척지에 처리를 하여야 할 것으로 판단된다.

Wortmann과 Shapiro(2007)가 발표한 자료에 따르면 생분보다는 부속된 퇴비가 입단화에 미치는 영향이 큰 것으로 조사되었다(표 49, 50). 따라서 간척지 토양의 입단화를 축진하기 위해서는 부속된 퇴비를 사용하여야 한다.

Table 49. Mean effects of manure application treatments on soil aggregation in trials conducted on two sites at UN-L Havelock Agronomy Laboratory in 2005

Treatment	Aggregate size (mm)			
	> 2	0.25-2	0.053-0.25	< 0.053m
Manure	2.4	37.3	34.9	25.4
Compost	3.2	34.5	36.8	25.4
Control	0.8	33.2	39.8	26.2

Table 50. Mean effects of manure treatments for two soil types at 30 days after manure and compost application on Bray-P1 in the 0-to 2.5-cm soil depth at UN-L Havelock Agronomy Laboratory in 2005

Treatment	Aggregate size (mm)			
	> 2	0.25-2	0.053-0.25	< 0.053m
Manure	326.9	110.5	82.4	28.3
Compost	753.9	182.8	107.5	81.4
Control	32.4	49.9	51.7	5.3

2) 지표층 농도 매우 높을 뿐만 아니라 투수속도가 극히 낮아 관수 등에 의한 제염 효과를 기대하기 어려움이 발생한다. 특히 토양의 염류농도는 대부분 지역에서  $8 \text{ dS m}^{-1}$  이상으로 조사되며 특정 기간 동안에는 최대  $40 \text{ dS m}^{-1}$  이상에 달하기도 한다.

- 기존의 담수 등에 의한 제염이 불가하므로 가을 철 작물을 수확한 다음 토양관리가 필요하다. 토양관리 방안은 퇴비 등을 처리하여 공극개선과 같은 토양물리성을 개선하거나 경작지내에 소류지를 만들어 농업용수를 확보한 다음 황산석고( $\text{CaSO}_4$ )를 질량비로 1% 정도 포토 처리 후 경운을 30cm 깊이까지 실시한 다음 전 층 담수를 실시하여 제염을 2회 정도 실시하는 방안이 있다.
- 10월 하순- 동결이 발생하기 전까지 퇴비를 처리한 후 심경 등 토양관리 실시
- 토양관리를 실시한 다음 입단화 가능 녹비 작물 재배 후 다음 다음해 5월 초 녹비작물 토양환원 실시

3) 지하수위가 높아 모세관 상승에 의한 재염화 과정 가속화

- 지표면으로부터 30cm 이하에 모세관상승 차단 대공극 토층 구조 설치 - 지하수위 상승에 따른 재염화(Resalination) 현상을 방지하기 위해 입자직경이 2-4mm 정도인 쇄석(산업부산물인 석탄바닥재 활용 권장) 등을 이용하여 약 30 cm 정도의 인위 대공극층 설치한다.

상기 작물이 자라는 근권층 아래에 모세관상승 방지 차단층을 전면에 설치하는 방안이 있는 이는 전면 차단층 처리를 위한 작업의 용이성과 경제성 문제로 인하여 차선의 방안으로 판단된다. 특히 차단층 소재로 적용하기 위한 입경이 3.5 mm 정도의 광물소재를 확보하여야 하는데 본 연구에서 적용한 석탄바닥제의 경우 안정성 문제 뿐만 아니라 현재 간척지토양의 토양 구조상 트랙터와 같은 대형기계작업을 실시하는데 다소 문제점이 따를 것으로 판단하고 있다. 하나 분명히 구명하여야 할 것은 본 연구에서 적용한 세척-선별 석탄재에는 인체에 유해한 중금속이 극미량으로 존재하기 때문에 사용하는데 문제가 없는 것으로 조사되었으나 사회적 관념상 간척지와 같은 농경지에 적용하기 위해서는 법적으로 토양개량소재로 인증을 받아야 하는 문제점이 있다.

모세관상승 차단을 위하여 필요로 하는 소재가 많이 소요될 뿐만 아니라 처리층 설치에 문제점이 발생할 수도 있다 따라서 이에 대한 방안으로 불투수층으로 작용하는 심층토를 교란하지 않고 불투수층으로 작용하는 심토층을 유지하고 표층토에 투수성 개선용 소재(매립석탄회)를 혼합하여 처리한다. 골 처리 규격 길이는 약 100m 정도이며 골규격은 상기 시험 결과를 근거로 하여 처리 깊이를 조절한다.

표 51 현장 시공 계획도

시공계획	처리 내용	규격	비고
계획 I. 모세관 상승 차단	간척지 표층토 약 30cm 정도 제거 후 매립석탄회를 중간 복토 형태로 처리 후 제거 하였던 표층토로 재복토.	매립석탄회 층의 두께는 석탄 회의 특성별 모세관상승높이와 수리전도도 값을 조사하여 결정하였다. 최소 두께는 30 cm	모세관상승 높이(h) = $\frac{0.15(cm)}{\text{석탄회 평균입자반경}(cm)}$
계획 II 모세관 상승 차단/골배수	A와 동일한 모세관차단층 처리 및 골에 매립석탄제 처리	골의 폭은 약 80cm 정도. 단 깊이는 해수 최대와 최저 상승 높이를 기준하여 설정. 단 깊이는 최저 높이를 기준하여 최저 하부 해수면을 기준하여 최소 15cm 이하 깊이 선정.	2011년도 덕호리 간척지에 설치한 골의 폭과 깊이는 80*80cm이며 길이는 80m
계획 III 골배수	계획 II에서 모세관상승 차단층 내용 삭제. 골배수 구조	계획 II의 골설계 내용과 동일	
계획 IV 표층 혼합	계획 I, II, III 처리 완료 후 표층토에 석탄회를 처리 및 혼합	소요량은 표층 30cm 깊이 기준 혼합비율별 수리전도계수를 측정한 후 제염효과와 양수분 보유력을 결정하여 처리.	퇴비와 같은 유기물 처리 유기물함량을 고려한 매립석탄회 혼합 비율 조정

신간척지에서 토양층 61과 같이 평탄지에서 지하수위가 불투수층보다 상부에 위치할 경우 강우 또는 관개 등의 물관리는 불투수층 상부에 염류집적 현상을 야기시킨다.

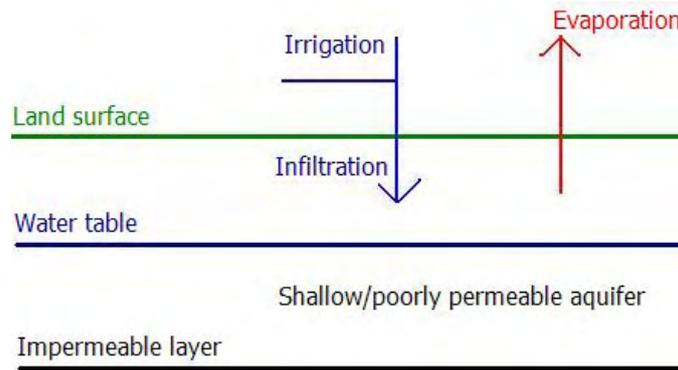


그림 61. 관개수에 의해 유도되는 염류집적 현상 모식도

한편 지하수위가 불투수층 위에 존재할지라도 지하수가 파상형태(undulated) 일 경우 그림 49와 같이 지하수위가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 지하수가 유동됨에 따라 토양내 염은 용출수의 이동과 함께 자연스럽게 빠져나가 제염이 가능하다. 그러나 지하수위가 낮은 쪽에 집적되는 염은 모세관상승에 의해 증발정도에 따라 상부로 이동하여 상층부에 염을 집적시키는 현상도 발생할 수 있다. 그러므로 염류가 집적된 토양에서 모세관상승에 의한 염류상승을 방지하기 위한 재염 방안 수립이 필요하다 (그림 62).

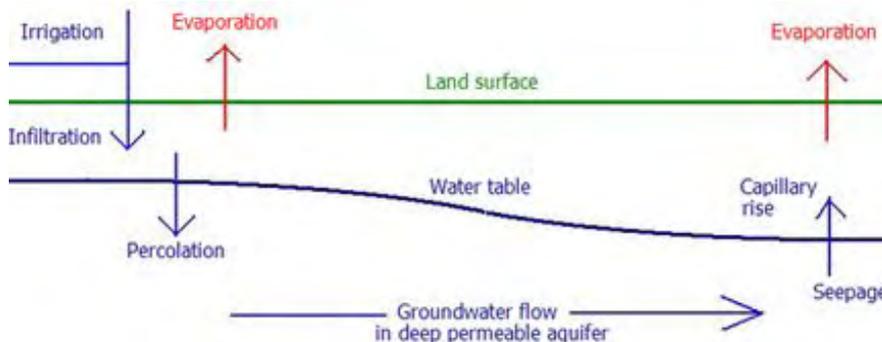


그림 62. 제염화 토양과 지하수위 모식도

따라서 제염이 어렵거나 지하수 상승 등에 의한 문제가 발생하는 기존 간척지에 대한 해결 방안은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ◆ 지하수위를 적정 깊이 이하로 낮추고, 배수에 의한 제염 시 투수속도 향상시키고 지하수 상승을 차단하는 심토 토양관리 기술 개발 필요하며 작부층인 표층의 경우 작물 생육 가능한 적정 유효토심 50 cm 정도를 확보하는 토양개선 기술 개발이 필요하다.
- ◆ 이에 대한 개선방법으로는 심층토의 경우 지하수위와 작부층인 표토 사이에 지하수의 모세관상승을 방지하기 위한 차단층 설치 및 표토의 경우 토양개량제를 처리하여 작부층 유효토심을 확보하여야 한다.

표 52. 신속제염과 지하수 모세관상승 차단 토양구조 기준

구분	처리방안
표층 제염	기존 간척지 표층 토양 + 토양공극 구조 개선 입경 소재 <ul style="list-style-type: none"> <li>처리 비율은 입경크기에 따라 혼합비율 검정 선정 및 구조 개선제 처리</li> </ul>
차단 배수층	상존 지하수위 검정 후 상존 지하수위에 모세관상승 차단층 설치 <ul style="list-style-type: none"> <li>차단층 두께는 구조개선 소재의 입경별 모세관상승 높이 조사</li> <li>표층 제염 처리 시 용출수와 함께 하부로 이동하는 용출수내 입자 이동량과 수리전도도 변화 검정 필요</li> </ul>

토양개량제 처리와 골구조 개선에 의한 배수 효율 증대-제염화 모식도

제염 및 모세관 상승에 의한 재염화 현상을 방지하기 위한 토양구조는 그림 63과 같다. 그리고 이에 대한 토양구조 개선 시 고려해야할 사항은 다음과 같다.

- ① 표층토 수리전도도 검정과 지하 변동 수위 검정
- ② 표층토와 신속제염에 적용할 입경소재 크기 선정 (공극 형성 비율 검정)
- ③ 표층토와 입경소재 혼합 비율별 유속(Flux)과 수리전도도 검정 후 일반 발토양 기준 수리전도도 선정 후 입경크기와 혼합비율 결정
- ④ 차단층 적용 입경 소재 모세관 상승 높이 조사
  - (ㄱ) 모세관 상승시험은 일반 아크릴 토주를 활용하여 조사
  - (ㄴ) 처리 입경 조사 및 토주 충전 시 용적밀도 검정
  - (ㄷ) 상기 결과를 토대로 지하수 상승 차단 구조층 두께와 입경 결정
- ⑤ 현장 시공 조건 결정 후 현장 처리 작업 실시

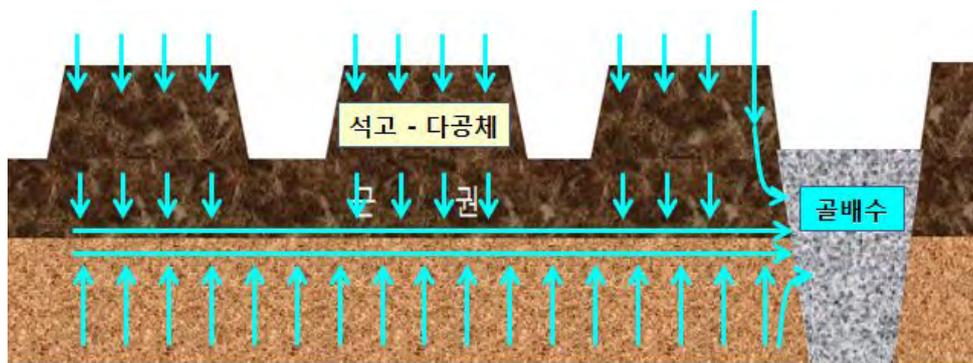


그림 63 표층 토양개량제 처리와 골구조 개선에 의한 배수 효율 증대 제염화

간척지토양과 같이 토성과 용적밀도가 다른 두 개 이상의 토양으로 구성된 토양에서의 배수체계를 나타낸 것이다. 토양물리성이 다른 두층은 서로 다른 수분침투성에 의해서 토양내에서 수분이동방향이 변한다. 즉 높은 수분포텐셜에서 낮은 수분포텐셜로 수분이 이동하게 된다.

그러므로 지하수의 모세관상승을 차단하기 위해서는 개선하고자 하는 토양의 수분장력과 포텐셜을 비교하여 수분의 상승이동을 조절할 수 있을 것으로 판단한다 (그림 64).

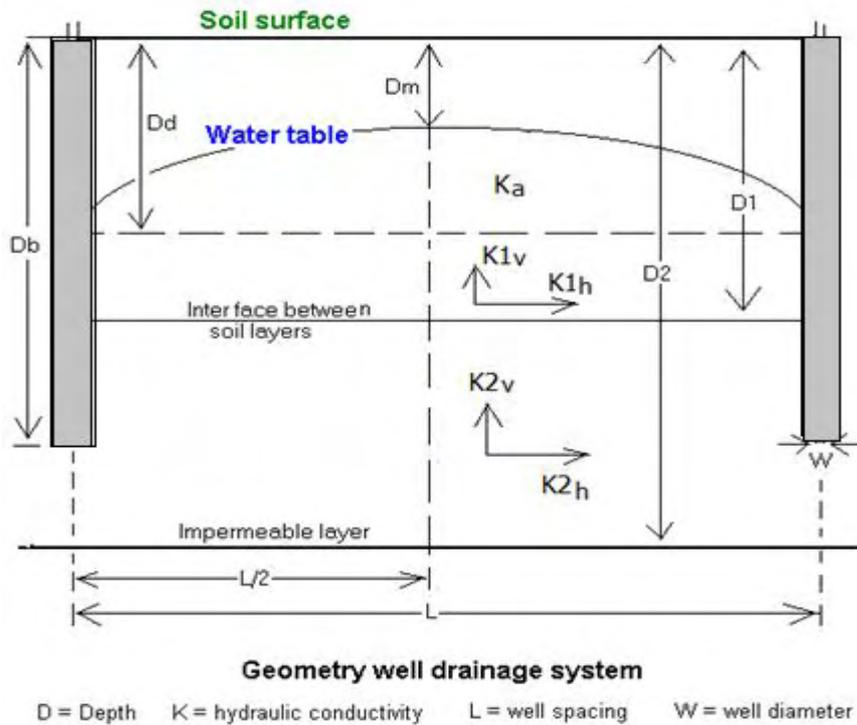


그림 64. 투수성이 다른 다층구조토양에서 배수체계



그림 65. 영산강 간척지 현장 토양구조 개선 작업 현장 작업도

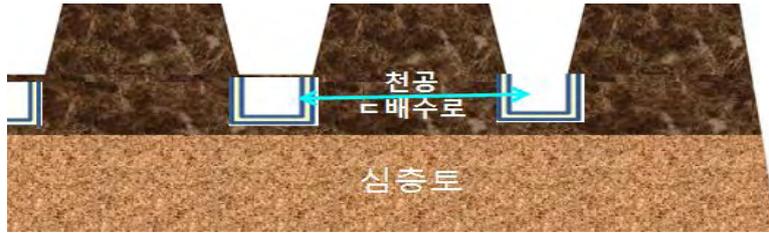


그림 66 이랑과 이랑 사이 천공 배수로 천공배수 제염 모식도



그림 67. 이랑과 이랑 사이 천공 배수로 천공배수 설치 현장 사진

● 지중암거배수

명거배수는 외부로부터 물이 침투하는 농경지 내의 물을 빨리 배출하기 위하여 농경지 주위에 집수거 설치하며 집수거는 지표수의 배제도 겸하기 위해 명거로 한다. 명거의 깊이와 윗폭은 1m 이상으로 하며 밑폭은 약간 좁게 하는 것이 관리하기에 편리하다. 암거배수는 농경지의 지하수위 저하와 지표면에 있는 정체수의 배수의 목적으로 실시한다. 배수로 수위와 농경지 수면과의 낙차가 1m 이상이면 자연배수로 미만이면 암거배수 시설을 한다 (그림 68).

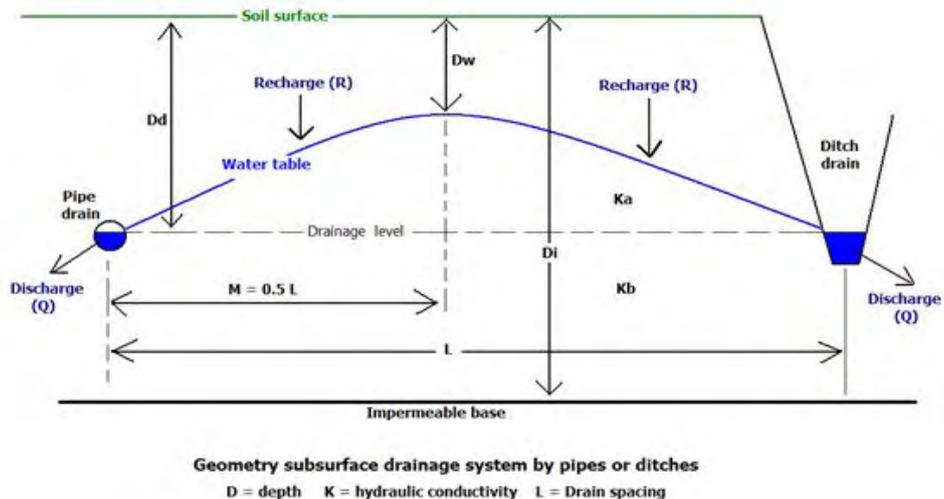


그림 68. 암거와 명거배수 모식도

상기 배수체계의 배수량은 다음과 같은 공식을 이용하여 환산할 수 있다.

$$Q \cdot L^2 = 8 K_b \cdot d (D_i - D_d)(D_d - D_w) + 4 K_a (D_d - D_w)^2$$

여기서 :

Q = steady state drainage discharge rate (m/day)

K<sub>a</sub> = hydraulic conductivity of the soil above drain level (m/day)

K<sub>b</sub> = hydraulic conductivity of the soil below drain level (m/day)

D<sub>i</sub> = depth of the impermeable layer below drain level (m)

D<sub>d</sub> = depth of the drains (m)

D<sub>w</sub> = steady state depth of the watertable midway between the drains (m)

L = spacing between the drains (m)

d = equivalent depth, a function of L, (D<sub>i</sub>-D<sub>d</sub>), and r

r = drain radius (m)

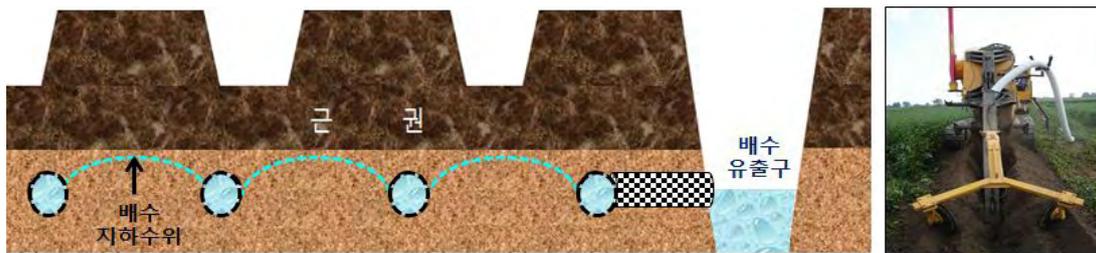


그림 69. 지중압거배수와 표면배수에 의한 제염관리 방안



그림 70. 지중압거배수 설치 현장 사진



그림 71. 토양배수구조 설치 후 작물 재배 현장 사진

개선구조 모형별 석탄매립제 소요량은 표 53과 같다.

표 53. 개선구조 모형별 석탄매립제 소요량

처리 구분	폭 (m)	깊이 (m)	길이 (m)	혼합비율 (%)	수량 (처리수)	소요량 (m <sup>3</sup> )
골	0.4	0.8	60	1	2	38.4
골	0.6	0.8	60	1	2	57.6
골	0.8	0.8	60	1	2	76.8
표토혼합	4	0.3	60	1	2	144
표토혼합	4	0.3	60	0.75	2	108
표토혼합	4	0.3	60	0.5	2	72
표토혼합	4	0.3	60	0.25	2	36
계						532.8

## □ 결과 요약

- 본 연구는 염류 문제뿐만 아니라 물리성 또한 문제가 되는 간척지 토양이나 배수 등의 문제를 가지고 있는 토양을 개선하기 위한 토양 구조층을 개발하기 위하여 토주를 이용하여 단일층(표층)과 다층 연속구조(표층-CBA 층) 상에서 표층을 무처리, 집섬(Gypsum), CBA를 처리하여 수분과 미세입자 이동을 조사하였고 빠른 제염을 위한 토층 구조 조건을 구명하였다.
- 석탄바닥제의 안정성과 관련하여 발전소 매립장에 적재된 바닥재내에 포함된 중금속함량은 토양환경보존법상에 규정된 우려 기준 함량보다 낮았으며 증류수로 세척한 결과 세척 회수가 증가함에 따라 석탄바닥제내에 함유된 중금속 함량도 지속적으로 감소하여 5회 세척부터는 세척수에 중금속이 감지되지 않았다.
- 용적밀도 변화에 따른 수분 보유력을 조사한 결과 표토의 수분 보유력이 심토보다 다소 높은 것으로 조사되었다. 간척지표층토의 포화수리전도도는 용적밀도가 증가함에 따라 초기 약 50시간 정도까지는 증가하다가 이 이후 감소하여 표면 담수 시작 후 약 100시간 이후부터 수분이동이 정지하는 것으로 조사되었다. 따라서 표층이라 하더라도 담수에 의한 제염효과는 크지 않을 것으로 판단되어 이에 대한 해결 방법을 찾아야 하였다.
- 석고의 혼입비율이 증가할수록 포화수리전도도는 증가하였으나 용출수의 공극 수량이 증가함에 따라 급격히 감소하여 약 20시간 정도 지난 후에 거의 유사한 경향을 보였다. 한편 유속(Flux)의 경우 석고함량이 1 % 일 때 유속이 최대로 유지되었다. 유속의 순서는 가장 1 % > 0.5 % ≈ 1.5% > 2%로 조사되었다.
- 60cm 동일 깊이의 간척지토양과 CBA 토주의 모세관상승 수분보유력을 조사한 결과 은 약 23.5~29.5 %의 수분함량을 나타내었는데, 토주의 하단과 상단 10cm 부위는 수분함량이 상대적으로 낮아 23.5 ~27.2%의 수분함량을 나타내었고, 토주 중간의 30~50cm 부위는 상대적으로 높은 27.4~29.5%의 수분함량을 나타냈다.
- 단일층토양의 용적밀도별 모세관상승 높이를 시간경과에 따라 나타내었다. 토주의 모세관상승은 토주 높이 60cm까지는 시간당 0.5cm이상의 빠른 속도로 모세관상승이 일어났으나, 이 후 지속적으로 모세관 상승속도는 감소하였다. 따라서 간척지에 20cm 이상의 대공극 층위의 조성은 수분과 염류의 모세관상승을 효율적으로 차단하여 재염화 현상을 막는데 매우 유용한 방법이 될 것으로 판단되었다.
- 석고 단독으로 처리할 때보다 제염속도가 증가하는 것으로 조사되었다. 특히 CBA만 10% 정도 혼합된 동일 수준의 제염 농도에 도달하는 시간이 증가되는 것으로 조사되었다. 따라서 제염효과와 효율성을 기준 시 CBA와 석고를 동시에 처리하는 것이 유리할 것으로 판단된다.
- 다층토주의 모세관 상승 70일 후 토주를 2.5cm 단위로 분석하여 토양의 수용성 양이온 함량을 조사한 결과는 토주 내 수용성양이온은 Na > Mg > K ≈ Ca 순으로 조사되었다.

CBA 토주(60cm)의 수용성  $\text{Na}^+$ 는 2.1 ~ 12.6  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 범위에 있었고, Na 함량은 대체로 토주의 높이 증가에 따라 대체로 감소하였으며 40~60cm에서는 1.0~ 3.1 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 의 낮은 함량을 보였다.

## 2절 에너지작물 바이오매스 생산증대 물 관리와 작물 재배법

우리나라 간척지 면적은 135,100ha이다. 이 면적은 1970년대 초에 시작된 식량증산 및 고미가 정책의 일환으로 정부 주도에 의해 조성된 간척지로서 지금까지 공식적으로 사용하고 있는 자료이다. (2009, 한국농어촌공사) 처음 막은 간척지는 고려 고종 19년에 몽고군의 침입으로 강화도에 천도하면서 군량미를 생산하기 위해 독을 쌓고 간척지를 조성하였다. 그 이후에도 식량을 얻을 목적으로 태평양전쟁이 발발한 1940년대와 한국전쟁을 치른 1950년대를 빼고는 계속적으로 간척지를 조성하였다. 특히 정부 주도로 막은 대규모 간척지 면적은 2006년에 물막이 공사가 완료된 새만금 간척지 28,300ha를 포함하여 평택, 계화도, 삼교천, 대호, 금강, 영산강Ⅱ, 영산강Ⅲ-1,2 지구 등 9지구 55,707ha나 된다. 이들 간척지는 2008년부터 농민에게 매각 하지 않고 임대로 운영하고 있다.

간척지 토양은 대부분 하해혼성충적토로서 염농도가 3.5% 정도되는 바닷물의 영향으로 소금기가 많아서 작물재배가 곤란한 정도로 염농도가 높고, 더욱이 지하수위가 60~80cm로 높으며 토양발달이 전혀 되지 않은 무구조 토양이므로 수직배수에 의한 제염이 불가능 한 토양이다. 간척지에 밭작물을 재배하기 위해서는 먼저 제염을 해야 하였다. 제염은 토양속에 있는 소금기를 제거하는 것으로서 어떤 방법을 사용하든 물이 있어야 하였다. 가장 손쉬운 방법으로 물을 담아서 소금기를 녹여 밖으로 유거(유去) 시키는 담수 제염법이 있고, 이보다 더 근본적으로 수직배수 제염을 시키는 삼투수 제염법이 있다.

담수 제염법은 주로 논에서 시행하며, 경운을 하거나 1회 담수량을 수심 5cm이상 깊게 하면 효과가 크며, 삼투수 제염법은 명거와 암거가 구분하는데 명거는 배수로를 깊게 파고, 암거는 설치간격을 좁히면 효과가 커진다. 지금까지 논에서 밝혀진 암거 설치 기준을 보면 암거간격은 토성별로 하고 암거깊이는 지하수위별로 결정하고 있다. 암거간격은 식토의 경우 깊이의 8배로 하고, 양토는 12배로 하고 있고, 암거간격은 과수의 경우 1m내외로 하고 지하수 용출 문제가 없으면 보통 60cm 내외로 하고 있다. 하지만 밭에 대한 암거 제염 효과 및 설치기준은 거의 없는 실정이다. 우리나라 간척지 토양의 토성은 세립질 또는 조립세립질로 되어 있으며, 이들 간척지 토양은 모두 지하수위가 높아 토양배수가 불량하고 건조시 염분이 작토층으로 상승하는 재염화가 반복되고 있다. 지금까지 간척지에 벼를 재배하기 위한 제염 기술은 많이 개발되어 널리 활용되고 있으나 밭작물을 재배하기 위한 염분상승 억제기술은 거의 개발되어 있지 않은 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 미사가 많아 재염화 현상이 심하게 발생하는 새만금 간척지에서 대공극 층위 형성에 의한 모세관 차단으로 염분상승 억제 효과를 검토하였다. 즉 간척지에 밭작물을 재배하기 위해서 암거시설을 하여 어느 정도 제염을 하고 있지만 밭작물을 파

중하고 정식하는 봄철에 가뭄이 들면 염분이 표토로 상승하는 재염화 현상이 발생하여 염해로 발작물 재배가 어렵게 된다. 따라서 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 30~60cm 부근에 석탄바닥재를 매립하여 대공극 층위 형성에 의한 모세관 차단으로 염분상승 억제 효과를 검토하고자 포장시험을 수행하였다.

1. 시험방법

가. 1년차

다공성 자원을 활용한 간척지 토층구조의 개선과 토층구조별 작물의 바이오매스 생산증대 재배 기술을 개발코자 김포시 광활면에 위치한 새만금 간척지 광활지구에서 포장시험을 수행하였다. 시험에 사용한 석탄바닥재의 이화학적 특성은 표 50과 같이 pH와 EC가 8.1 및 2.46으로 높고 T-N, OM 및 Av-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>도 약간 함유하였다 (표 54).

표 54 석탄바닥재의 이화학적특성

pH (1:5)		EC (dS m <sup>-1</sup> )	T-N	O.M	Av-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )
Active	Residual		(g kg <sup>-1</sup> )		
8.1	8.5	2.46	0.43	13.2	13.1

토양은 세사양질인 문포통으로서 pH와 염농도가 높은 반면 토양유기물, 인산 및 치환성 석회 함량이 극도로 낮은 염류토양이다. 따라서 토양염농도가 1.3%로 매우 높기 때문에 이양 전에 3주간 7회 환수제염을 하면서 담수를 하여 벼 이앙시 토양염농도가 대조토양은 0.17%, 토층개선구 토양은 0.11%까지 떨어 뜨려 작물재배가 가능토록 하였다(그림 72).

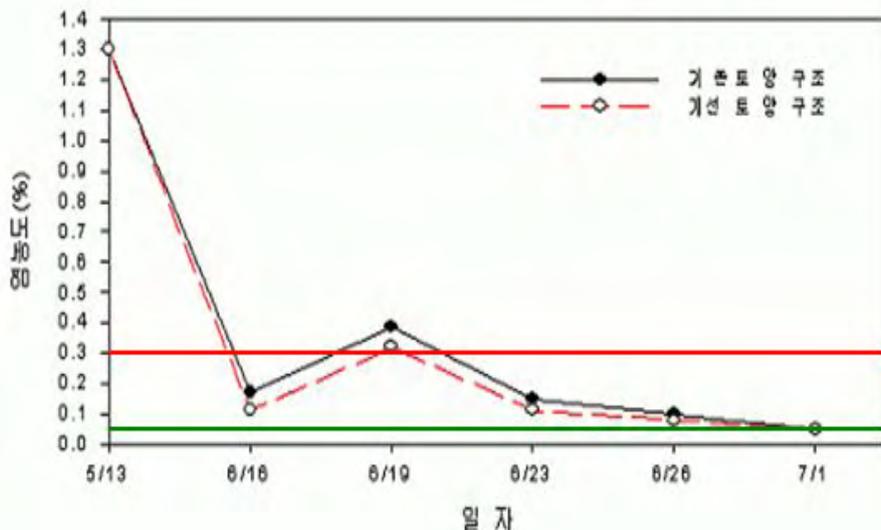


그림 72 담수제염에 의한 간척지 토양 염농도 변화

시험작물은 2009년 초년도에는 벼(동진1호)와 갈대를 사용하였다. 처리는 석탄바닥재를 토양깊이 30~60cm에 매립한 토층구조 개선구와 무처리구를 두었다. 벼 이앙은 2009년 6월 16일에 재식거리 30×12 cm로 하여 이앙하였다. 비료는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 11-10-10kg/10a 구와 22-10-10kg/10a를 두어 질소비료는 5회 분시, 인산비료는 전량기비로 하고 칼리비료는 2회 분시 하였다. 갈대는 10a 당 질소 5kg을 사용한 후 갈대를 심었다. 주요 조사내용으로는 벼와 갈대의 생육량 및 수량과 토양 및 식물체의 이화학적 성을 분석하였다.

토양의 화학적 특성은 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. pH와 EC 측정에는 시료와 증류수 비율을 1:5 wv로 하여 30분간 진탕한 후 pH meter (ORION, US/520A) 및 EC meter (ORION, US/160)를 이용해 초자전극 및 전기전도도법으로 측정하였고, 토양 유기탄소 측정에는 건식연소법 (dry combustion)으로 800~1,000℃에서 토양 중 탄소를 연소시켜 발생하는 이산화탄소를 CN automatic analyzer (Elementar Analysen Systeme, US/Vario Max CNS)를 이용하여 분석하였다. 암모니아태 질소는 포장상태의 토양시료를 Indophenol-Blue법으로 분석하였으며, 질산태질소는 암모니아태로 전환시켜 spectrophotometer (Shimazu, JP/UV-2501)를 이용해 665nm에서 비색 측정하였다. 유효인산은 Lancaster법으로 spectrophotometer (Shimazu, JP/UV-2501)를 이용해 720nm에서 비색 측정하였고, 유효규산은 1N-NaOAc(pH 4.0)침출법으로 분석하였다. 치환성 양이온은 1N-NH<sub>4</sub>OAc(pH 7.0) 침출법으로 추출한 액을 ICP-OES(Varian, Vista MPX-ICP)를 사용하여 470 nm에서 비색 정량하였다(NIAST 2000).

식물체분석은 70℃항온건조기에서 72시간동안 건조 후 분쇄된 시료를 습식분해 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)하여 C, N, P, K, Ca, Mg, Na 등의 정량에 사용하였다. 식물체 생육 및 수량조사는 농업과학기술연구소사기준(RDA, 2003)에 준하였다. 식물체분석은 70℃항온건조기에서 72시간동안 건조 후 분쇄된 시료를 습식분해 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)하여 C, N, P, K, Ca, Mg, Na 등의 정량에 사용하였다. 식물체 생육 및 수량조사는 농업과학기술연구소사기준(RDA, 2003)에 준하였다.

#### 나. 2년차 시험방법

대공극 소재를 활용한 간척지 토층구조의 개선과 이를 통한 작물 생산성 증대 기술 개발하기 위하여 김포시 광활면에 위치한 새만금 간척지 광활지구 간척지 포장에서 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 석탄바닥재는 전 년도와 동일한 재료를 사용하였다. 토양은 전년도와 동일한 세사양질인 문포통으로서 pH가 7.2~9.0으로 강알칼리성 토양이며, 염농도는 논토양의 경우 1.1~4.2 dS/m로 벼 재배 임계농도인 5.6 dS/m 보다도 낮았던 반면 밭 토양의 염농도는 12.9~32.4 dS/m로 극히 높았지만 석탄바닥재에 의한 제염 촉진 및 재염화 억제 효과를 구명하기 위하여 사전 담수를 하지 않고 시험을 수행하였다. 그 외 토양유기물, 인산 및 치환성 염기 함량은 무처리와 토층개선구 간에 차이가 없었지만, 토양깊이별로는 OM, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ex. K, Ca, Mg, Na 등 전 성분 모두 토층 10~20cm 보다 토층 0~10cm에서 더 높았다(표 55).

표 55 시험전 논과 밭 토양의 이화학적 특성

구 분		토양깊이	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	OM (g kg <sup>-1</sup> )	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Ex. cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )			
							K	Ca	Mg	Na
논토양	토층개선	0 ~ 10cm	8.2	1.6	2.9	58	0.57	1.1	2.5	1.8
		10 ~ 20cm	9.0	1.1	2.7	51	0.69	0.7	1.9	2.6
	무처리	0 ~ 10cm	7.8	4.2	3.1	58	0.57	1.1	2.5	2.0
		10 ~ 20cm	8.9	1.6	2.6	51	0.71	0.7	2.3	2.9
밭토양	토층개선	0 ~ 10cm	7.3	22.2	2.6	67	1.83	0.7	6.4	21.3
		20 ~ 40cm	7.8	12.9	2.3	47	1.31	0.9	4.0	12.7
	무처리	0 ~ 10cm	7.2	32.4	2.5	66	2.23	1.1	9.3	31.3
		10 ~ 20cm	7.6	19.5	2.2	53	1.58	1.1	5.8	19.7

시험작물은 2010년도 2년차에는 벼(동진1호)와 콩(태광)을 사용하였다. 처리는 벼의 경우 전년도와 같이 석탄바닥재(토양깊이 30~60cm에 20cm 두께 매물)구와 대조구를 두었으며, 콩은 석탄바닥재구(토양깊이 30~60cm에 20cm 두께 매물), 석고 500 kg/10a구, 석탄바닥재+석고 500 kg/10a 혼용구 및 대조구를 두었다. 벼 이앙은 2010년 6월 16일에 재식거리 30×12 cm로 하여 이앙하였다. 비료는 간척지 표준시비량인 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 20-10-10kg/10a을 질소비료는 5회 분시, 인산비료는 전량기비로 하고 칼리비료는 2회 분시 하였다. 콩은 6월 21일에 재식거리 60×15 cm 로 파종하였으며 비료는 6-8-6 kg/10a 량을 전량 기비로 사용하였다.

주요 조사내용으로는 벼와 콩의 생육량 및 수량과 토양 및 식물체의 이화학적 특성을 분석하였다. 토양의 화학적 특성과 식물체 무기성분 함량은 전년도와 같이 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였고. 식물체 생육 및 수량조사는 농업과학기술연구조사기준(RDA, 2003)에 준하였다.

#### 다. 3년차 시험방법

석탄바닥재를 활용 대공극 층위 형성에 의한 토층구조의 개선과 이를 통한 작물 생산성 증대 기술 개발 하기 위하여 김포시 광활면에 위치한 새만금 광활지구 간척지 포장에서 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 석탄바닥재는 전 년도와 동일한 재료를 사용하였다. 시험작물은 벼, 콩, 및 수수x수단그라스를 사용하였고, 처리는 2010년도와 같이 벼는 석탄바닥재 무처리구와 석탄바닥재 단용구를 두었고, 콩은 석탄바닥재를 무처리구, 석탄바닥재 단용구, 석고 단용구, 석탄바닥재+석고 병용구에 파종하였고, 수수x수단그라스는 석탄바닥재를 대입자와 소립자로 구분하여 시험하였다.

벼는 재식거리를 30 × 12 cm로 하여 6월 11일에 이앙하였고, 비료는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 20-10-10 kg/10a 사용하였으며 질소는 3회 분시, 인산은 전량기비, 칼리는 2회 분시하였다. 콩은 재식

거리를 60 × 15 cm로 하여 6월 9일에 파종하였고, 비료는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 6-8-6 kg/10a을 전량 기비로 사용하였다. 수수x수단그라스는 6월 11일에 산파하였고, 비료는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 15-10-10 kg/10a 사용하였으며 질소는 2회 분시, 인산과 칼리는 전량기비로 사용하였다. 시험구 면적은 구당 36m<sup>2</sup> (4×9m)로 하여 완전임의 배치법으로 하였다. 조사내용은 전년도와 같이 작물의 생육, 수량 및 토양 염농도의 경시적 변동사항을 조사하였다 (표 56).

표 56 새만금 간척지 토양의 사전 담수 기간별 토양 염농도와 제염율

담수기간	토양 염농도(dS/m)		제염율 (%)
	4/29(5/14)	6/9	
40일	7.9 (7.3~8.9)	0.4 (0.3~0.6)	94.9
25일	8.5 (8.3~9.9)	1.4 (0.8~1.6)	83.5

- ( ) : 담수기간 25일 구의 담수 시작일

시험토양도 전년도와 동일한 세사양질인 문포통으로서 pH가 높은 강알칼리성 토양이며, 염농도는 석탄바닥재 사용효과 시험포장은 2011년 4월 29일에 7.9 dS/m로 높기 때문에 6월 9일까지 40일간 담수를 하여 토양염농도를 0.4 dS/m까지 떨어 뜨린 후 벼, 콩 및 수수x수단그라스를 파종하였고, 석탄바닥재 입도 크기별 작물생산 효과 구명 시험은 토양 염농도가 8.5 dS/m인데 5월 14일부터 6월 9일 까지 담수제염한 결과 토양 염농도가 1.4 dS/m 되었을 때 콩과 수수x수단그라스를 파종하였다. 새만금에서 40일간 담수하면 제염율이 94.9%, 25일간 담수하면 제염율이 83.5%가 되었다(표 52). 따라서 벼 재배 임계농도인 5.6 dS/m와 발작물 안전 재배농도인 1.5 dS/m 보다도 낮았던 훨씬 낮은 농도에서 벼 이앙과 발작물 파종을 하여 발아율이 95%이상 되었다.

## 2. 연구결과

### 가. 1년차 연구 결과

새만금 간척지에서 토층개선 및 질소시비량별 쌀 수량 및 수량구성요소를 조사한 성적은 표 57과 같다. 쌀 수량은 대조구 464 kg/10a에 비하여 석탄바닥재를 처리한 토층개선구도 467 kg/10a으로서 첫 년도에는 전혀 차이를 찾아 볼 수 없었다. 이러한 원인은 석탄바닥재를 처리하여 재염화 현상을 방지하려 하였지만 이러한 효과 보다는 논은 재배기간 동안 상시 담수를 하기 때문에 토층개선에 의한 염농도 저하 효과가 없었던 것으로 생각된다. 반면에 질소 증비효과는 매우 커서 석탄바닥재 처리와 상관없이 N 11 kg/10a구에 비하여 N 22kg/10a구에서 50~54%의 쌀 증수효과가 있었다. 간척지는 염농도가 높아서 3일 간격 환수제염을 했기 때문에 양분유실이 크기 때문에 질소 증비효과가 컸던 것으로 판단된다.

표 57 석탄바닥재 및 질소시비량별 벼 수량 및 수량구성요소

처 리		㎡당 립수 (천개)	등숙비율 (%)	현미천립중 (g)	쌀수량 (kg/10a)
대조구	N 11	20.2	95.5	21.9	365(100)
	N 22	27.5	92.5	22.3	563(154)
토층개선구	N 11	21.2	95.7	22.2	373(100)
	N 22	26.9	92.5	22.5	561(150)

표 58은 토층개선 및 질소시비량별 쌀벼짚 건물중 및 C 고정량을 조사한 성적이다. 벚짚 건물중도 쌀 수량과 유사한 경향을 보였다. 대조구 491 kg/10a에 비하여 석탄바닥재를 처리한 토층개선구도 497 kg/10a으로서 차이가 없었으며, C 고정량도 대조구와 토층개선구간에는 전혀 차이가 없었고 단지 질소시비량별로는 질소증비구에서 더 많았다. 경엽의 C량은 석탄바닥재 및 질소 시비량별 로 차이가 없었지만 N량은 토층개선 및 질소 비료량을 증비할수록 N량이 증가하였는데 이는 석탄바닥재에 함유되어 있는 질소성분 때문으로 여겨진다.

표 58 석탄바닥재 및 질소시비량별 벼 건물중 및 C 고정량

처 리		건중 (kg/10a)	C (%)	N (%)	C 고정량 (kg/10a)
대조구	N 11	425(100)	32.8	0.37	139.5
	N 22	557(131)	32.9	0.47	183.2
토층개선구	N 11	432(100)	32.8	0.39	141.9
	N 22	561(130)	32.9	0.49	184.8

그림 73부터 75까지는 토층개선 논의 토양깊이별 염농도 변화를 나타낸 성적이다. 토양 염농도는 대체로 대조구에 비해 토층개선구에서 더 높았으며 토층 0~10cm에서는 8월 8일, 토층 10~20cm 및 20~30cm구는 9월 4일부터 토양 염농도가 대조구와 토층개선구 간에 비슷한 경향을 보였다. 토층개선구의 토양 염농도가 더 높았던 원인은 앞에서 설명한 바와 같이 석탄바닥재를 매몰할 때 토양이 교란 되었고 또한 석탄바닥재 자체에 염기가 함유되어 있었기 때문으로 생각된다. 아뭇튼 9월 4일 이후에는 토양 염농도가 2dS/m이하로 유지되어 쌀 수량이 365~563kg/10a로 질소비료량이 11kg/10a일 때는 일반논 대비 약 70% 내외이었지만 질소시비량을 22kg/10a으로 2배 증시하면 쌀 수량이 563kg/10a으로 일반논 보다도 오히려 더 높았다. 간척지 벼농사는 환수제염을 하기 때문에 질소를 증비하면 효과가 크고 또 원래부터 간척지 토양에는 염기가 많아서 어느 정도 제염이 되면 일반논 보다도 쌀 수량이 더 많은 경우가 있다.

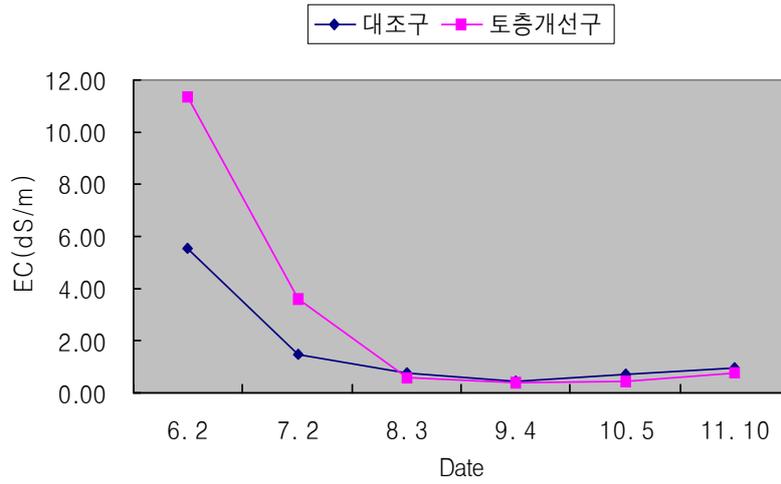


그림 73 토층개선 논외 토층 0~10cm 부근 토양 염농도 변화

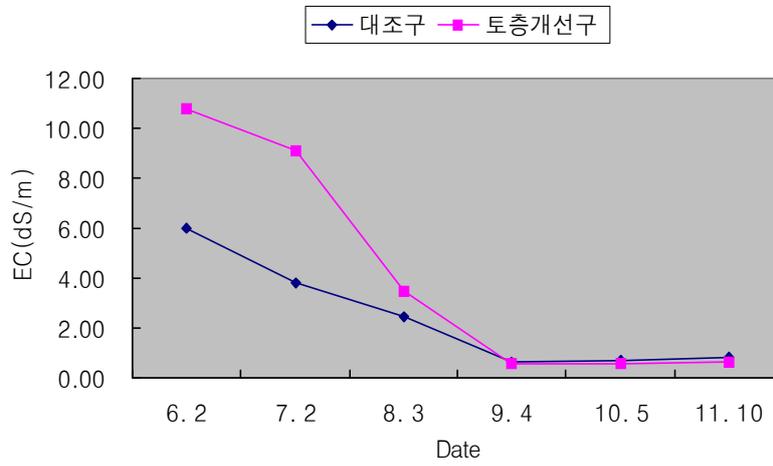


그림 74 토층개선 논외 토층 10~20cm 부근 토양 염농도 변화

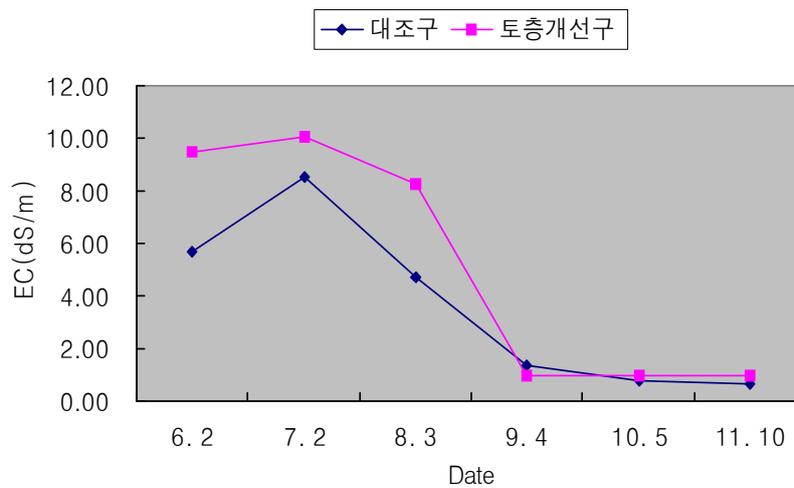


그림 75 토층개선 논외 토층 20~30cm 부근 토양 염농도 변화

그림 76은 간척지 토층개선구와 대조구의 갈대 생육 양상을 보여 주는 그림이다. 갈대 초장은 토층개선구에서 74cm 이었던 반면 대조구에서는 대부분 염해로 고사하였지만 생존한 갈대의 초장도 28cm 밖에 자라지 못했다. 이는 논토양과 달리 갈대를 재배하는 밭토양 상태에서는 염분 상승량이 많은데 석탄바닥재로 토층을 개선하면 염분 상승량이 감소하여 갈대 생육에 다소 도움이 됐던 것으로 생각된다. 이를 뒷받침 할 수 있는 성적은 그림 73~75까지 잘 나타내 있다.



< 토층 개선구 >



< 대조구 >

그림 76. 토층개선 논 토양의 염농도 변화

토층 개선한 갈대 재배구의 토양 깊이별 염농도 변화를 나타낸 성적은 그림 77~79와 같다. 토양 염농도는 대조구에 비해 토층 개선구에서 더 낮았으며, 토양깊이별로는 토층 20~30cm <토층 10~20cm <토층 0~10cm 순으로 낮아 밭 토양은 논 토양과 달리 담수를 하지 않기 때문에 재염화 현상으로 표토에서 염농도가 높았던 것으로 생각된다. 염농도 수준도 토층 0~10cm에서는 대부분 10 dS/m로 비 재배 임계염농도인 5.6 dS/m 높았고, 토층 10~20cm와 토층 20~30cm 구에서는 석탄바닥재에 의한 토층개선으로 대조구에 비해 염농도가 현저하게 감소하였다.

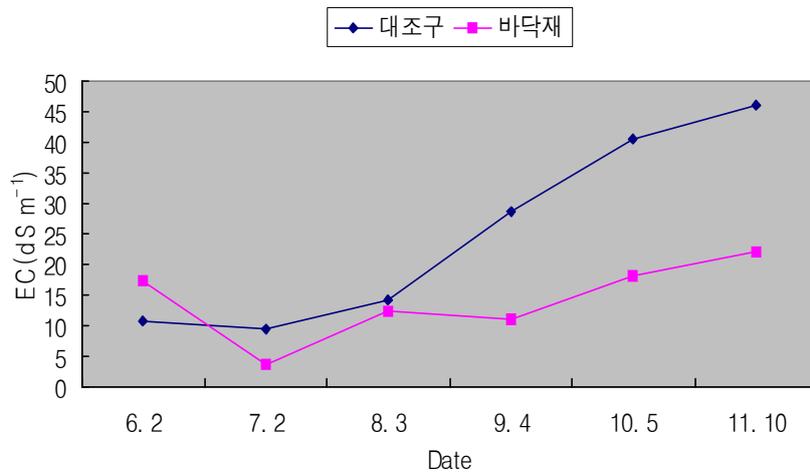


그림 77 토층개선 갈대 재배구 토층 0~10cm 토양 염농도 변화

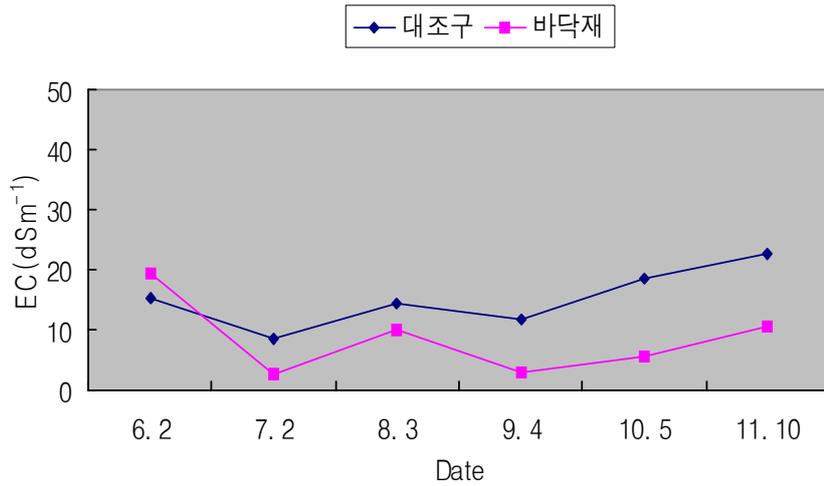


그림 78 토층개선 갈대 재배구 토층 10~20cm 부근 토양 염농도 변화

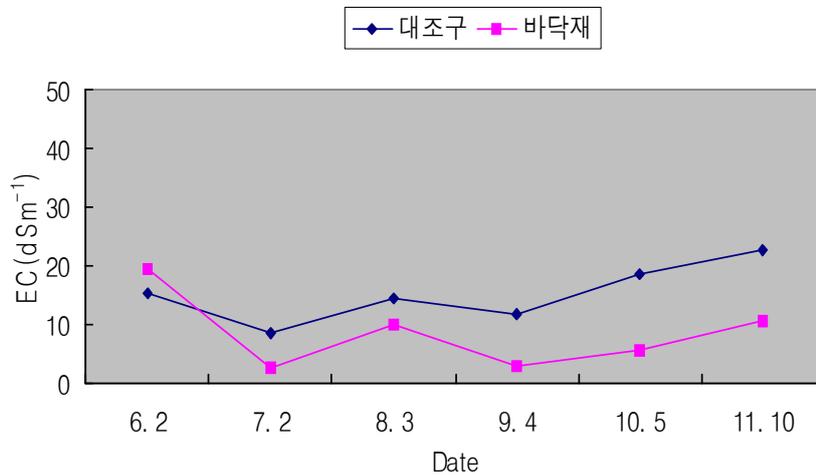


그림 79 토층개선 갈대 재배구 토층 20~30cm 부근 토양 염농도 변화

#### 나. 2년차 연구결과

석탄바닥재 처리에 의한 간척지 토층 개선 논의 벼 생육 및 쌀 수량은 표 59와 같다. 쌀 수량은 대조구 566kg/10a에 비하여 토층개선구 567kg/10a로 차이가 없었으며, 수량구성 요소는 토층 개선구에서는 현미 천립중이 높았고 m<sup>2</sup>당 립수와 등숙비율은 대조구가 더 높았다. 담수를 하여 벼를 재배하는 논에서는 석탄바닥재를 처리하여 물 빠짐이 너무 좋아져도 양분유실량이 증가하여 석탄바닥재 효과가 없는 것으로 나타났던 것 같다.

표 59 토층 개선 논의 벼 생육 및 쌀 수량

처 리	m <sup>2</sup> 당 립수 (천개)	등숙비율 (%)	현미천립중 (g)	쌀수량 (kg/10a)
토층개선	31.6	90.3	22.6	567
대 조	32.0	90.1	22.2	566

표 60은 토층 개선 발의 콩 생육 및 종실 수량을 나타낸 성적이다. 콩의 출현율은 석탄바닥재 + 석고구 48.7%, 석탄바닥재 단용구는 1.1%를 나타낸 반면 석고 단용구와 무처리구는 전혀 발아가 되지 않았다. 고사율은 석탄바닥재 + 석고구 36.3개/주, 석탄바닥재 단용구는 100개/주를 나타내었다. 종실 수량은 석탄바닥재 + 석고구에서 만이 6.4kg/10a을 얻었다. 물론 이 수량은 일반경작지 150kg/10a에 비하면 4.2%에 불과 하지만 그래도 염농도가 12.9~32.4 dS/m로 극히 높은 간척지 발 토양에서 수량을 얻을 수 있다는 것은 간척지에도 재염화만 어느 정도 경감할 수 있다면 발작물 재배도 가능 하다는 것을 보여 주는 성적이다.

표 60 토층 개선 발의 콩 생육 및 종실 수량

처 리	출현율 (%)	고사율 (개/주)	건물중 (kg/10a)	주당협수 (개/주)	종실수량 (kg/10a)
석탄바닥재 + 석고	48.7	36.3	48.7	3.9	6.4
석탄바닥재	1.1	100.0	1.1	-	-
석고	-	-	-	-	-
무처리	-	-	-	-	-

이러한 결과는 그림 80에서 잘 보여주고 있다. 석탄바닥재 단용구는 수분이 있는 일부 모퉁이에서만 발아가 되었지만 석탄바닥재에 석고를 병용하면 그림 1에서 보는 바와 같이 콩 출현률이 48.7%나 되었다. 비록 개화기 이후 가뭄이 발생하여 생육 후기에는 석탄바닥재에 석고를 병용한 구에서도 대부분 고사하였지만 그래도 석회를 좋아하는 호석회 작물인 콩을 재배할 때는 석고 병용효과가 얼마나 크다는 것을 알 수 있다.



< 석탄바닥재 >

<석탄바닥재+석고(생육초기)>

<석탄바닥재+석고(생육후기)>

그림 80 토층 개선 발의 콩 생육 전경(2010. 8. 20)

그림 81부터 그림 83은 콩 재배 발 토양의 깊이별 EC 변화를 나타낸 성적이다. 토양 염농도는 토양 깊이가 낮아질수록 높아지는 경향으로 토층 0~10cm에서는 석탄바닥재+석고구에서 만이 10dS/m이하로 유지되었을 뿐 그 외 처리에서는 20~50dS/m로 콩 생육 후기에 석탄바닥재구에

서 약간 염농도가 낮아 졌을 뿐 무처리, 석고 및 석탄바닥재 단용구는 표토의 염농도가 매우 높아 저서 콩이 대부분 고사하였다. 그러나 토층 10~20cm와 토층 20~30cm에서는 염이 표토로 상승하여 오히려 0~10cm보다도 더 낮았으며, 석탄바닥재+석고구와의 염농도 차이도 훨씬 적어 졌다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 1.간척지 밭 토양은 재염화 피해가 큰 문제점이며, 이러한 현상을 막을 수 있는 방법은 지하 일정 부분에 대공극 층위를 형성하여 모세관 현상에 의한 재염화를 막는 것 이지만 이보다 먼저 석고와 같은 석회물질을 사용하여 투수력 증대로 제염을 촉진시킨 후에 염분상승을 막아야 만 하지만 기상변화가 큰 문제로서 대 가물이 발생 하면 석탄바닥재에 석고를 병용해도 염이 상승하여 콩 재배 임계농도 이상으로 되어 콩 재배가 어려워지게 된다.

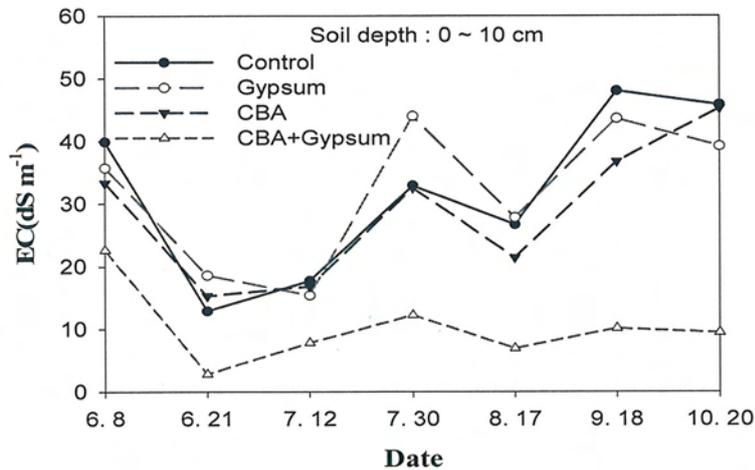


그림 81 토층개선 밭 토층 0~10cm 부근 토양 염농도 변화

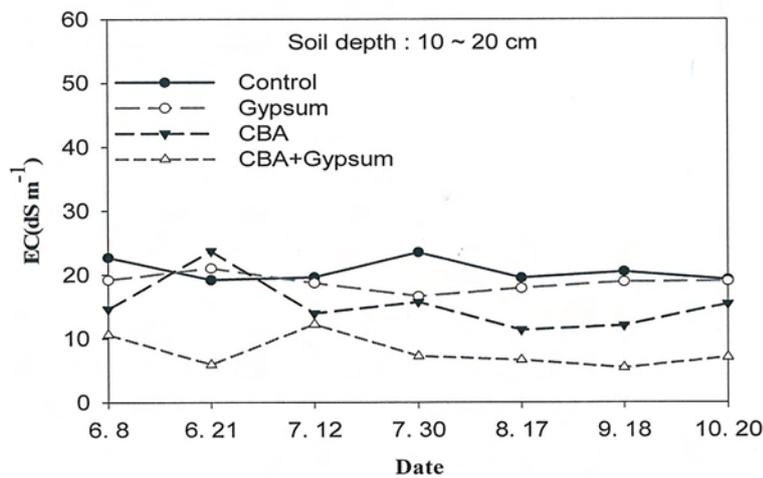


그림 82 토층개선 밭 토층 10~20cm 부근 토양염농도 변화

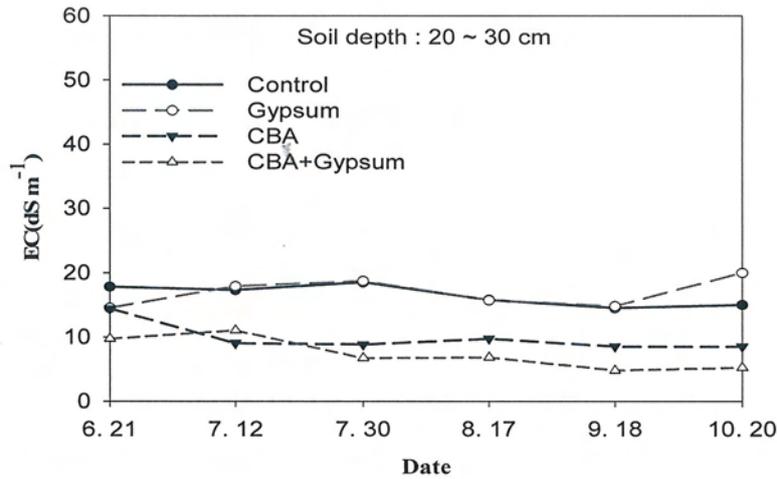


그림 83 토층개선 발토층 20~30cm 부근 토양염농도 변화

### 다. 3년차 연구결과

석탄바닥재 처리에 의한 벼 생육 및 쌀 수량을 나타낸 성적은 표 61과 같다. 쌀 수량은 석탄바닥재 처리구가 무처리구 보다 감소하였으며, 또한 초장, 경수 및 벼짚건물중도 무처리구 보다 감소하였다. 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았지만 벼 재배 논에서는 석탄바닥재 처리구와 무처리구 간에 3년간 벼 수량에 차이가 없었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 답수를 하여 벼 재배를 하는 논에서는 석탄바닥재 처리에 의한 제염효과 보다는 관개수가 더 제염에 필요하다.

표 61 석탄바닥재 처리에 의한 벼 생육 및 쌀 수량

처리	쌀 수량 (kg/10a)	초장 (cm)	경수 (개/주)	벼짚건물중 (kg/10a)
무처리	483(100) a	86	17.0	657
CBA	469(97) a	84	16.5	640

표 62는 석탄바닥재 처리에 의한 콩 생육 및 근류균 형성정도를 보여주는 성적이다. 콩 지상부와 지하부 건물중, 초장, 분지수 및 근류균 갯수는 석탄바닥재+석고 > 석고 > 석탄바닥재 > 무처리 순으로 높았다. 특히 콩은 생육량이 적으면 근류균 형성도 적었다. 반면에 고사주는 무처리 > 석탄바닥재 > 석고 > 석탄바닥재+석고 순으로 높았다. 간척지에 석탄바닥재를 단독 사용하면 다소 제염 촉진 및 재염화 방지 효과가 있어서 무처리 보다는 콩 생육이 촉진되지만 석고 단용구 보다는 효과가 적었다. 원래 간척지 토양에는 치환성 석회 함량이 매우 부족하여 석고를 사용하면 석회 시용 효과가 나오며, 더 더욱 석고를 사용하면 투수성을 촉진시켜 제염 효과가 더 빨리 나온다. 이러한 원인으로 석탄바닥재+석고시용구에서 콩 생육은 촉진되고 고사주는 감소하였던 것 같다.

표 62 석탄바닥재 처리에 의한 콩 생육 및 근균류 형성정도

처리	건물중(g/주)		초장 (cm)	분지수 (개/주)	고사주 (주/150 주)	근류 (개/주)
	지상부	지하부				
무처리	21	4.3	65	6.1	80	15
석탄바닥재	26	3.8	72	8.2	19	59
석고	45	7.5	75	8.7	12	72
석탄바닥재+석고	49	7.9	85	9.5	4	88

석탄바닥재 처리에 의한 수수x수단그라스 생체중 및 초장을 비교한 성적은 표63과 같다. 수수x수단그라스는 콩과 달리 석고시용구에서 생체중과 초장이 가장 컸고 다음은 석탄바닥재+석고구에서 생육이 좋았지만 석탄바닥재 단용구는 무처리 보다도 생육이 저조하였다. 이러한 원인은 그림 81의 석탄바닥재 처리에 의한 간척지 토양의 EC 변동을 보아도 알 수 있다. 석탄바닥재 단용구의 염농도가 무처리구 보다 높았는데 이는 콩 생육 후기에 잦은 강우로 인하여 지하수위가 토양표면까지 상승하여 재염화 방지 효과가 없었던 것으로 생각된다. 아울러 수수x수단그라스의 생육도 일정한 경향을 보이지 않았다.

표 63 석탄바닥재 처리에 의한 수수x수단그라스 생체중 및 초장 비교

처리	생중(kg/구)	초장(cm)	고사주 (주/150주)
무처리	30.0	105	-
석탄바닥재	29.5	100	-
석고	39.5	140	-
석탄바닥재+석고	35.5	130	-

- 담수 40일후에 파종하여 받아들음은 향상되고 고사주는 없었음

표 64는 석탄바닥재 크기에 따른 수수x수단그라스 생체중, 초장 및 고사주 발생을 비교한 결과이다. 석탄바닥재 크기별로 보면 대입자구가 소립자구 보다 생체중은 1.4배, 초장은 약간 컸던 반면 고사주수는 반으로 감소하여 대입자가 수수x수단그라스 생육에 훨씬 유리함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 그림 2의 석탄바닥재 대입자와 소입자 시용 토양의 EC 비교에서도 알 수 있다. 대입자 시용구의 토양깊이별 염농도가 8.6~11.8dS/m를 보인 반면 소립자구의 토양깊이별 염농도는 11.5~18.5 dS m<sup>-1</sup>를 보였다. 제염율도 토양깊이 0~10cm는 25.2%, 토양깊이 10~20cm는 40.7%, 토양깊이 20~30cm는 39.8%, 토양깊이 30~40cm는 36.2%로 석탄바닥재를 사용하면 토양깊이에 관계없이 25.2~40.7%의 제염율을 보였다.

표 64 석탄바닥재 크기에 따른 수수x수단그라스 생체중, 초장 및 고사주 비교

처 리		생 중(kg/구)	초 장(cm)	고사주 (주/150주)
대입자	NPK	42.5	121	31
	NPK+석고	66.2	130	15
소입자	NPK	35.0	120	40
	NPK+석고	43.7	128	41

그림 84는 석탄바닥재 처리에 의한 벼, 콩, 수수x수단그라스 재배 간척지 토양의 EC 변동을 나타낸 성적이다. 벼 논외 토양 염농도는 석탄바닥재 처리에 관계없이 6월 8일에 0.5dS/m를 보였다가 10월 3이에는 0.35dS/m까지 떨어져서 석탄바닥재 시용효과를 볼 수 없었다. 콩 재배 토양의 염농도는 전 생육기간 동안 무처리 > 석탄바닥재 > 석고 > 석탄바닥재+석고 순으로 높아 토양 염농도가 콩 생육과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 그러나 콩 재배 토양의 염농도가 생육 후기에 1.5~3.4dS/m를 유지했지만 이는 0.10~0.22%인데도 생육 후반기에 콩이 대부분 고사 한 것으로 보아 콩의 임계 염농도는 0.1% 이하임을 알 수 있다.

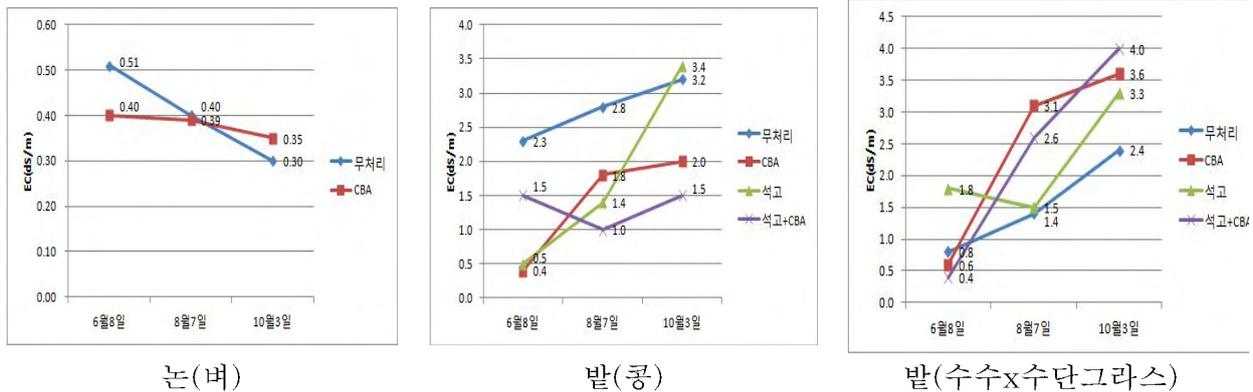


그림 84 석탄바닥재 처리에 의한 간척지 토양의 EC 변동

앞에서 설명했지만 수수x수단그라스 재배 토양의 염농도와 작물생육과의 관계는 앞에서 설명했지만 석탄바닥재와 석탄바닥재+석고 병용구에서 토양 염농도가 높았는데 이는 2011년에 신규 재배한 포장인 점과 또한 잦은 강우로 인한 지하수위 상승이 원인이었던 것 같다. 앞으로 기상 변동과 관련 된 좀 더 세밀한 설계를 하여 원인을 밝혀야 할 것 같다 (그림 85).

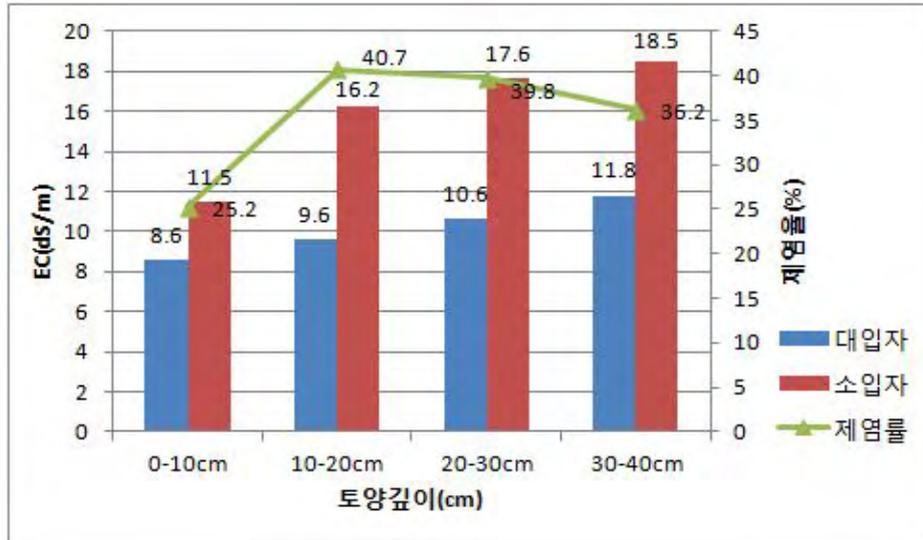


그림 85 석탄바닥재 대입자와 소입자 사용 토양의 EC 비교

그림 86은 토양깊이별 석고 시용에 의한 토양의 EC 감소 효과를 보여주는 성적이다. 석고를 전층시비 만 하여도 무처리에 비해 토양 제염 효과가 현저하다는 것을 알 수 있다. 제염율 역시 표토에서는 45.5%로 현저히 높으며 토양 깊이 30~40cm에서도 30.9%의 높은 제염율을 보였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 간척지 토양에 지하배수 시설을 하거나 이번 시험처럼 일정한 토양 깊이에 전면 석탄바닥재를 깔아서 제염 촉진 및 재염화 방지 효과를 얻기 위해서는 반드시 석고를 병용하여 투수력을 높임으로서 제염 효과를 극대화 하여야 할 것이다.

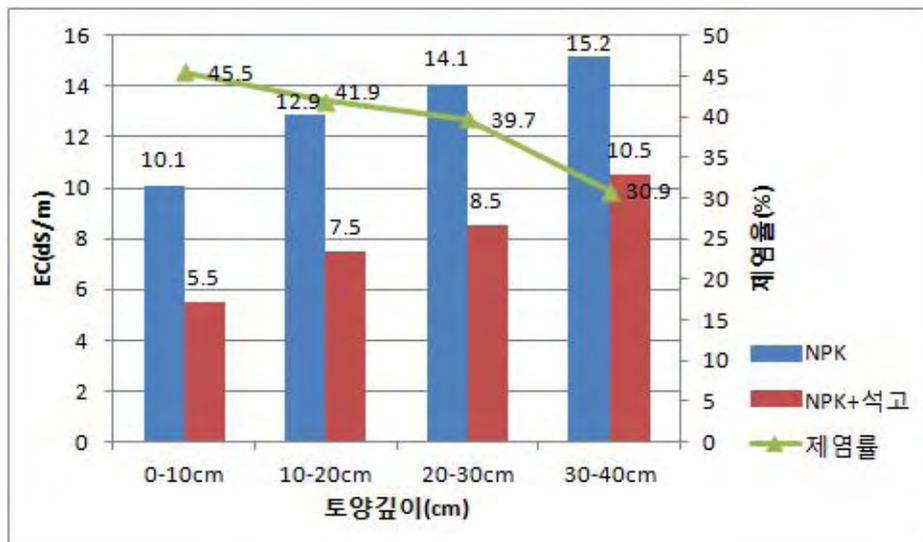


그림 86 토양깊이별 석고 시용에 의한 토양의 EC 감소 효과

### 3. 결과 요약

간척지 토양에서 석탄바닥재를 활용한 대공극 층위 형성이 제염 촉진 및 벼, 갈대(2009년), 벼, 콩(2010년), 벼, 콩, 수수x수단그라스(2010년)의 생육에 미치는 효과를 구명하기 위하여

새만금 간척지에서 포장시험을 수행하였다. 다공성물질인 석탄바닥재는 토양깊이 30~60cm에 매립하였고 벼 이앙 및 발작물 파종 전에 담수를 하여 토양 염농도를 2dS/m이하가 되게 하였다. 그 외 작물재배법, 비료시용 및 조사방법은 국립식량과학원 작물재배 조사기준에 준하였다. 새만금 간척지 초기 토양염농도는 21.9dS/m(1.3%)로 작물생육이 불가능하므로 이앙전에 3주간 담수를 하여 표토의 토양 염농도를 2~4dS/m까지 떨어뜨린 후 벼, 갈대, 콩 및 수수x수단그라스를 파종하였다.

석탄바닥재 처리 당년에 토양의 경시적 염농도를 보면 토양깊이 0~10cm에서는 7월 2일에 벼 재배토양의 생육 임계농도인 4dS/m가 되었지만 토양깊이 10~20cm에서는 8월 3일에, 토양깊이 20~40cm에서는 9월 4일에 2~4dS/m로 염농도가 떨어졌다. 석탄바닥재를 처리한 토층 개선구가 무처리구 보다 초기 토양 염농도가 더 높았는데 이는 석탄바닥재 매립시 토양 교란이 원인이었던 것 같다. 쌀 수량은 무처리 464kg/10a에 비하여 토층개선구도 467kg/10a로서 수량차이가 없었으며 수량구성요소 및 벧짚 건물중도 차이가 전혀 없었다. 그러나 질소비료 11kg/10a 구보다 질소비료를 배량 증시한 22kg/10a구에서는 쌀 수량, 벧짚 건물중 및 탄소 고정량이 훨씬 높았다. 한편 갈대는 토층개선에 의하여 초장이 74cm가 되도록 생육이 되었지만 무처리구는 대부분 염해로 고사하였고 생존한 갈대 초장도 28cm에 그쳤다. 석탄바닥재 처리 당년에는 토양교란 때문에 토양제염 및 작물생육 촉진 효과가 없었다.

2010년에는 벼와 콩을 대상으로 석탄바닥재에 의한 제염 및 생육촉진 효과를 구명하였다 쌀 수량은 무처리구 566kg/10a에 비하여 토층 개선구는 567kg/10a로서 전혀 차이가 없었으며, 그 외 수량구성요소도 차이가 없었다. 이와 더불어 토양 화학성도 EC만 석탄바닥재 처리로 약간 떨어졌을 뿐 그 외 OM, Av.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 Ex. K, Ca, Mg 성분은 차이를 보이지 않았다. 콩은 벼와 달리 개화기까지는 석탄바닥재+석고 처리구에서 생육촉진 효과가 매우 컸다. 콩 출현률은 무처리, 석고 및 석탄바닥재 단용구가 0~1.1%인 반면 석탄바닥재+석고 처리구는 48.7%로서 현저한 효과가 있었으며, 비록 개화기 이후 재염화로 고사율이 36.3%나 되었지만 종실수량도 6.4kg/10a이나 생산할 수 있었다. 콩 재배 토양의 EC도 콩 수량과 같은 경향으로 전 생육기간 동안 석탄바닥재+석고 처리구에서 낮았다. 이러한 원인은 석고를 처리하면 침강성이 증대되어 제염이 촉진됨은 물론 토층 30~60cm에 매립한 석탄바닥재가 염기 상승을 경감시켰기 때문으로 판단된다.

2011년에는 벼, 콩 및 수수x수단그라스를 대상으로 석탄바닥재의 단용 및 석고 혼용고와 석탄바닥재 입자 크기별로 제염 및 작물생육 촉진 효과를 구명하였다. 쌀 수량은 2009~2010년과는 달리 석탄바닥재 처리구가 무처리 보다 더 낮았다. 콩 수량, 초장, 분지수 및 근류균 수는 석탄바닥재+석고 > 석고 > 석탄바닥재 > 무처리 순으로 컸지만 고사주는 무처리 80주/150주(구)에 비하여 석탄바닥재+석고구는 4주/150주(구)로 거의 고사를 하지 않았다. 수수x수단그라스

생육은 콩과는 달리 석고단용구에서 생중 및 초장이 가장 컸다. 입지크기별 수수X수단그라스 생체중은 소입자구 35.0kg/구에 비하여 대입자구는 42.5 kg/구로서 21%나 수량이 증가하였으며, 여기에 석를 혼용하면 생체중 증가 효과가 더 컸다. 경시적 및 입자 크기별 토양 염농도 변화도 작물 생육량과 동일한 결과를 보여 토양 염농도가 낮을수록 생육 및 수량이 많았다. 이상의 결과로 미루어 볼 때 석탄바닥재 처리는 제염촉진 및 재염화 방지에 어느정도 효과가 있었으며 입자가 클수록 그 효과가 더 컸다.

### 3절 재활용 자원 활용 간척지 농경지 탄소 저장량 증대 및 온난화 가스 저감 농자재 시비 방안

#### 1. 재료 및 방법

##### 가. 처리구

토양 내 Bottom ash 의 처리 양에 의한 효과비교를 위해 새만금 간척지의 토양 및 일반 토양을 각각, Soil, Soil +Bottom ash 10%, Soil +Bottom ash 30%로 처리하였으며, Bottom ash 는 토양무게의 10%, 30%로 처리하였다. 또한 토양 내 유기물 안정화와 Bottom ash 처리양과의 효과비교를 위해 Soil +OM, Soil +OM+Bottom ash 10%, Soil +OM +Bottom ash 30% 세가지 처리구를 조성하였다. 투입 유기물은 논토양의 경우는 볏짚, 밭토양의 경우에는 콩을 사용하였고, 투입량은 토양 내 유기물함량이 2%가 되도록 하였다. 이 때, 모든 유기물은 건조 분쇄하여 약 3 mm 이하가 되도록 처리하였다. 아울러, 논/밭 토양 내 친환경 농자재를 이용한 유기물 안정화와 Bottom ash의 효과를 비교검증을 위해 시판 부산물 비료를 Soil +Compost, Soil +Compost +Bottom ash 10%, Soil + Compost +Bottom ash 30% 로 처리하였다.

##### 나. 가스 샘플링 및 분석

모든 시료는 30℃ 조건에서 토양 수분함량을 조절하면서 항온배양 한 후, 밀폐형 자동순환 장치를 이용해 시료를 10분에 한번씩, 총 3회 샘플링 하여 농도 증가에 의한 방출 플럭스를 계산하였다. 채취한 시료 중 CO<sub>2</sub> 농도는 메타나이저를 사용하여 CH<sub>4</sub> 과 함께 GC FID 를 이용하여 측정 하였고, N<sub>2</sub>O는  $\mu$ -ECD 를 이용하여 분석하였다.

##### 다. 토양화학성 분석방법

###### (1) pH

(가) 풍건한 토양 시료 5 g 을 50 ml 팔콘튜브에 넣었다.

(나) 2차 증류수 25 ml (1:5) 를 가한 후 진탕기를 이용하여 180 rpm 에서 30분간 진탕하였다.

(다) 볼텍싱 (약한 세기) 하면서 pH meter 를 이용하여 측정하였다.

(2) 전기전도도 (EC)

(가) 풍건 토양 시료 5 g 을 50 ml 팔콘튜브에 넣었다.

(나) 2차 증류수 25 ml (1:5) 를 가한 후 진탕기를 이용하여 180 rpm에서 30분간 진탕하였다.

(다) 원심 분리기 (HANIL MEGA 17R, korea) 를 이용하여 3000 rpm에서 3분간 원심 분리하였다.

(라) Whatman No.42 여과지로 여과하였다.

(마) 여과된 용액에 0.1 M Sodium hexamataphosphate 1방울을 넣었다.

(바) 가볍게 용액을 흔들면서 EC meter 를 이용하여 측정하였다.

(3) 암모니아태 질소 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) - Colormetric method

(가) 풍건 토양 4.5 g 을 50 ml 팔콘 튜브에 넣었다.

(나) 2 M KCl 45 ml (1:10) 를 가한 후 진탕기를 이용하여 180 rpm에서 1시간 동안 진탕하였다.

(다) Whatman No.42 여과지로 여과하여 토양 시료를 추출하였다,

(라) 1:10 2M KCL 토양 추출용액 2 mL 를 50 mL 팔콘 튜브에 넣었다 (Calibration 용 팔콘튜브에는 각각 2M KCl 2 mL 를 넣었다).

(마) 시료 당 1 ml 의 EDTA 용액을 가한 후 바로 흔들어서 잘 혼합하였다(Calibration 용 팔콘튜브에는 EDTA 용액을 처리하지 않았다.

(바) 시료 당 4 ml 의 salicylate-nitroprusside 용액을 가한 후 잘 흔들어 주었다 (Calibration 용 튜브에는 각각 Working standard solution 1, 2, 3, 5, 10 mL 씩 가했다.

(사) 증류수 약 20 ml 를 가한 후 잘 흔들어 주었다.

(아) 시료 당 2 ml hypochlorite reagent buffered 를 가하고, 바로 증류수로 25 mL 까지 맞추어 주었다. 그 후, 10초간 볼텍싱 하였다.

(자) 37 °C 로 예열된 항온수조에서 30분 동안 발색시킨 후 상온에서 약 10분 동안 식혔다.

(차) Standard curve 를 그린 후 Reagent blank (2M KCl) , Sample 순으로 측정하였다.

(5) 암모니아태 질소 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) - Distillation method

(가) 풍건 토양 시료 4.5 g 을 팔콘튜브에 취했다.

(나) 2 M KCl 45 ml (1:10) 를 가한 후 진탕기를 이용하여 180 rpm에서 1시간 동안 진탕하였다.

(다) 뷰히너 석션 깔때기를 사용하여 No.42 여과지로 여과하였다.

(라) 여과된 용액 30 ml 를 켈달튜브에 옮기고 MgO 0.5 g 을 가한 후 켈달증류장치 (Velp UDK-130, Italy) 로 증류하였다.

(마) 증류된 암모니아는 2% 붕산 10 ml 로 포획한 다음, 자동적정장치 (Com- 450, Hiranuma, Dokyō Japan) 를 이용하여 0.0025 N 황산으로 적정하였다.

(6) 질산태 질소 ( $\text{NO}_3^-$ -N) - Distillation method

(가) 위의 암모니아태 질소를 증류하고 남은 용액을 상온으로 식힌 후 Devarda's alloy (Merk) 0.2 g 를 가한 후 질산태 질소를 암모니아태 질소로 환원시킨 후 증류하였다.

(나) 증류된 암모니아는 2% 붕산 10 ml 로 포획한 다음, 자동적정장치를 이용하여 0.0025 N 황산으로 적정하였다.

(7) 유효인 (Available Phosphate)

(가) 풍건 토양 시료 1.0 g 을 팔콘 튜브에 가한 후 7 ml  $\text{NH}_4\text{F}$  침출액을 넣었다.

(나) 볼텍스 (가장 강한 세기)를 이용하여 세기 1분 동안 혼합한 후 Whatman No.42 여과지로 석션을 통해 고속 여과하여 토양 시료를 추출하였다.

(다) 토양 시료를 가하지 않은 Blank 도 같은 부피로 여과하여 추출하였다.

(라) Working phosphate standard solution 5 mg P/L 을 각각 0.5, 1, 2, 4, 8 ml 를 각각의 팔콘튜브에 넣은 후 Mixed reagent 시약 8 ml 를 넣고 최종부피가 50 ml 가 되도록 2차 증류수를 가하였다.

(마) 그 후, Mixed reagent 을 8 ml 넣고 최종부피 50 ml 가 되도록 2차 증류수를 넣고 잘 섞었다.

(바) 30°C 항온수조에서 10분 동안 발색시킨 후, 880nm에서 흡광도를 측정하였다.

(사) 5개의 표준 시약의 흡광도를 이용하여 Standard curve 그래프를 그렸다.

(아) 토양 침출액 1 ml 에 약 25 ml 2차 증류수를 넣은 후 Mixed reagent 을 8 ml 넣고 최종 부피 50 ml 가 되도록 2차 증류수를 넣고 잘 섞었다.

(자) 30°C 항온수조에서 10분 동안 발색시킨 후, 880nm에서 흡광도를 측정하였다.

(8) 총 인 (Total Phosphate)

(가) 토양 시료 0.5 g (100mesh 통과 시료)을 분해 튜브에 넣고 질산 5 ml (1:10)를 가하였다.

(나) 분해 튜브를 80°C에서 1시간 가열하였다.

(다) 상온까지 식힌 다음 과염소산 2.5 ml 를 가해주었다.

(라) 다시 130°C에서 1시간 가열하였다.

(마) 짙은 갈색이 사라지는 것이 확인이 안 되었을 경우, 상온으로 식힌 후 과염소산 2.5 ml 를 가하고 180°C에서 분해액이 맑아지는 것을 확인될 때까지 가열하였다.

(바) 분해액이 맑아진 후 230°C에서 20분간 가열한 후 상온으로 식혀주었다.

(사) 식힌 용액에 증류수를 50 ml 눈금까지 채워 희석하였다.

(아) 분해액 40 ml 를 100 ml 비이커로 옮겼다.

- (자) 0.25% p-nitrophenol 지시약 5방울을 떨어뜨렸다.
- (차) 노란빛이 발색될 때 까지 5 M NaOH로 적정하여 용액의 pH를 5~6 정도로 맞추었다.
- (카) Ascorbic acid 발색법으로 흡광도를 측정하였다.

(9) 양이온치환용량 (Cation Exchange Capacity, CEC)

- (가) 주사기 내부에 N-free pulp 를 적당량 넣고 피스톤을 밀어 넣어 단단한 지지층을 만들어 풍건토양 (2mm 체 통과) 5 g 을 넣은 후, extractor 에 1번 주사기를 설치하였다.
- (나) 1 N CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 25 ml 를 기벽을 씻으면서 넣었다.
- (다) extractor 에 장치한 후 1번 주사기에 고무튜브를 연결하였다. 그 후, 아래쪽에 고무패킹이 달린 3번 주사기를 2번 주사기위와 연결하였다.
- (라) 3번 주사기에 1 N CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 25 ml 를 넣었다.
- (마) 2번 주사기 토양속의 기포를 제거한 후 침출시간(12시간)을 설정한 후, 스위치를 켜고 포화가 완료되었을 때 스위치를 껐다.
- (바) 고무관을 뺀 후, 침출되어 나온 액을 버리거나 치환성 양이온함량 측정에 이용하였다.
- (사) Extractor 를 다시 설치하고 1번 주사기를 장착하였다.
- (아) 2번 주사기의 기벽을 80% ethyl alcohol (세척용) 20 ml 로 씻어 내리며 넣었다.
- (자) 침출시간을 6시간으로 설정하고 스위치를 껐다.
- (차) 1시간 30분 후 (80% ethyl alcohol이 다 빠졌을 때) 다시 80% ethyl alcohol 20 ml 를 넣었다(이 과정을 3번 반복하였다).
- (카) 세척이 완료되었을 때 스위치를 끄고 주사기를 분리하였다.
- (타) 2번 주사기의 토양을 철사를 이용하여 250 ml 켈달튜브에 넣었다.
- (파) 주사기 입구의 토양을 N-free pulp 로 씻어내면서 남은 토양용액을 켈달튜브에 넣었다.
- (하) 켈달튜브에 2차 증류수 70 ml, MgO 1.5 g 을 넣은 후, 켈달 증류 장치 (Kieltec™ 2300, Tecator™ Technology) 를 이용하여 3분간 증류하였고, 증류되어 나온 기체를 2% 붕산으로 포집하여 0.5 N 황산 표준액으로 적정하였다.

(10) 치환성 양이온 (Exchangable Cation)

- (가) 2 mm 체를 통과한 풍건 토양 5 g 을 50 ml 팔콘튜브에 넣었다.
- (나) 1 M NH<sub>4</sub>OAc 25 ml 을 넣은 후, 180 rpm 에서 30분 동안 진탕하였다.
- (다) 원심분리기를 이용하여 3000 rpm에서 3분간 원심 분리하였다.
- (라) 시료의 상등액만을 Whatman No. 42 여과지로 거른다.
- (마) (나), (다), (라) 과정을 한 번 더 반복한 후 각각의 침출액을 50 ml 팔콘튜브에 넣고 1 M NH<sub>4</sub>OAc 을 이용하여 최종부피를 50ml 로 맞춰주었다.
- (바) 위에서 얻은 토양 침출액을 ICP 로 측정하였다.

(11) 토성

- (가) 풍건토양 시료 10 g 을 정량하여 삼각플라스크 250 ml 에 담았다.
- (나) 삼각플라스크에 증류수 30 ml 씩 가하고 30% 과산화수소를 25 ml 씩 가한 뒤, 진탕기에 서 160 rpm에서 30분가량 진탕하였다.
- (다) 이후 과산화수소의 유기물분해반응을 촉진하기 위해 90 ℃정도의 열을 가해주었다. 이 반응이 끝날 때 까지 과산화수소를 5 ml 씩 30분 ~ 1시간 간격으로 가하였다.
- (라) 삼각플라스크 내 수분 및 여분의 과산화수소를 제거하기 위해서 전자레인지를 이용하여 가열하였다.
- (마) 수분이 제거된 시료에 각각 0.1 N HCl 10 ml 씩 넣고 5% Sodium hexamataphosphate 10 ml 을 가한 후 약 12시간 진탕시켰다.
- (바) 1000 ml 메스실린더에 시료를 모두 옮겨 담았고, 증류수를 채운 후 파라필름으로 입구를 막은 후 1분간 end-over-end로 흔든 후 방치하였다.
- (사) 해당 토성채취시간을 Stock's law 법으로 계산 한 후, 25 ml 피펫으로 10 cm 지점 에서 토양용액을 채취하였다.
- (아) 105 ℃ 로 예열된 오븐에서 건조시켰다.
- (자) 미국 농무성법에 따른 토성삼각도를 이용하여 분석한 토양의 토성을 결정하였다.

(12) 수분 보수력

- (가) 토양 시료를 용기에 넣고 증류수를 넣어 포화상태로 만들었다.
- (나) 시료를 압력 챔버 안에 넣고 하루 동안 1 m 고무관으로 자연 배수시켰다.
- (다) 자연배수 시킨 시료의 수분함량을 측정하였다.

(13) 용적밀도

- (가) 물리적으로 손상되지 않은 자연 상태의 토양 시료를 core can 에 딱 채웠다.
- (나) 토양 시료가 담긴 core can의 질량을 정확히 재었다.
- (다) core can에 담긴 토양 시료 25 g 을 취하여 평량병에 넣은 후 수분을 정량하였다.
- (라) 토양을 모두 제거한 빈 core can의 무게를 측정하여 core can 내의 토양의 무게를 산출 하였다.

(14) Bottom ash 강도

- (가) 비슷한 크기의 Bottom ash 를 선별하였다.
- (나) 경도계 (Daiki - Push-cone, A- 1214) 를 이용해 최대한 비슷한 힘과 속도로 토양입자가 파괴되기까지의 힘을 측정하였다.
- (다) 위 작업을 반복해 평균값을 구하였다.

(15) 미생물 바이오매스 (Chloroform Fumigation Extraction)

토양미생물 바이오매스 분석은 Chloroform Fumigation - Extraction 법을 따랐으며, 실험과정은 Fumigation 단계와 질소 및 탄소정량단계로 나누어 실시하였다.

(가) Chloroform을 처리하지 않은 동결 건조토양 8 g 을 50 ml 팔콘튜브에 담고 0.5 M  $K_2SO_4$  40 ml 를 가한 후 180 rpm 에서 1시간 동안 진탕하였다.

(나) 3000 rpm 에서 3분간 원심 분리한 후, Whatman No. 2 여과지로 여과하여 토양 시료를 추출하였다 (Unfumigation Extraction)

(다) 동결 건조한 토양 8 g 을 50 ml 비커에 담았다.

(라) 데시케이터 중판 위에 토양을 담은 50 ml 비커를 넣은 후, 데시케이터 뚜껑과 본체 접촉 부분에 그리스를 발라 공기가 새어나가지 않도록 하였다.

(마) 밸브들이 모두 닫혀있는지 확인한 후, -760 mmHg 아래까지 내려간 시점부터 2시간 동안 진공을 걸어주었다.

(바) 유리깔때기에 Chloroform 45 ml 를 넣고 Chloroform 주입 밸브를 서서히 열어 Chloroform 을 주입하였다. 이 때 전량을 주입하지 않고 주입 라인에 약 4 ~ 5 ml 정도 남겨 두어 데시케이터 내에 공기가 들어가지 않도록 하였다. 이 방법을 한번 더 반복하여 Chloroform 의 총량이 약 80 ml 가 되게 하였다.

(사) 데시케이터를 인큐베이터에 넣고 25 °C 에서 3일간 충분히 Fumigation 반응이 일어나도록 하였다.

(아) Fumigation 반응 기간이 끝난 후, 데시케이터 내의 Chloroform 이 들어있는 비커를 빼고, 토양 속에 있는 Chloroform 을 제거하기 위해 진공을 걸었다.

(자) Chloroform 처리한 토양 시료를 50 ml 팔콘튜브에 옮기고, 0.5 M  $K_2SO_4$  40 ml 씩 넣은 후 180 rpm 에서 1시간 동안 진탕하였다.

(차) 3000 rpm 에서 3분간 원심 분리한 후, Whatman No. 2 여과지로 여과하여 토양 시료를 추출하였다 (Fumigation Extraction)

(카) Unfumigation 한 토양 추출액과 Fumigation 한 추출액을 TOC Analyzer 로 분석하였다.

## 2. 연구결과

### 가. 공시 토양 및 Bottom ash 의 물리화학적.

공시 간척지 토양의 pH는 공시 일반 토양에 비하여 높은 수준으로 약염기 조건으로 측정되었다. EC (전기전도도) 의 경우에도 공시 간척지 토양이 더 높은 값을 나타냈다. 공시 일반토양의 토성은 미사질 양토로 CEC (양이온 치환 용량) 는  $3.99 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$  , 유효인, 암모니아태질소, 질산태 질소는 각각  $45.27 \text{ mg kg}^{-1}$  ,  $6.5 \text{ mg kg}^{-1}$  ,  $7.9 \text{ mg kg}^{-1}$  이 측정되었다 (표 65, 66, 67).

Bottom ash 의 경우, 공시 일반 토양보다는 높지만 공시 간척지 토양보다는 낮은 pH 값이 측정되었으며 EC 는  $1.145 \text{ ds m}^{-1}$  으로 공시 일반 토양보다 높게 측정되었다. 유효인 함량은

8.65 mg kg<sup>-1</sup> 로 낮은 수치였으며 T-P 함량은 145.03 mg kg<sup>-1</sup> 으로 나타났다. Bottom ash 의 CEC 는 0.1 cmol+ kg<sup>-1</sup> 로 측정되었으며, Hg 와 Zn 이 각각 22.64 mg kg<sup>-1</sup> 와 17.09 mg kg<sup>-1</sup> 로 비교적 높은 함량을 나타냈다 (표 61, 62).

표 65 공시 간척지 토양의 물리화학성

pH	EC(ds m <sup>-1</sup> )
8.54	0.18

표 66 공시 일반 토양의 물리화학성

pH	EC (ds m <sup>-1</sup> )	CEC (cmol+ kg <sup>-1</sup> )	Avail. P ----- mg kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> ----- mg kg <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> -----	토성
6.2	0.02	3.99	45.27	6.5	7.9	미사질양토

표 67 Bottom ash 의 물리화학성

pH	EC (ds m <sup>-1</sup> )	CEC (cmol+ kg <sup>-1</sup> )	Avail. P ---- mg kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> ----- mg kg <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> -----	용적밀도 (g cm <sup>-3</sup> )
7.89	1.145	0.1	8.65	6.52	8.12	

Bottom ash 의 물리화학성 (계속)

강도 (mm)	색	수분보수력 (% 0.1kpa <sup>-1</sup> )	T-P (mg kg <sup>-1</sup> )	K ----- cmol+ kg <sup>-1</sup>	Ca ----- cmol+ kg <sup>-1</sup>	Mg -----
3.2	5YR 4/1	8.66	145.03	0.025	0.05	0.13

Bottom ash 의 물리화학성 (계속)

Hg	As	Cd	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
----- mg kg <sup>-1</sup>							
22.64	0.4	0.03	0.58	0.16	1.34	6.44	17.09

나. Bottom ash 의 CO<sub>2</sub> 발생 저감 효과

(1) 혐기조건 (논토양 조건) 하에서 Bottom ash 의 CO<sub>2</sub> 발생 억제 효과

토양의 Bottom ash 처리 (그림 84, a) 는 CO<sub>2</sub> 방출량을 매우 뚜렷하게 감소시킴을 확인하였으며 이와 같은 CO<sub>2</sub> 저감효과는 처리 Bottom ash 처리량에 비례하여 증가하였다. 토양에 유기물을 처리한 후, CO<sub>2</sub> 방출량은 매우 높은 수준으로 증가하였고 (그림 87. b, c), 상대적으로 벗짚 시용구에서 가장 높은 CO<sub>2</sub> 플럭스가 측정되었다. 다량의 유기물이 투입되는 경우, Bottom ash의 CO<sub>2</sub> 저감 효과는 이에 비례하여 더욱 커지는 것으로 나타났다.

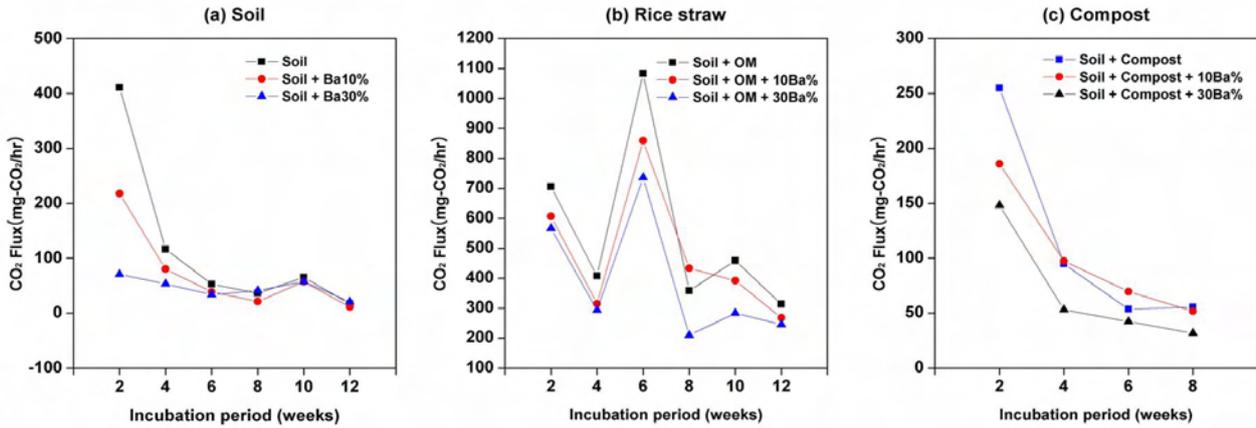


그림 87 혐기조건에서 유기자재 및 Bottom ash 처리에 따른 CO<sub>2</sub> 발생량. (a) 토양, (b) 볏짚, (c) 퇴비

(2) 호기 조건 (발토양 조건) 하에서 Bottom ash의 CO<sub>2</sub> 발생 억제 효과

호기 조건하에서도, 토양의 Bottom ash 처리는 CO<sub>2</sub> 방출량을 뚜렷하게 감소시킴을 확인할 수 있었는데(그림 88), Compost가 처리된 토양의 경우에는 약 10%의 Bottom ash 처리만으로도 충분한 토양안정화 효과가 있는 것으로 판단되었다.

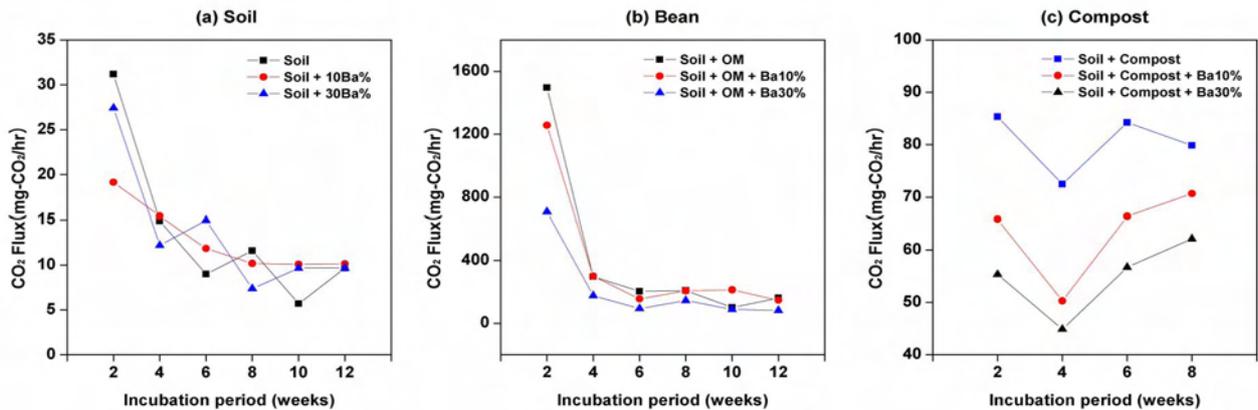


그림 88 호기조건에서 유기자재와 Bottom ash 처리에 따른 CO<sub>2</sub> 발생량. (a)토양, (b)콩, (c)퇴비

또한 녹비(콩)의 경우가 퇴비를 처리하는 경우보다 높은 수준의 CO<sub>2</sub> 방출량을 보였으며, 호기 조건의 토양에 다량의 유기물을 처리하는 경우에 Bottom ash의 CO<sub>2</sub> 저감 효과는 Bottom ash의 처리수준 및 발생 CO<sub>2</sub>의 양에 비례하여 저감효과가 커짐을 확인하였다.

다. Bottom ash 의 메탄 및 아산화 질소 발생 저감 효과

(1) 혐기조건 (논토양 조건) 하에서 Bottom ash 의 메탄 발생 억제 효과

CO<sub>2</sub> 의 경우와 마찬가지로, 유기물이 투입되지 않은 토양에 대한 Bottom ash 처리 (그림 89) 는 메탄 가스 방출량을 감소시키는 것으로 나타났으며, 이와 같은 메탄 발생 저감효과는 처리 Bottom ash 처리량에 비례하여 증가하였다. 토양에 유기물을 처리한 후의 메탄 가스 방출량은

매우 높은 수준으로 증가하였고, 다량의 유기물이 투입되는 경우, Bottom ash의 메탄 발생 억제 효과는 CO<sub>2</sub>에 비해 미미하였으며, 이는 Bottom ash가 메탄 생성균의 서식처 제공 및 접촉면적을 증가시키기 때문으로 사료된다. 유기물 투입량에 대한 효과 및 장기간에 걸친 Bottom ash의 메탄 발생 억제 효과 검증이 필요하다고 판단된다.

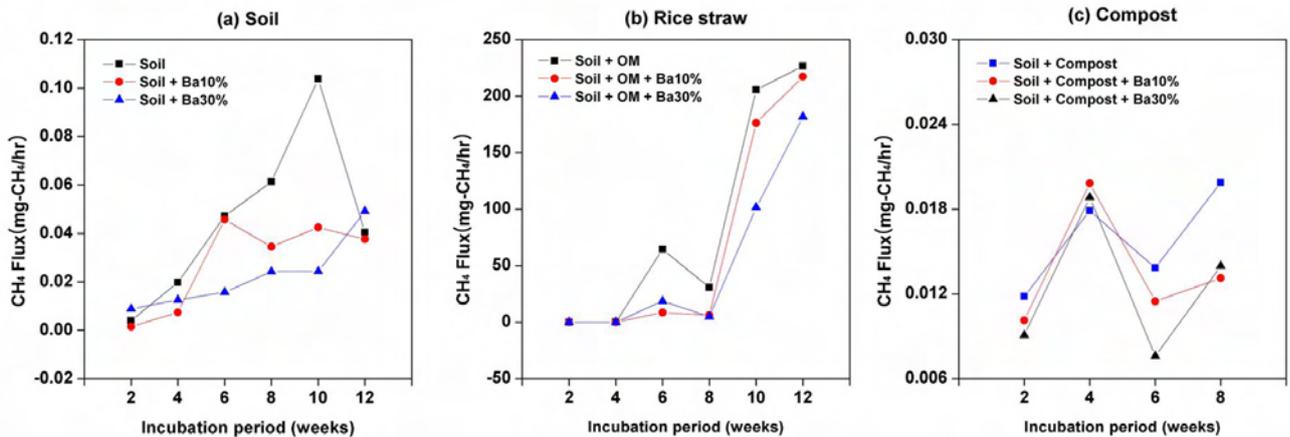


그림 89 혐기조건에서 유기자재 및 Bottom ash 처리별 메탄 발생량. (a)토양, (b)벼짚, (c)퇴비

(2) 호기조건 (발토양 조건) 하에서 Bottom ash의 메탄 발생 억제 효과

호기 조건에서는 혐기조건에 비해 메탄 발생량이 현저히 낮게 측정되었는데, 유기물이 투입되지 않은 토양에 대한 Bottom ash 처리 (그림 90)는 메탄 가스 방출량을 감소시킴을 확인하였고, 이와 같은 메탄 발생 저감효과는 처리 Bottom ash 처리량에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 또한 호기조건 토양에 유기물을 처리하더라도, 메탄 가스 방출량은 Bottom ash의 처리에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보였다.

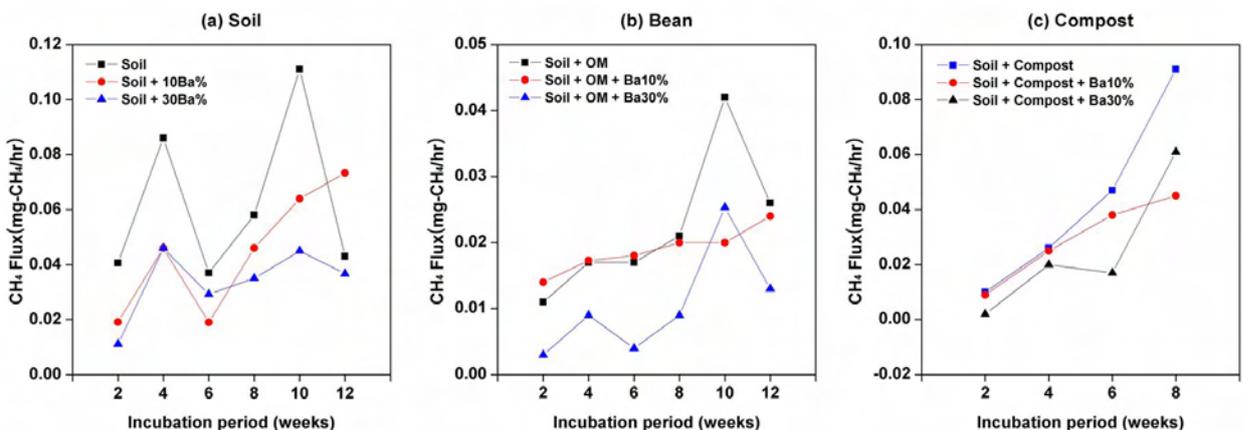


그림 90 호기조건에서 유기자재와 Bottom ash 처리에 따른 메탄 발생량. (a)토양, (b)콩, (c)퇴비

(3) 혐기조건 (논토양 조건) 하에서 Bottom ash의 아산화질소 발생 억제 효과

CO<sub>2</sub> 및 메탄 가스의 경우와 마찬가지로, 유기물이 투입되지 않은 토양에 대하여 Bottom ash 처리 (그림 88)는 아산화질소 방출량을 매우 뚜렷하게 감소시키는 것으로 나타났다. 이와 같은 아산화질소 발생 저감효과는 Bottom ash 처리량에 비례하여 증가함을 보였다. 토양에 유기물을 처리한 후의 아산화질소의 발생량은 매우 현저하게 감소하였는데, 이는 다량의 유기물 유입에 의한 토양질소의 부동화 및 아산화질소 발생에 관여하는 질산태 질소의 부족에 의한 것으로 여겨진다. 그리고 상대적으로 이분해성 유기물이 적은 퇴비 처리구의 경우가 볏짚 처리구에 비하여 비교적 높은 아산화질소 발생량을 보였다. 다량의 유기물이 투입되는 경우에 Bottom ash의 아산화질소 발생 저감 효과는 CO<sub>2</sub>와 메탄에 비해 저조하였으며, 이는 가용 질산태 질소, 토양의 전자수용체, 메탄생성 속도, 탈질 속도 등 매우 다양한 요인들이 함께 작용하기 때문으로 판단된다. 일반적으로 메탄 생성이 활발한 경우, Bottom ash의 아산화질소 발생 저감효과는 감소하는 것으로 관찰되었다.

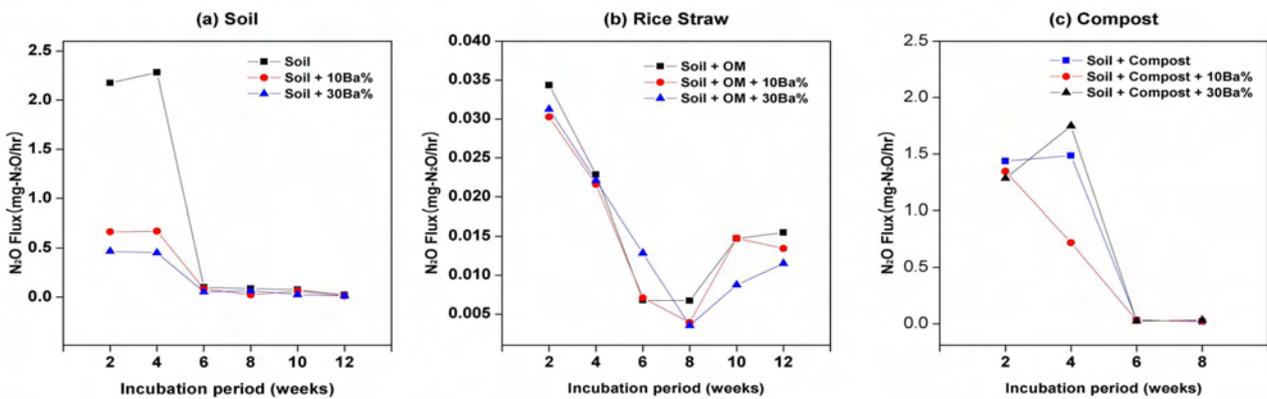


그림 91 혐기조건에서 유기자재 및 Bottom ash 처리별 아산화질소 발생량. (a)토양, (b)볏짚, (c)퇴비

#### (4) 호기조건 (발토양 조건) 하에서 Bottom ash의 아산화질소 발생 억제 효과

유기물이 투입되지 않은 토양에 대해 Bottom ash 처리 (그림 92)는 아산화질소 방출량을 매우 뚜렷하게 감소시킴을 확인하였고, 이와 같은 아산화질소 발생 저감효과는 처리 Bottom ash 처리량에 비례하여 증가하였다. 또한 상대적으로 이분해성 유기물이 적은 퇴비 처리구가 녹비 (콩) 처리구에 비하여 비교적 높은 아산화질소 발생량을 보였는데, 다량의 유기물이 투입되는 경우에 Bottom ash의 아산화질소 발생 저감 효과는 CO<sub>2</sub>와 메탄에 비하여 저조하였으며, 이는 가용 질산태 질소, 토양의 전자수용체, 메탄생성 속도, 탈질 속도 등 매우 다양한 요인들이 함께 작용하기 때문으로 판단된다. 일반적으로 메탄 생성이 활발한 경우, Bottom ash의 아산화질소 발생 저감효과는 감소하는 것으로 관찰되었다.

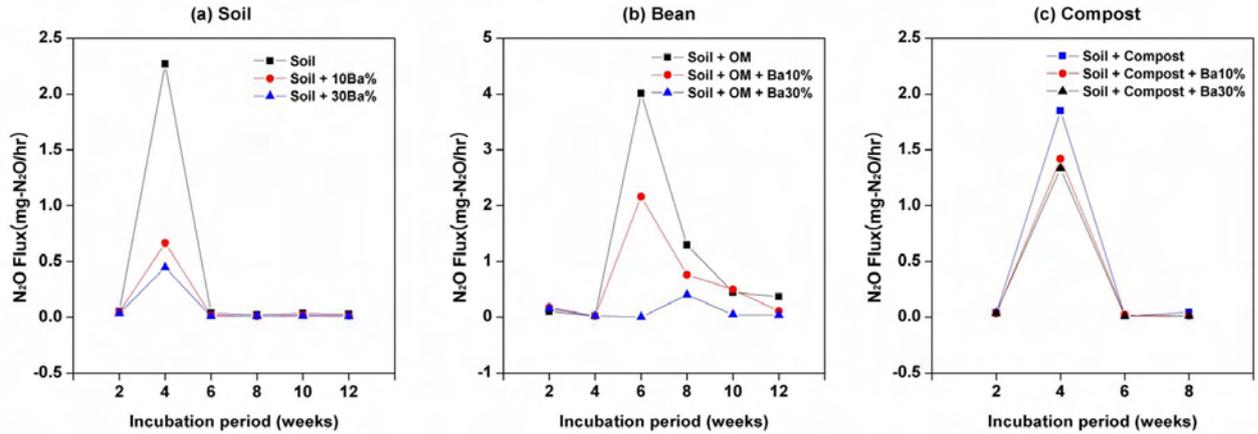


그림 92 호기조건에서 유기자재 및 Bottom ash 처리별 아산화 질소 발생량. (a)토양, (b)콩, (c)퇴비

라. Incubation 기간 중 총 Gas 발생량

(1) 혐기조건 (논토양 조건) 하에서 Bottom ash의 이산화탄소 발생 억제 효과

토양의 Bottom ash 처리는 CO<sub>2</sub> 발생량을 감소시키는데 CO<sub>2</sub> 발생량은 Bottom ash를 10% 처리에서 40%, Bottom ash를 30% 처리에서 66%가 감소됨을 확인하였다(표 62). 토양에 유기물을 처리한 시용구의 CO<sub>2</sub> 발생량은 897 g으로 모든 처리구 중 가장 높았으며, 이때 Bottom ash의 CO<sub>2</sub> 발생 저감 효과는 Bottom ash 10%처리에서 18%, Bottom ash 30%처리에서 38%의 CO<sub>2</sub> 발생이 감소되는 것으로 나타났다. 토양에 퇴비를 처리한 시용구의 경우 CO<sub>2</sub> 발생량은 241 g으로 처리구 중 가장 낮았지만, Bottom ash의 효과는 Bottom ash 10%처리에서 31%, Bottom ash 30%처리에서 62%의 감소율로 측정되어 CO<sub>2</sub> 발생 저감효과가 가장 우수함을 확인하였다. 이와 같은 CO<sub>2</sub> 저감효과는 처리 Bottom ash 처리량에 비례하여 증가하였다.

(2) 호기조건 (밭토양 조건) 하에서 Bottom ash의 이산화탄소 발생 억제 효과

호기 조건하에서도, 토양의 Bottom ash 처리효과는 Bottom ash 10%처리에서 25%, Bottom ash 30%처리에서 31%의 CO<sub>2</sub> 발생량을 뚜렷하게 감소시킴을 확인하였다(표 62). 녹비 (콩)의 경우에는 588 g, 퇴비를 처리하는 경우에는 112 g으로 녹비 (콩)의 경우가 더 높은 수준의 CO<sub>2</sub> 방출량을 보였다. 호기 조건의 토양에 다량의 유기물을 처리하는 경우, Bottom ash의 효과는 Bottom ash 10%에서 6%, Bottom ash 30%에서 46%의 CO<sub>2</sub> 저감효과를 확인하였음.

(3) 혐기조건 (논토양 조건) 하에서 Bottom ash의 메탄 및 아산화질소 발생 억제 효과

유기물이 투입되지 않은 토양에 대해 Bottom ash 처리는 Bottom ash 10%일 때 44%, Bottom ash 30%일 때 66%의 메탄가스 저감효과가 있는 것으로 측정되었다(표 64). 토양에 유기물을 처리한 후, 메탄가스의 발생량은 141g으로 매우 높은 수준으로 증가하였으며, 일반적으로 다른 처리구에 비해 메탄가스의 발생량이 높은 볏짚 처리구의 경우, 아산화질소의 발생량은 705mg으로 다른 처리구에 비해 낮은 것으로 관찰되었다.

유기물이 투입되지 않은 토양의 Bottom ash 처리에서는 아산화질소 방출량이 Bottom ash 10% 처리에서 68%, Bottom ash 30% 처리에서 78%로 저감되었는데, 이로 인해 Bottom ash의 아산화질소 저감효과가 이산화탄소와 메탄가스보다 더 높은 것으로 확인되었다. 토양에 유기물을 처리한 경우 아산화질소의 발생량은 705 mg 으로 유기물을 처리하지 않은 토양에 비해 매우 현저하게 감소하였는데, 이는 다량의 유기물 유입에 의한 토양질소의 부동화, 및 이에 의한 아산화질소 발생에 관여하여 질산태 질소의 부족에 의한 것으로 여겨진다. 아산화질소의 발생량은 상대적으로 이분해성 유기물이 적은 퇴비 처리구의 경우 1581 mg , 볏짚 처리구의 경우 705 mg 으로 퇴비 처리구가 볏짚 처리구에 비하여 비교적 높은 아산화질소 발생량을 보였다.

(4) 호기조건 (발토양 조건) 하에서 Bottom ash의 메탄 및 아산화질소 발생 억제 효과  
 메탄 발생량은 호기조건 (발토양 조건) 에서 126 mg, 혐기조건 (논토양 조건) 에서 92 mg으로 호기조건이 혐기조건보다 메탄 발생량이 더 높은 것으로 나타났다 (표 68). 또 상대적으로 이분해성 유기물이 적은 퇴비 처리구의 경우 70 mg , 녹비 (콩) 처리구의 경우 52 mg 으로 퇴비 처리구가 녹비 처리구에 비하여 비교적 높은 메탄 발생량을 보였다.

유기물이 투입되지 않은 토양에 대해 Bottom ash 처리는 Bottom ash 10%처리에서 68%, Bottom ash 30%처리에서 78%의 아산화질소 발생량 저감효과를 보였으며, 아산화질소의 발생량은 상대적으로 이분해성 유기물이 적은 퇴비 처리구의 경우 664 mg, 녹비 (콩) 처리구의 경우 2042 mg 으로 퇴비 처리구가 녹비 (콩) 처리구에 비해 비교적 낮은 아산화질소 발생량이 측정되었다.

표 68 Gas 총 발생량 비교

	논 토 양						발 토 양					
	CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O		CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	
	g	감소율 (%)	mg	감소율 (%)	mg	감소율 (%)	g	감소율 (%)	mg	감소율 (%)	mg	감소율 (%)
Soil	296		92		1929		42		126		826	
Soil+BA10%	175	-41	51	-44	612	-68	31	-25	71	-44	264	-68
Soil+BA30%	101	-66	32	-66	432	-78	29	-31	57	-55	179	-78
Soil+OM	1098		141974		705		588		52		2042	
Soil+OM+BA10%	897	-18	103296	-27	231	-67	553	-6	32	-38	1223	-40
Soil+OM+BA30%	680	-38	74785	-47	169	-76	320	-46	18	-66	206	-90
Soil+Compost	241		19		1581		112		70		664	
Soil+Compost+BA10%	166	-31	16	-18	948	-40	81	-28	38	-45	508	-40
Soil+Compost+BA30%	92	-62	10	-47	849	-46	74	-35	32	-54	473	-46

마. 혐기 조건에서 Bottom ash 처리에 의한 온난화가스 발생 및 토양화학성 변화 모니터링

(1) CO<sub>2</sub> 발생량과 토양 pH, EC 와의 상관관계

유기물을 처리하지 않은 경우 (그림 93. a), 시간이 경과함에 따라 이산화탄소의 발생량이 점차 감소하는 경향이 있었고, 이에 따른 토양 pH 및 EC의 변화는 크지 않았으나, 유기물처리구의 경우에는 (그림 93. b), 이산화탄소 발생량이 급격히 증가하여 항온 배양 6주 후 최대 발생량을 보였다. 이에 비례하여 pH 는 감소하였고, 토양 EC 는 증가하는 것을 확인하였다. Bottom ash 처리수준에 따라서는 CO<sub>2</sub> 발생량은 유의미하게 감소하였으며, 토양 pH 는 Bottom ash 처리 수준에 따라 상승하는 경향이 있었고 토양 EC 의 경우 유의미한 변화는 없었다.

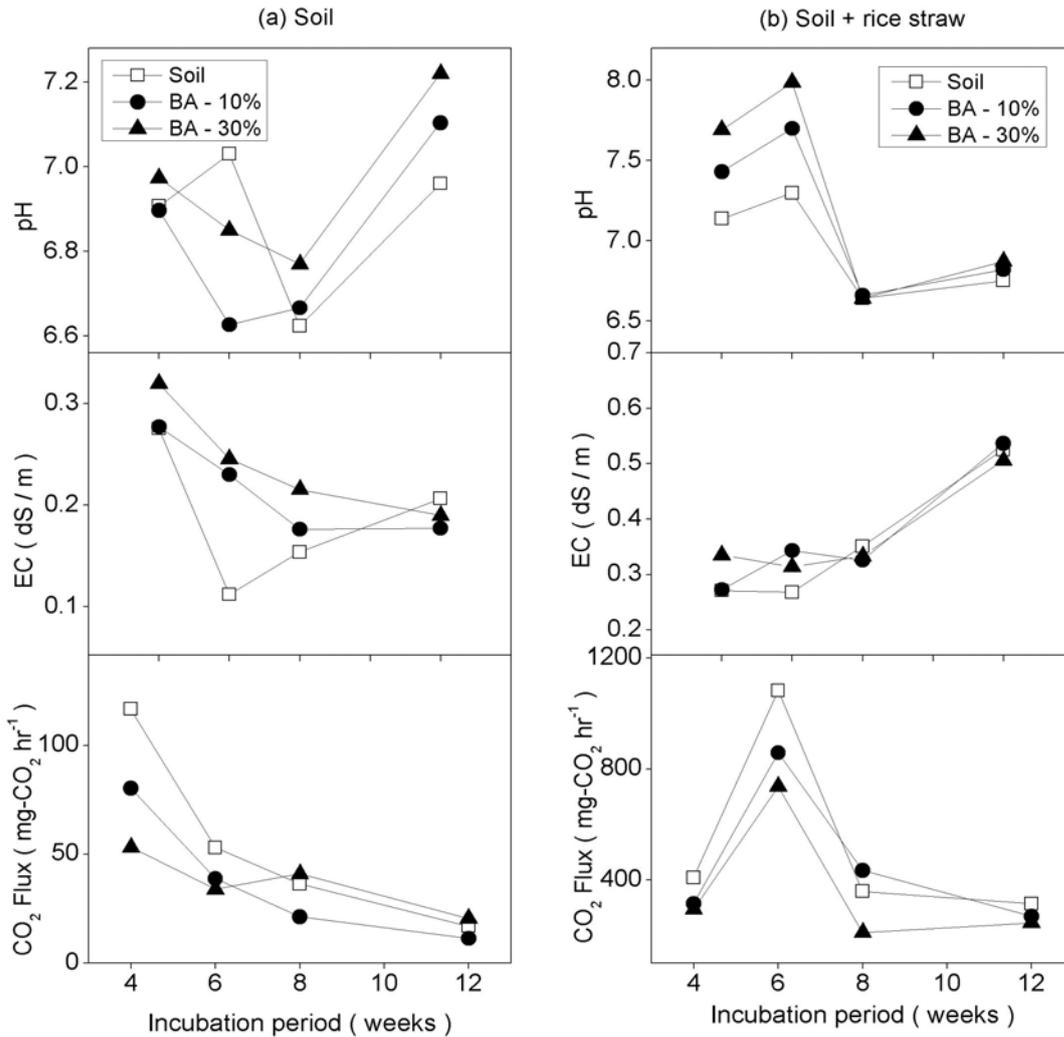


그림 93 혐기조건 (논토양 조건) 하에서 CO<sub>2</sub> 발생량과 pH, EC 와의 상관관계

(2) 혐기 조건 (논토양 조건) 에서 CO<sub>2</sub> 발생량과 무기태 질소 함량과의 상관관계

유기물을 처리하지 않은 경우 (그림 94. a), 토양 중 무기태 질소 (암모니아태, 질산태) 함량은 뚜렷한 경시적인 변화를 보이지 않았으며, Bottom ash 처리 수준 간에도 유의미한 차이가 발견되지 않았다. 그러나 유기물을 처리한 경우 (그림 94. b)에는 CO<sub>2</sub> 발생량이 최대인 시점을 지나서 토양 중 무기태 질소의 함량이 급격히 증가하는 경향이 있었고, 이는 투입된 유기물의 분해에 따른 암모니아태 질소, 질산태 질소의 공급이 이루어진 것으로 여겨진다. 이 후,

지속적인 미생물 체내의 동화로 인해 토양 중 무기태 질소의 함량은 감소하는 경향을 보였다. 전반적으로 Bottom ash 처리 수준 간에는 유의한 차가 없었고, 실험 전 기간에 걸쳐 질산태 질소 함량은 낮은 수준을 보였다.

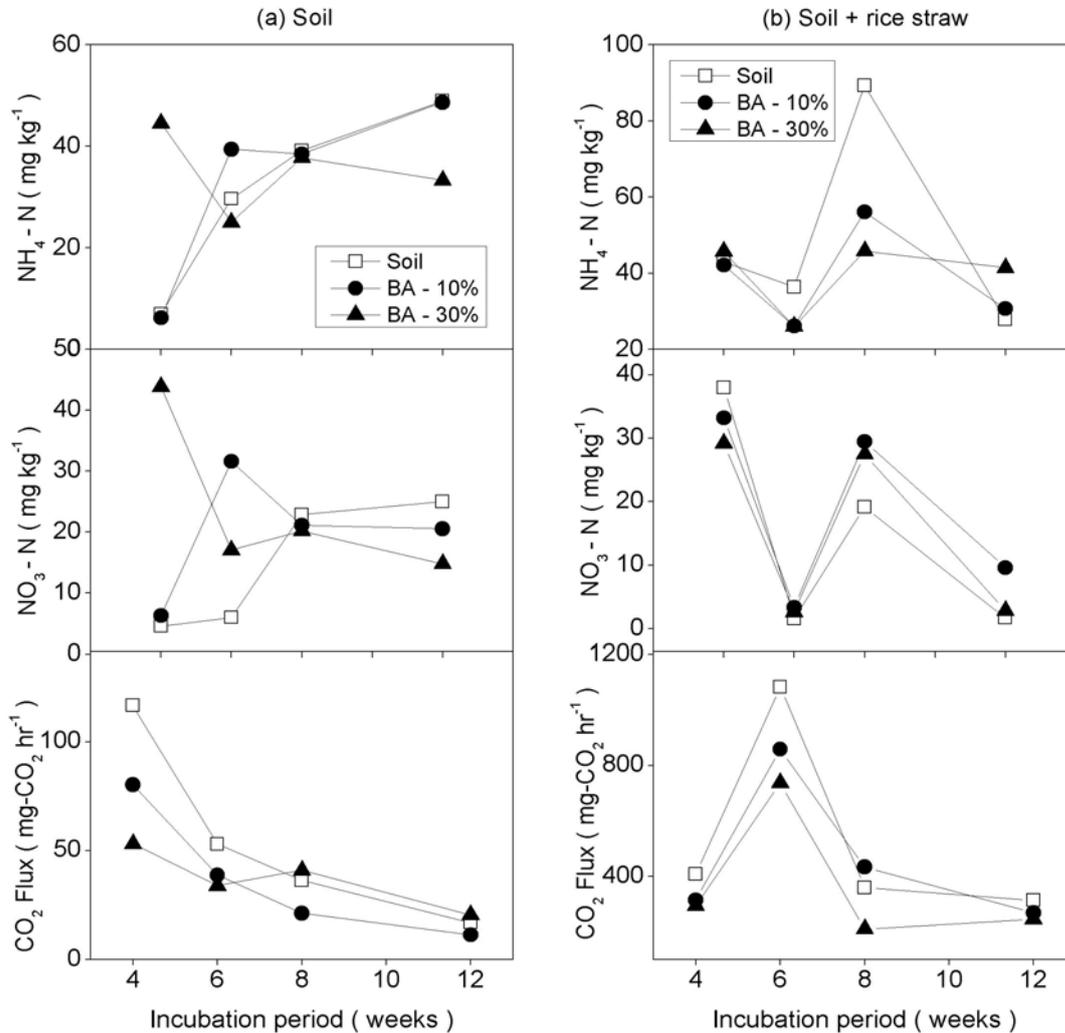


그림 94 논토양 에서 CO<sub>2</sub> 발생량과 무기태 질소 함량과의 상관관계

(3) 혐기 조건 (논토양 조건) 하에서 CO<sub>2</sub> 발생량과 토양 유효인 함량과의 상관관계  
 유기물을 처리하지 않은 경우 (그림 95. a) 에는 토양의 환원 상태가 발달함에 따라 이산화탄소 발생량은 서서히 감소하지만, 유효인 함량 및 메탄의 flux가 미세하게 증가하는 경향이 있었다. 그러나 Bottom ash 처리 수준에 따른 유효인 함량의 변화나 메탄 발생량 간에는 유의한 상관관계가 없었다. 유기물을 처리한 경우(그림 95. b) 는, 유기물이 분해됨에 따라 CO<sub>2</sub> flux 및 유효인 함량은 무기태 질소 함량과 마찬가지로 최대 이산화탄소 발생량 이후에 증가하는 경향이 보였고 이후 CO<sub>2</sub> 발생량이 줄어들며 메탄 flux 가 증가하는 경향을 보였으며, 유효인 함량은 감소하였는데, 이는 토양 중 미생물의 인 동화에 의해 감소한 것으로 여겨진다. 이산화탄소와 메탄의 발생량은 Bottom ash 처리 수준에 비례하여 감소하는 경향을 보였으며, 유효

인 함량 또한 이에 비례하여 다소 높게 측정되었다.

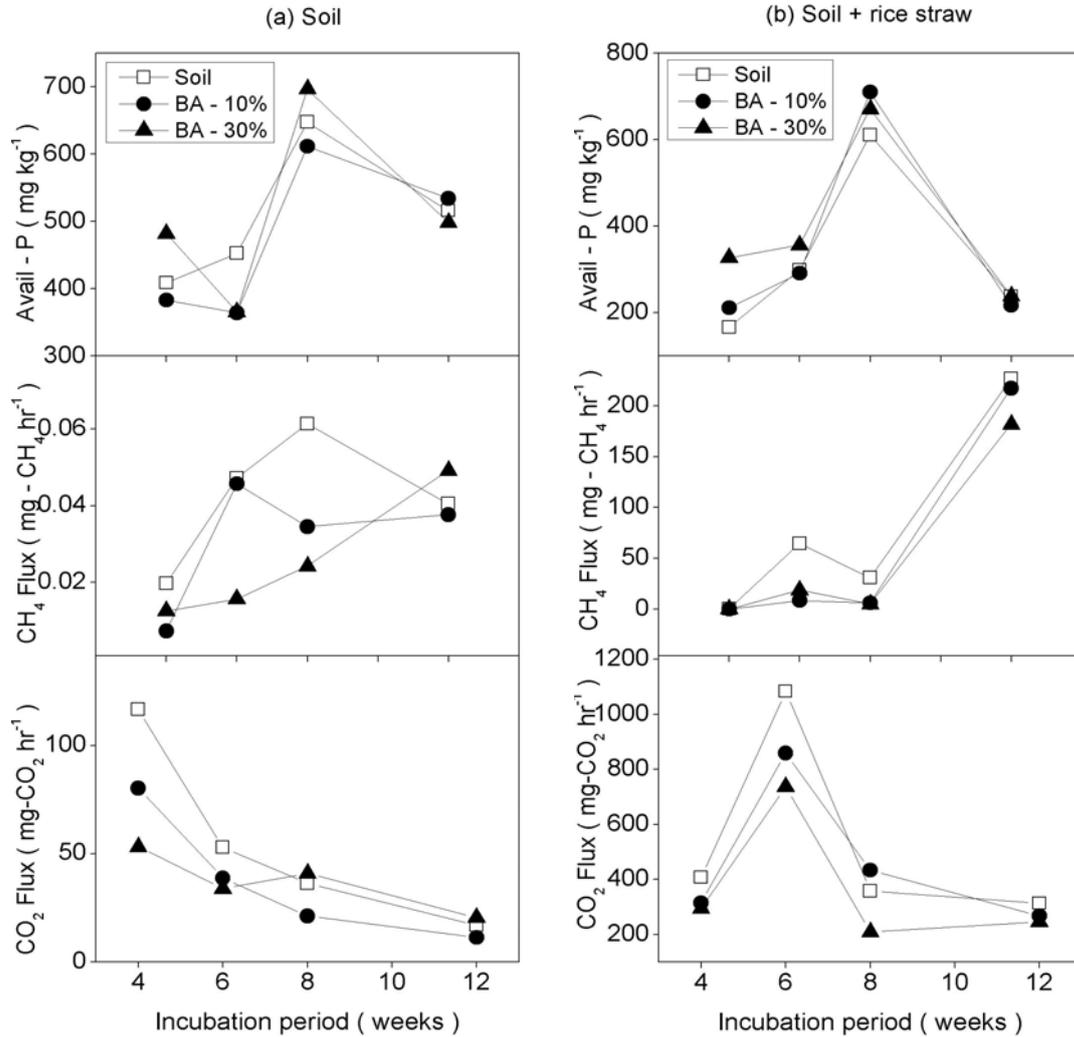


그림 95 논토양에서 CO<sub>2</sub> 발생량과 토양 유효인 함량과의 상관관계

바. 호기 조건에서 Bottom ash 처리에 의한 온난화가스 발생 및 토양화학성 변화 모니터링

(1) 호기 조건 (발토양 조건) 에서의 CO<sub>2</sub> 발생량과 pH, EC 와의 상관관계

유기물을 처리하지 않은 경우 (그림 96. a) 에는 이산화탄소 발생량이 적었고, 토양의 pH 및 EC 의 경시적인 변화는 보이지 않았으나, 유기물을 처리한 경우 (그림 96. b) 에는 토양 pH 및 EC 값이 모두 높게 측정 되었으며, 시간이 경과함에 따라 유기물이 분해되어 토양 pH 는 감소하고 EC 는 증가하는 경향을 보였다. 또한 Bottom ash 처리수준이 증가함에 따라 이산화탄소의 flux가 감소하는 경향을 나타내었다.

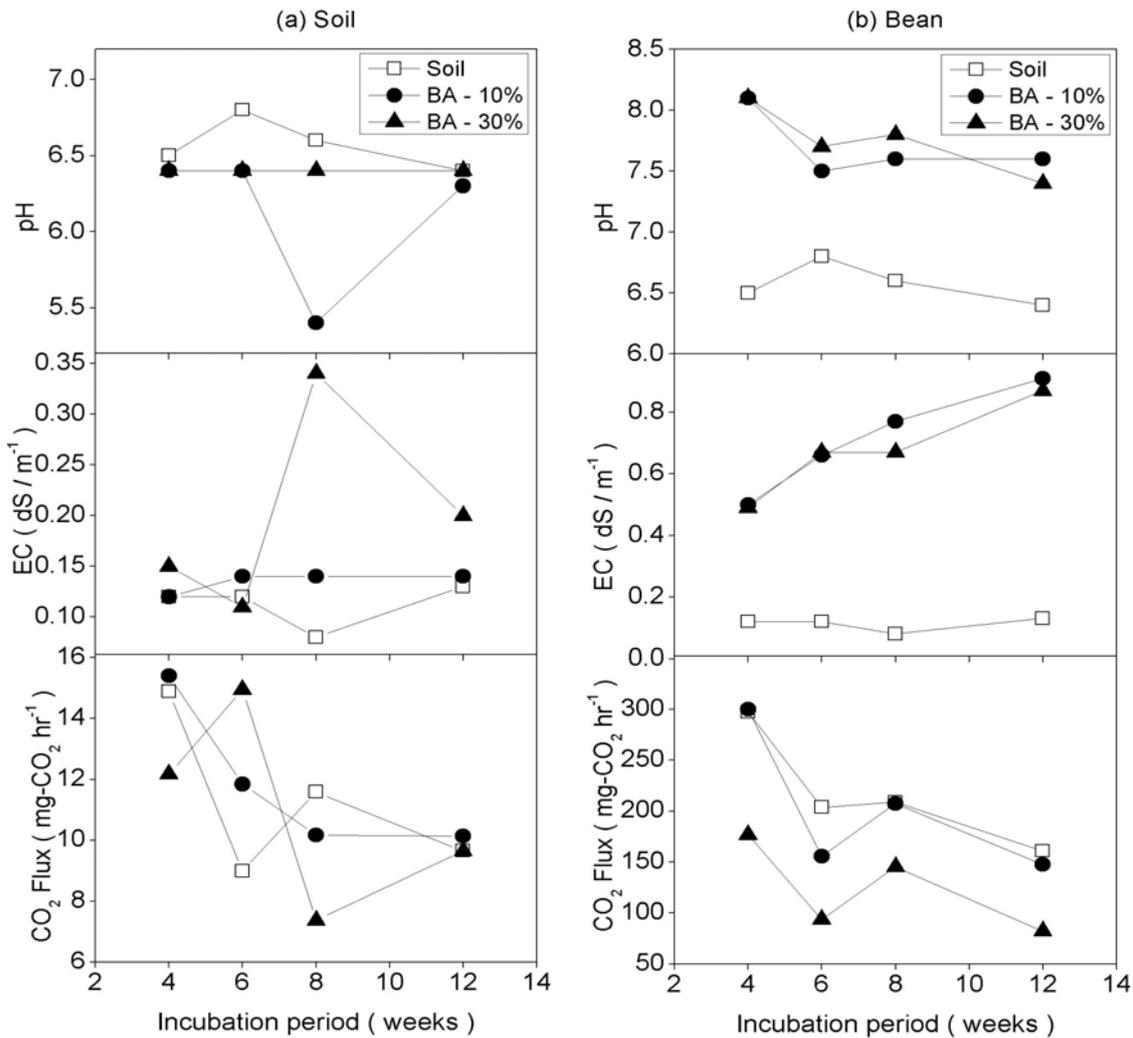


그림 96 발토양에서의 CO<sub>2</sub> 발생량과 pH, EC 와의 상관관계

(2) 호기 조건 (발토양 조건) 에서의 CO<sub>2</sub> 발생량 및 무기태질소 함량과의 상관관계

유기물을 처리하지 않은 경우 (그림 97. a) 와 유기물을 처리한 경우 (그림 94. b) 모두 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소함에 따라 암모니아태 질소의 함량이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 반면 질산태 질소의 함량은 증가 되었는데, 이는 호기조건의 발토양에서 일어나는 질산화 반응에 의한 것으로 사료된다. 또한 유기물을 처리한 경우 처리하지 않은 경우 보다 질산태 질소의 함량 수준이 높게 측정되었는데, 이는 투입된 유기물이 분해되어 그 함량의 수준이 높게 나타난 것으로 사료된다. 또한 유기물을 처리한 경우, 이산화탄소 발생량은 Bottom ash 처리 수준에 비례하여 감소되었다.

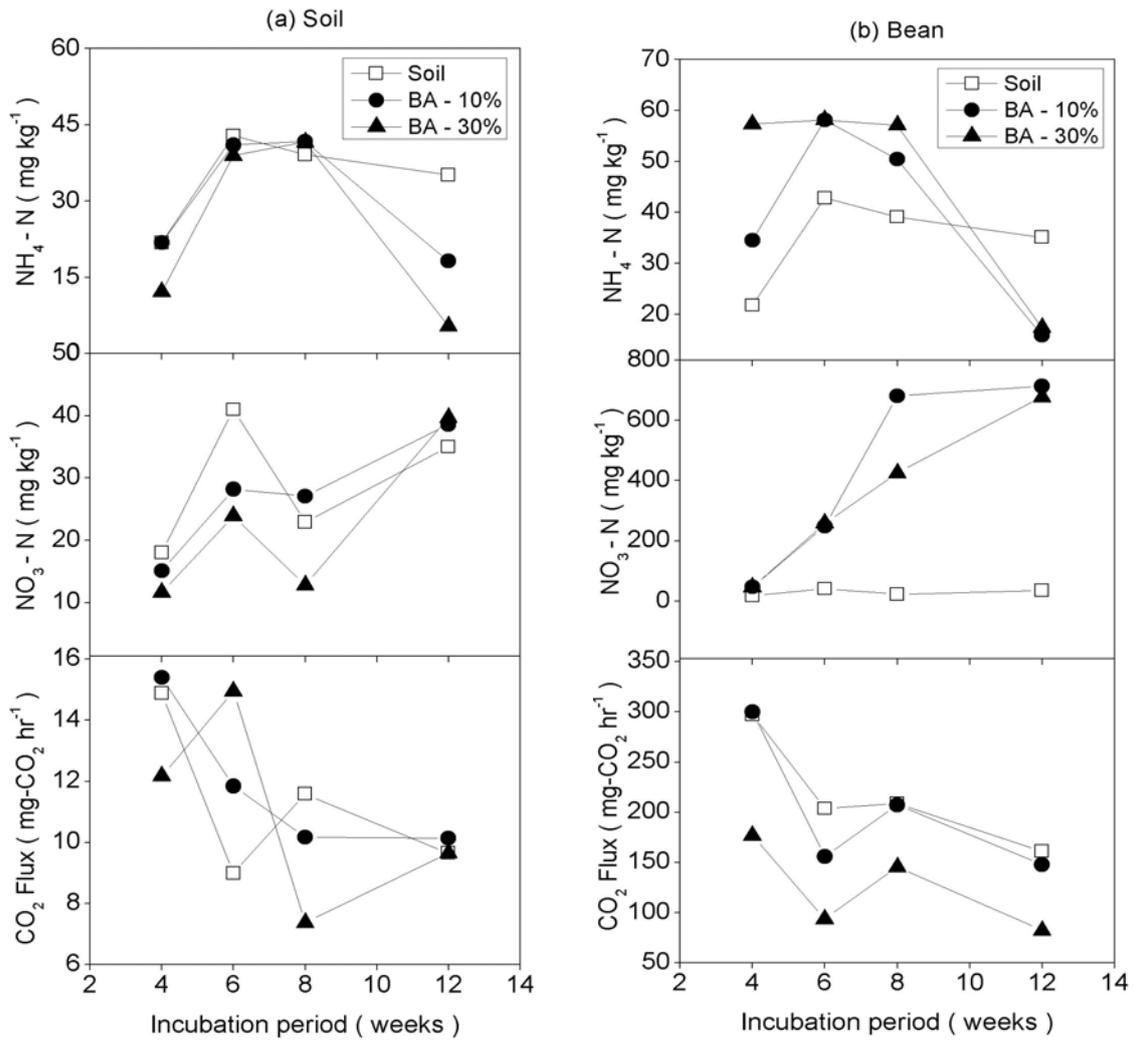


그림 97 발토양에서  $\text{CO}_2$  발생량 및 무기태질소 함량과의 상관관계

(3) 호기 조건 (발토양) 에서  $\text{CO}_2$  발생량과 토양 유효인 함량과의 상관관계

유기물을 처리하지 않은 경우 (그림 98. a)와 유기물을 처리 한 경우 (그림 98. b) 모두 메탄 flux가 증가함에 따라 유효인 함량이 감소되는 경향을 보였다. 유기물을 처리한 경우에는 이산화탄소 발생량이 감소함에 따라 메탄 발생량이 증가되었고 Bottom ash 처리 수준이 증가함에 따라 이산화탄소와 메탄 발생량은 감소하였다.

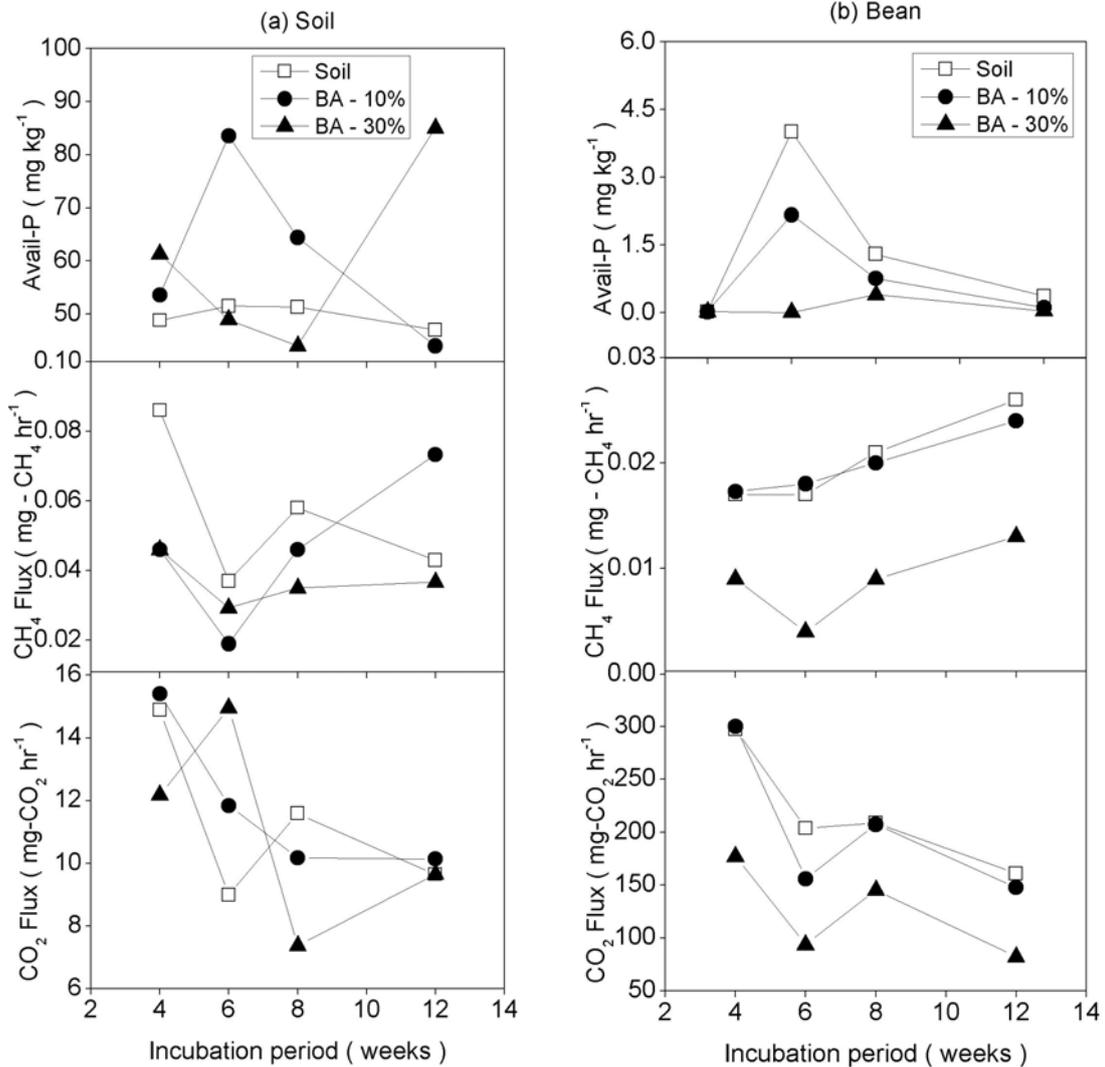


그림 98 발토양에서 CO<sub>2</sub> 발생량과 토양 유효인 함량과의 상관관계

사. 호기성 및 혐기성 조건에서의 Bottom ash 처리에 따른 CO<sub>2</sub> 발생저감효과와 미생물 생체량 변화간의 상관관계

혐기성 조건의 토양에서 Bottom ash 를 처리하지 않은 경우에는 CO<sub>2</sub> 발생량이 296g, 10% 처리 했을 경우에는 175g, 30% 처리 했을 경우에는 101g 으로 Bottom ash 처리에 의하여 약 2.5배 CO<sub>2</sub> 발생저감효과를 나타냈다(표 69). 이에 Bottom ash 처리수준에 비례하여 저감효과는 증가 되는 것으로 나타났다. 혐기성 조건의 토양에서 유기물을 처리한 경우에서도 위와 마찬가지로 Bottom ash 처리수준이 증가함에 따라 저감효과가 증가되는 것으로 나타났다. 혐기성 조건에서의 미생물 생체량은 Bottom ash 처리에 따라 최대 92% 증가되었고, CO<sub>2</sub> 발생량이 감소함에 따라서도 미생물 생체량은 증가되는 경향을 보였다.

호기성 조건의 토양에서는 CO<sub>2</sub> 감소율은 Bottom ash 수준이 증가함에 따라 최대 2배까지 저감

되는 효과를 나타냈다. 이는 절대적이지 않지만 미생물 생체량이 증가됨에 따라서 CO<sub>2</sub> 발생량 또한 감소되는 것으로 사료된다. 이를 통해 CO<sub>2</sub> 발생 저감과 미생물 생체량과는 상관관계가 있는 것으로 보여지고, Bottom ash 처리 수준이 증가될수록 일반적으로 미생물 생체량은 증가되는 것으로 확인되었다. 이는 Bottom ash 가 다공성 매질이기 때문에 미생물이 서식할 수 있는 공간을 제공하기 때문으로 여겨진다.

표 69 호기성 및 혐기성 조건에서의 CO<sub>2</sub> 발생저감효과와 미생물 생체량

처리구	Anaerobic			Aerobic		
	CO <sub>2</sub>	Biomass	mg C 100g Soil <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub>	Biomass	mg C 100g Soil <sup>-1</sup>
	g			감소율 (%)		
Soil	296		1409.3	42		-
Soil+BA10%	175	-41	2230.8	31	-25	-
Soil+BA30%	101	-66	16059.2	29	-31	-
Soil+OM	1098		1702.2	588		24530.4
Soil+OM+BA10%	897	-18	5069.5	553	-6	35269.9
Soil+OM+BA30%	680	-38	22258.6	320	-46	18546.2

아. 화석연료 부산물 및 유기물 처리에 따른 일반 밭 토양에서의 온난화가스 방출 저감 효과 규명

(1) 재료 및 방법

(가) 종류별 Bottom ash 선별 및 처리구 조성

Bottom ash 는 pH 및 EC 를 기준으로 서천, 당진, 보령 화력발전소에서 생성된 4 종류를 선정하였고, 처리수준은 토양 무게를 기준으로 각각 토양 무게의 10%, 30%로 처리하였다. 공시토양은 충북대 교내 식생지 근권토양을 채취하였다. Bottom ash 의 종류 및 처리수준에 따른 온난화가스 발생량을 측정하기 위해 처리된 유기자재는 녹비작물 (헤어리베치 (C/N 비 11), 청보리(C/N 비 28)) 2 종류와 유기질비료 (유박 (C/N 비 10)) 1종류 총 3종류로 하였다. 처리수준은 탄소기준으로 0.5%로 하였으며, 처리구는 다음 표 7 같다.

(나) 고속항온배양장치

Bottom ash 종류에 따른 CO<sub>2</sub> 발생량을 측정하기 위하여 고속항온배양장치를 실험실에서 자체적으로 제작하여 실시간으로 CO<sub>2</sub> 발생량을 측정 하였다. 고속항온배양장치는 실험시작 시 부터 종료까지 3시간에 한번씩 2분 동안 분석하였다. 항온수조의 온도는 38℃로 유지하였고, 분석시 유량은 1 L min<sup>-1</sup> 으로 하였다.

표 70 향온배양실험 처리구

처리구
Soil + 헤어리베치, Soil + 청보리, Soil + 유박비료
Soil + Bottom ash 10% (당진) + 헤어리베치
Soil + Bottom ash 30% (당진) + 헤어리베치
Soil + Bottom ash 10% (보령) + 헤어리베치
Soil + Bottom ash 30% (보령) + 헤어리베치
Soil + Bottom ash 10% (서천) + 헤어리베치
Soil + Bottom ash 30% (서천) + 헤어리베치
Soil + Bottom ash 10% (당진) + 청보리
Soil + Bottom ash 30% (당진) + 청보리
Soil + Bottom ash 10% (보령) + 청보리
Soil + Bottom ash 30% (보령) + 청보리
Soil + Bottom ash 10% (서천) + 청보리
Soil + Bottom ash 30% (서천) + 청보리
Soil + Bottom ash 10% (당진) + 유박 비료
Soil + Bottom ash 30% (당진) + 유박 비료
Soil + Bottom ash 10% (보령) + 유박 비료
Soil + Bottom ash 30% (보령) + 유박 비료
Soil + Bottom ash 10% (서천) + 유박 비료
Soil + Bottom ash 30% (서천) + 유박 비료

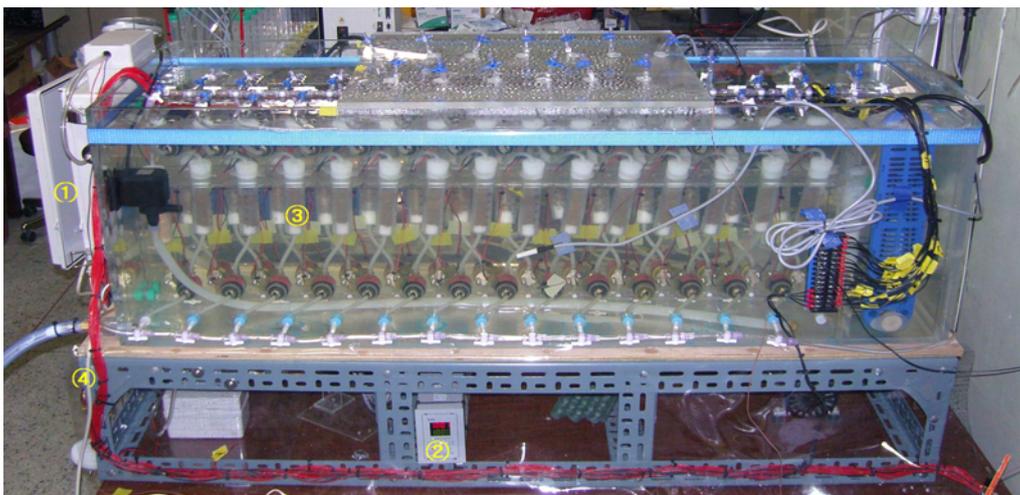


그림 99 고속향온배양장치 전체 모습.

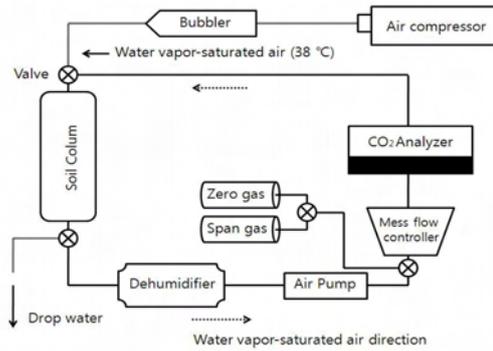


그림 100 고속항온배양장치 구성도.

Air compressor 에서 나오는 Air 를 Bubbler 를 통하여 수분으로 포화시키고 38°C의 Air 를 토양컬럼으로 공급하였다. 토양컬럼을 빠져나온 Air 는 Dehumidifier 에 의하여 수분을 제거 되고, Mess flow controller 에 의하여 일정한 유량이 CO<sub>2</sub> Analyzer 에 공급되어 CO<sub>2</sub> 발생량을 측정 하는 장치이다(그림 99, 100).

## (2). 연구결과

### 가. 종류별 Bottom ash 와 공시토양의 물리화학적

공시토양의 경우 pH 가 8.1 정도 였으며, EC 는 0.1 로 낮은 수준으로 측정되었다. 암모니아 태 질소는 10.7 mg kg<sup>-1</sup>, 질산태 질소는 22.6 mg kg<sup>-1</sup> 수준으로 나타났다(표 72). 유효인의 경우 394.4 mg kg<sup>-1</sup> 로 다소 높은 수준으로 나타났다. 토성은 양토로 측정되었다.

Bottom ash 의 pH 는 8 ~ 9 사이로 지역에 따라 다양한 수준으로 나타났고, EC 또한 Bottom ash 의 지역별로 다양한 수준을 나타냈으며, 보령에서 생성된 Bottom ash 가 가장 높았다(표 73). 유효인 함량 또한 생성 지역별로 차이가 크게 측정되었다. 암모니아태 질소와 질산태 질소는 지역에 상관없이 낮은 수준으로 나타났다.

표 72 공시 토양의 물리화학적.

pH	EC (ds m <sup>-1</sup> )	Avail. P (mg kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	토성
8.1	0.10	394.4	10.7	22.6	양토 (loam)

표 73 Bottom ash의 화학성

	pH	EC (ds m <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Avail. P (mg kg <sup>-1</sup> )
당진	8.0	0.16	5.1	1.9	297.6
보령	7.8	1.37	-	3.4	749.3
서천A	9.0	0.53	2.0	1.2	502.9
서천B	8.4	0.78	1.9	1.6	274.2

(마) Bottom ash 의 종류 및 처리수준이 토양처리 녹비작물 및 유기질비료의 CO<sub>2</sub> 발생에 미치는 영향 평가

(1) 녹비작물 (헤어리베치) 시용에 따른 Bottom ash 종류 별 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

서천-A BA (Bottom ash) 의 경우 헤어리베치와의 혼합시용에서 10%, 30% 모두 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소되는 것으로 나타났다. 하지만 10% 처리와 30% 처리간의 뚜렷한 차이는 없는 것으로 나타났다 (그림 101. a). 서천-B BA 는 헤어리베치와의 혼합시용에서 대조구와 비슷한 CO<sub>2</sub> 발생량을 보였다 (그림 101. b).

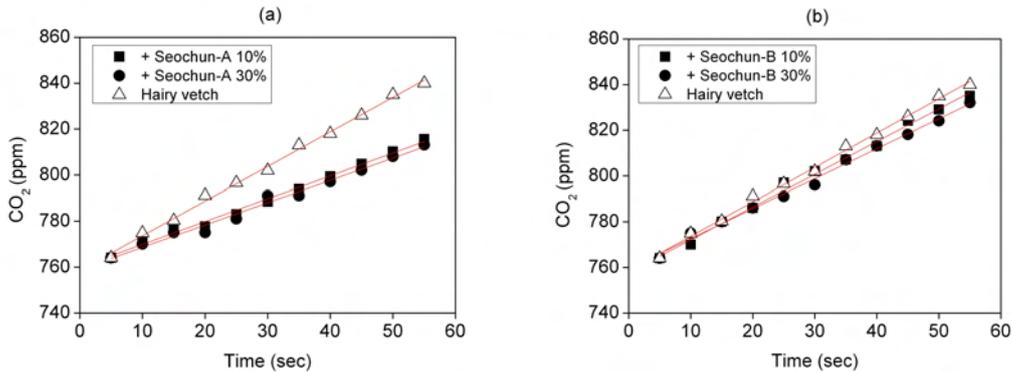


그림 101 서천 화석연료 부산물간의 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

당진 BA 의 경우 10% 처리에서 CO<sub>2</sub> 발생량은 대조구와 비슷한 수준으로 나타났으나, 30% 처리구에서는 발생속도가 뚜렷히 감소된 것으로 나타났다 (그림 202. c). 보령 BA 는 10%, 30%처리 모두 대조구보다 CO<sub>2</sub> 발생량이 낮은 것으로 나타났다 (그림 102. d). 종류 별 Bottom ash 와 헤어리베치와의 혼합시용에서는 보령 BA 와 서천-A BA 의 CO<sub>2</sub> 발생량이 대조구보다 낮음을 확인하였다. 또한, 비교적 BA 10% 보다 BA 30% 처리에서 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소하는 것으로 보아 10% 처리보다 30% 처리가 CO<sub>2</sub> 발생 저감에 있어서 더욱 이점이 있다고 판단되었다.

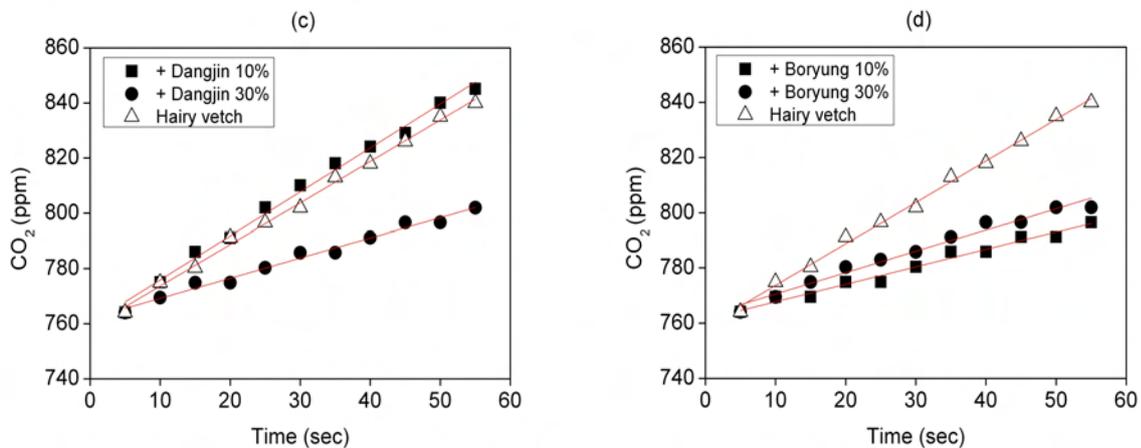


그림 102 당진, 보령 화석연료 부산물간의 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

(2) 녹비작물 (청보리) 시용에 따른 Bottom ash 종류별 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

서천-A BA 의 경우 10% 처리에서의 CO<sub>2</sub> 발생량은 대조구와 비슷한 수준으로 나타났다. 서천-B BA 의 경우 도 서천-A BA 와 같이 비슷한 수준으로 나타났다 (그림 103. a). 서천-A, 서천-B BA 모두 30%처리에서 CO<sub>2</sub> 발생량이 대조구보다 낮은 것으로 확인되었다 (그림 103. b). 이는 위의 결과와 같이 10% 처리보다 30% 처리가 CO<sub>2</sub> 발생저감 효과에 이점이 있음을 나타내는 것이라 판단되었다.

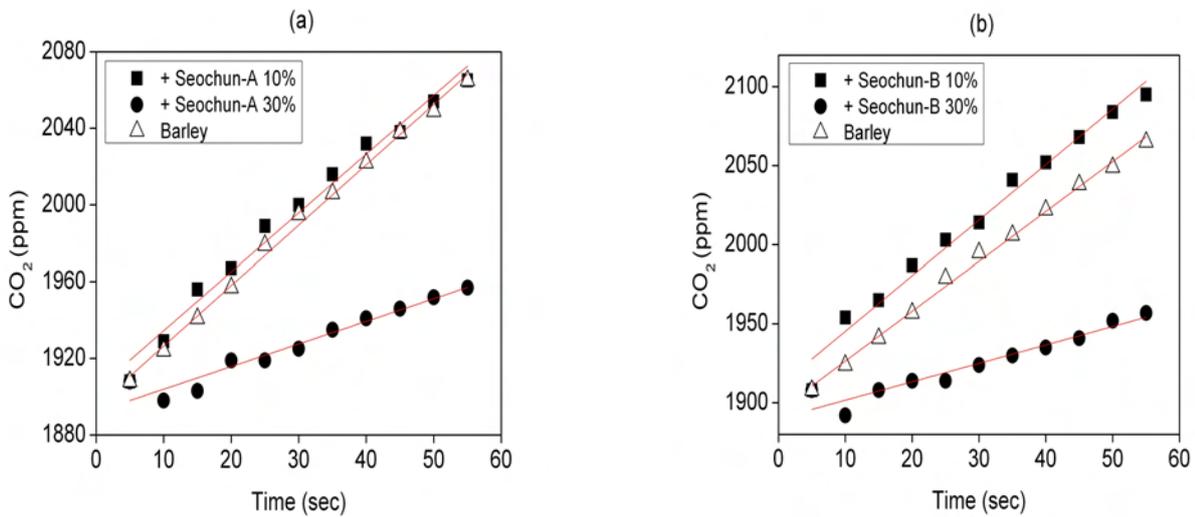


그림 103 서천 화석연료 부산물간의 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

당진 BA 와 보령 BA 모두 청보리 혼합시용에서 대조구보다 CO<sub>2</sub> 발생량이 낮은 것으로 확인 되었다 (그림 104. c). 아래 결과와 같이 청보리 혼합시용에서도 Bottom ash 30% 처리는 뚜렷하게 CO<sub>2</sub> 발생량이 대조구보다 낮은 것으로 확인되어 CO<sub>2</sub> 발생저감에 효과적일 것이라고 사료되었다 (그림 104. d).

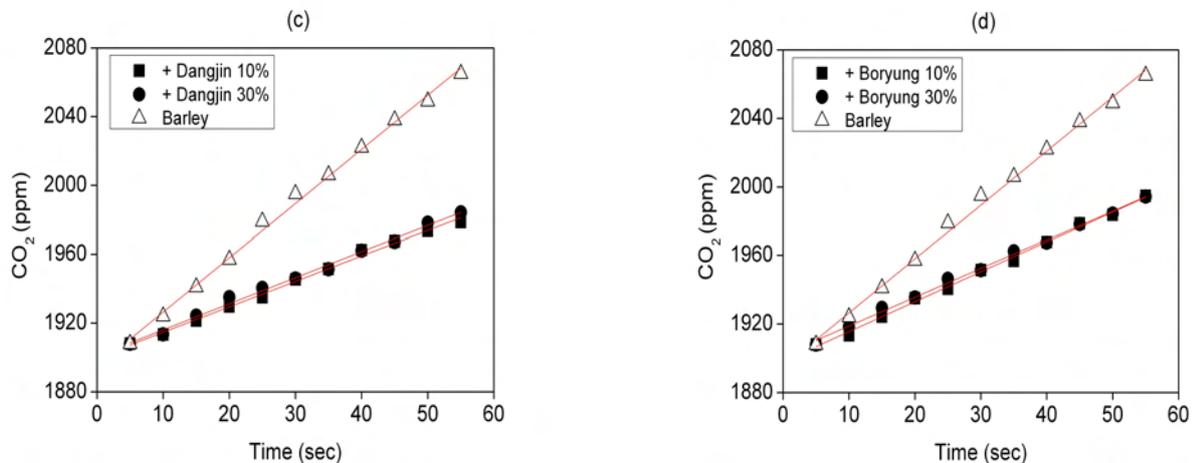


그림 104 당진, 보령 화석연료 부산물간의 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

(3) 유기질비료 (유박) 시용에 따른 Bottom ash 종류별 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

서천-A, 서천-B BA 모두 유박비료 혼합처리에서 대조구와 비슷한 수준의 CO<sub>2</sub> 발생량을 나타내었으나 (그림 105. a,b), 대조구에 비해 다소 저감된 CO<sub>2</sub> 발생량을 나타냈다. 아울러 10%, 30% 처리 수준에서도 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다.

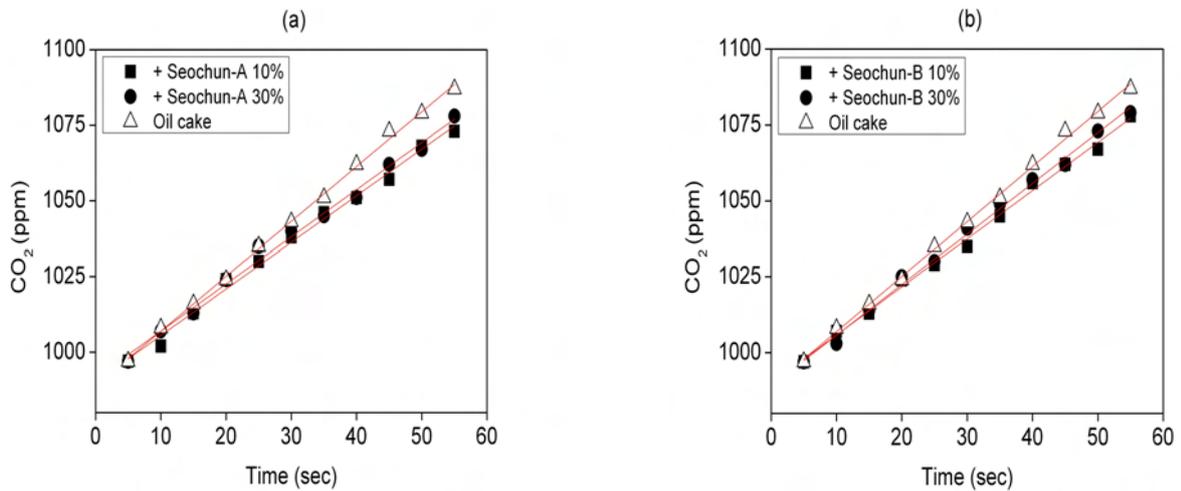


그림 105 서천 화석연료 부산물간의 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

하지만, 당진 BA 와 보령 BA 의 경우엔 (그림 106. d) 30% 처리에서 대조구보다 CO<sub>2</sub> 발생량이 낮아 뚜렷한 저감효과를 보일 것으로 기대되며, 10%에서는 미약하게나마 CO<sub>2</sub> 발생량이 대조구보다 낮은 것으로 확인되었다.

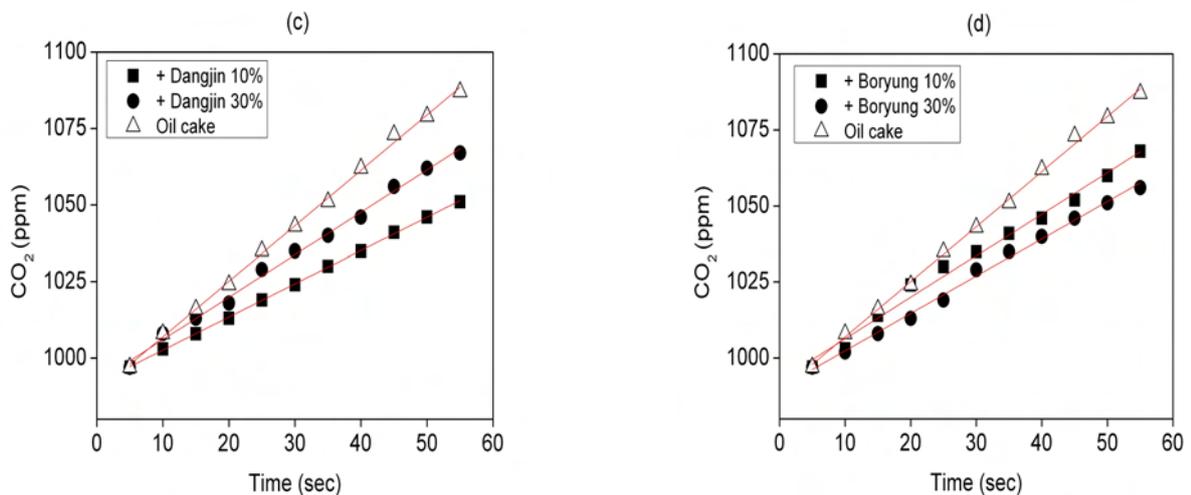


그림 106 서천 화석연료 부산물간의 CO<sub>2</sub> 발생량 비교

(4) 녹비작물 (헤어리베치) 시용에 따른 Bottom ash 종류 별 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적변화비교

시간에 따른 CO<sub>2</sub> 발생량을 보면 서천-A BA 의 경우엔 30%처리에서 뚜렷한 CO<sub>2</sub> 발생량 저감효과

를 나타냈다 (그림 107. a). 하지만 10%에서는 처리하지 않은 구와 비슷한 수준으로 나타났다. 서천-B BA 의 경우 서천-A BA 와 마찬가지로 30%에서 뚜렷한 발생저감효과를 나타냈다 (그림 107. b).

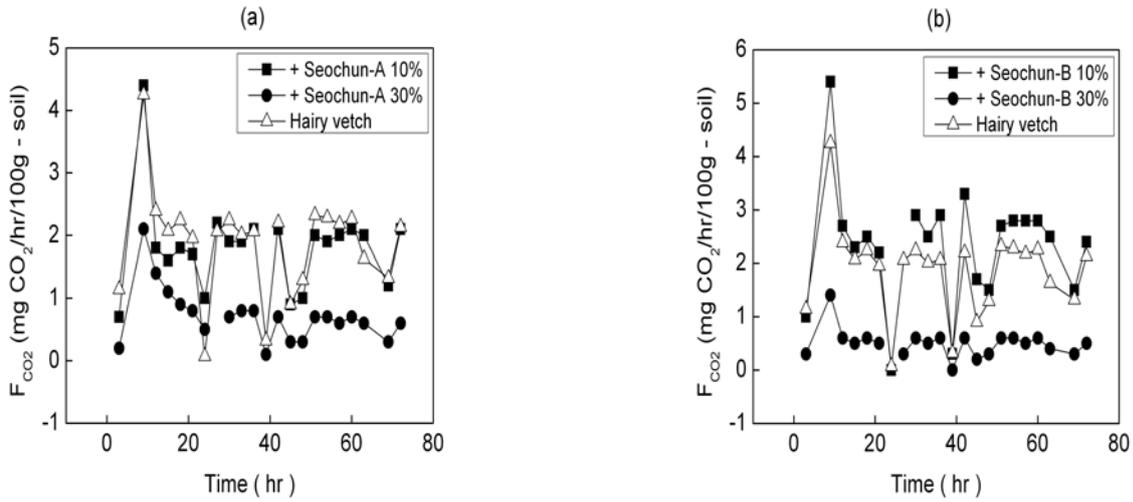


그림 107 서천 화석연료 부산물간 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화

당진 BA 의 경우 10% 처리에서 초반에 다소 CO<sub>2</sub> 발생량이 높아졌다가 시간이 경과함에 따라 낮아지는 경향을 나타냈다. 30% 처리에서는 뚜렷한 저감효과가 나타났다 (그림 108. c). 보령 BA 의 경우 30% 처리에선 뚜렷한 저감효과를 보였으나, 10%에서는 대조구와 비슷한 수준으로 나타냈다 (그림 108. d). 모든 처리구에서 Bottom ash 30% 처리 시에 CO<sub>2</sub> 발생량이 상당히 감소되었음을 확인하였으며, 10% 처리에는 비교적 대조구와 비슷한 수준의 발생량을 보이는 것으로 나타났다.

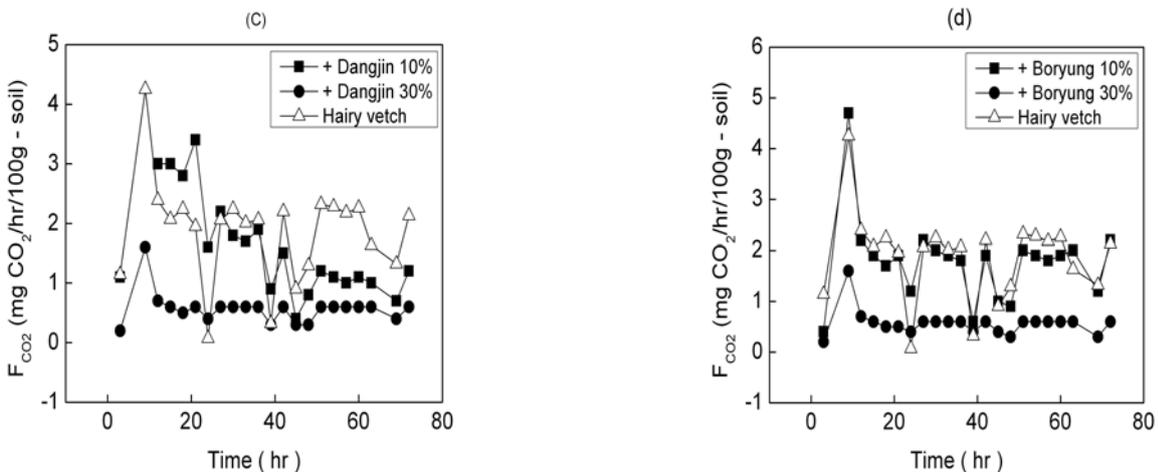


그림 108 당진, 보령 화석연료 부산물간 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화

(5) 녹비작물 (청보리) 시용에 따른 Bottom ash 종류 별 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화비교  
 청보리와의 혼합처리에 따른 CO<sub>2</sub> 발생량을 보면 서천-A BA 의 경우 10% 예선 미미하지만 발생

량이 적어진 것을 확인하였고, 30% 처리에서는 뚜렷이 감소된 것을 확인하였다 (그림 109. a). 서천-B BA 의 경우 10%, 30% 모두 발생저감효과를 나타내었다 (그림 109. b).

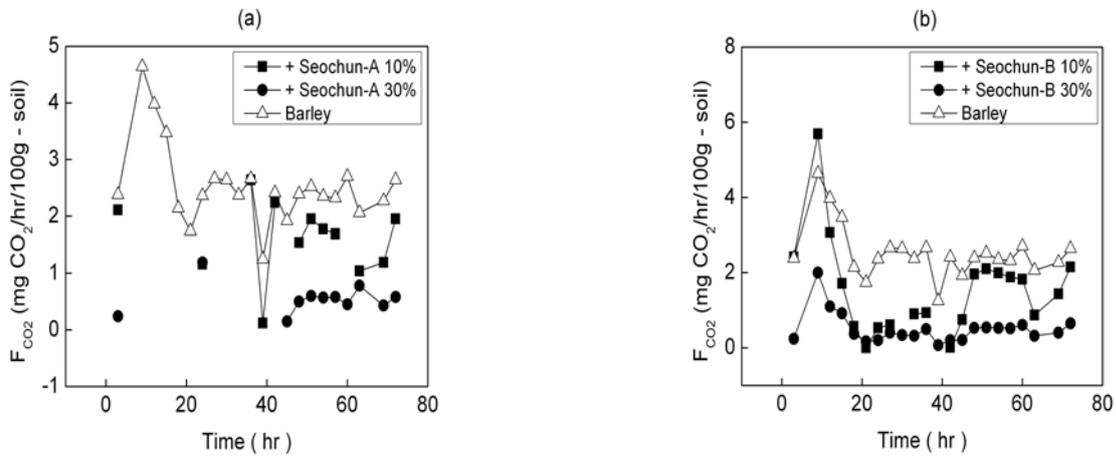


그림 109 서천 화석연료 부산물간 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화

당진 BA 의 경우 10% 처리는 시간이 지남에 따라 감소되는 경향을 보였다. 그리고 30% 처리에서는 뚜렷이 CO<sub>2</sub> 농도가 감소된 것을 확인하였다 (그림 110. c). 특히 보령 BA 의 경우 10%, 30% 모두 저감효과를 나타내었다 (그림110. d). 처리구 모두 아래 결과와 같이 30% 처리에서 뚜렷이 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소되는 것을 확인하였고, 헤어리베치와는 다르게 청보리의 경우 Bottom ash 10% 처리에서 헤어리베치보다 좀 더 CO<sub>2</sub> 발생량이 낮게 관측됨에 따라 유기물 혼용사용에서 청보리가 헤어리베치보다 CO<sub>2</sub> 발생저감에 이점이 있는 것으로 사료된다.

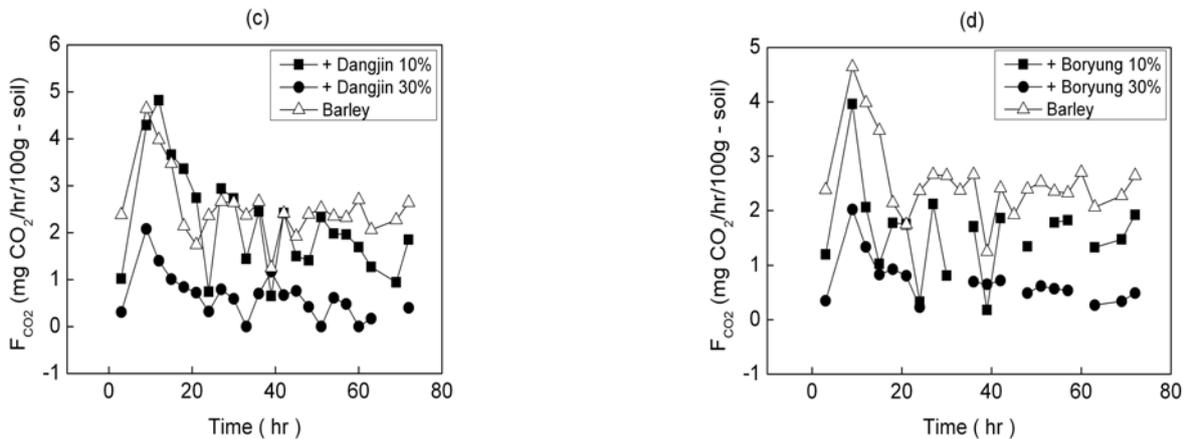


그림 110 당진, 보령 화석연료 부산물간 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화

(6) 유기질비료 (유박) 시용에 따른 Bottom ash 종류 별 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화비교  
 유박비료와 Bottom ash 의 혼합처리에 따른 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화를 보면 서천-A BA 의

경우 30%는 뚜렷하게 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소하는 것을 나타냈으나, 10%에서는 대조구와 비슷한 수준의 CO<sub>2</sub> 발생량을 보였다 (그림 111. a). 서천-B BA 의 경우 10% 와 30% 모두 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소된 것을 확인하였다 (그림 111. b).

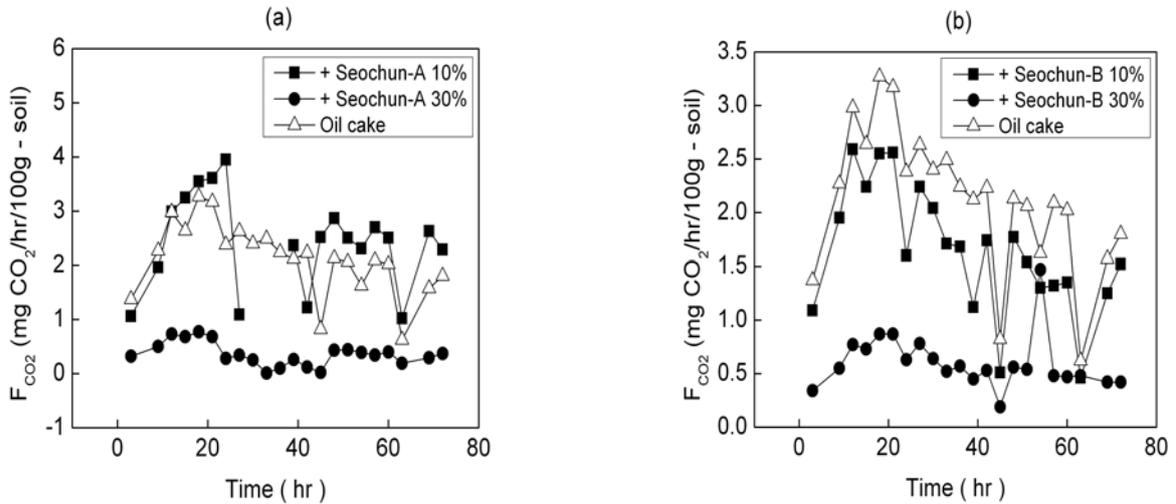


그림 111 서천 화석연료 부산물간 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화

당진 BA 의 경우 30% 처리에서는 CO<sub>2</sub> 발생량의 감소가 뚜렷이 나타났다 (그림 112. c). 보령 BA 의 경우 10% 처리에서 미미하지만 CO<sub>2</sub> 발생량 감소가 나타났으며 (그림 112. d), 시간이 경과됨에 따라 CO<sub>2</sub> 발생량이 점차적으로 감소되는 경향을 보였다. 30% 처리에서는 뚜렷한 CO<sub>2</sub> 발생량의 감소를 확인하였다. 경시적인 변화 비교에서도 앞의 결과와 같이 모든 처리구에서 30% 의 Bottom ash 혼합처리가 뚜렷하게 CO<sub>2</sub> 발생량을 감소시키는 효과를 보이는 것으로 분석되었다.

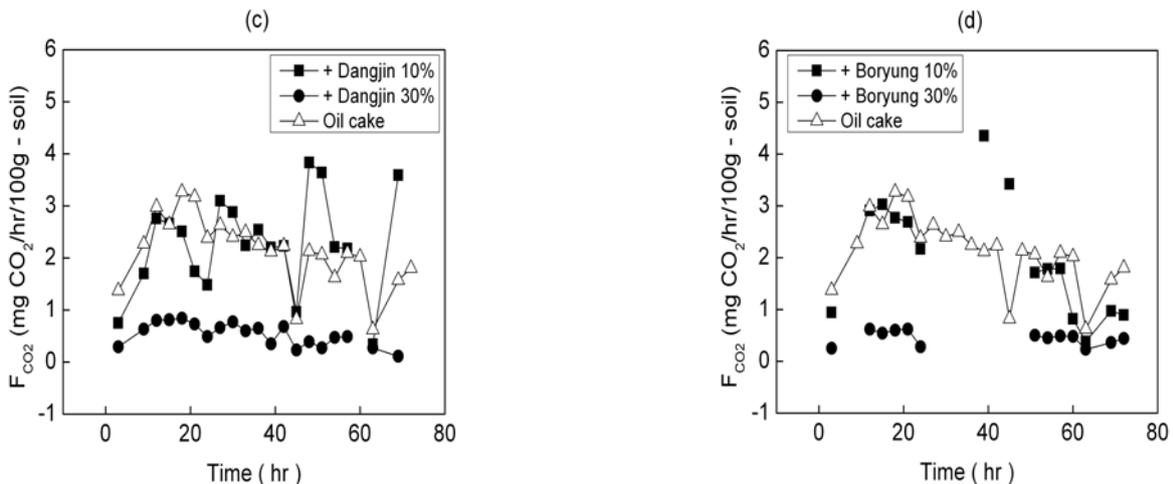


그림 112 당진, 보령 화석연료 부산물간 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화

(7) Bottom ash 종류 별 CO<sub>2</sub> 총 누적 발생량 및 Bottom ash 화학성과의 상관관계



어리베치로 총 8개 처리구를 4반복씩 조성하였다.

## (2) 간척지 농토양(혐기조건)에서의 항온배양실험

혐기조건에서 Bottom ash 및 유기물의 C/N 비율에 의한 CO<sub>2</sub> 발생량 변화를 확인하기 위하여 새만금 간척지 토양에 청보리, 헤어리베치 및 Bottom ash 20% 를 혼합처리 하였다. 투입된 유기물은 모두 건조 분쇄한 입자크기 0.5 mm ~ 2 mm 이하의 청보리, 헤어리베치를 0.6 g 씩 처리 하였다. 각각의 처리구는 Soil+청보리, Soil+Bottom ash 20%+청보리 Soil+헤어리베치, Soil+Bottom ash 20%+헤어리베치로 총 4개 처리구를 3반복씩 조성하였다.

## 나. 항온배양 및 온난화가스 분석

항온배양을 한 모든 시료는 35℃ 조건에서 토양 수분함량을 조절하였으며, 3시간 단위로 각각 2분씩 분석하였다. 그리고 고속항온배양장치에 공기시료채취구를 설치하여 기체 시료를 채취한 뒤, GC FID 를 이용해 CH<sub>4</sub> 를 측정하였고, GC  $\mu$ -ECD 를 이용하여 N<sub>2</sub>O 를 총 4회 7일 주기로 분석하였다.

## 다. 토양미생물 군집 분석 (Phospholipid Fatty Acid, PLFA)

토양 미생물 군집 분석은 토양 중 지방을 분리하는 단계 (가~마) 와 인지질 추출단계 (바~) 로 나누어 실시하였다.

(가) 동결 건조된 토양시료 약 5 g 을 30 ml 테플론 튜브에 넣었다. 그 후, 후드에서 P-Buffer 4.5 ml, Chloroform 5 ml , Methanol 10 ml 을 순차적으로 가한 다음 30 초간 볼텍싱하였다.

(나) 20% 파워로 35℃ 2분간 Sonicating 하였다.

(다) 250 rpm에서 1시간 동안 진탕 후 5000 rpm, 0℃에서 10분간 원심 분리하였다.

(라) Separation funnel 의 상부에 깔때기 Whatman No.42 여과지를 설치하고, 상등액을 Separation funnel 에 옮겨 담았다.

(마) 상등액을 모은 Separation funnel에 Chloroform 15ml 를 가한 후 P-buffer 13.5 ml 를 가하였다. 그 후, Separation funnel 마개를 닫고 위아래로 세게 흔들어 준 뒤 funnel 렉에 거치하여 암실, 저온 (25℃이하) 에 약 14시간 동안 두었다.

(바) Separation funnel 의 아래층을 분리한 후, 질소 건조하여 전량 증발시켰고, 건조된 시료 튜브 아래쪽에 Chloroform 0.5 ml 을 가하여 지방산 잔여물을 녹였다. 그 후, Transfer 스포이드를 이용하여 튜브의 용액을 15 ml 유리튜브로 옮겼다 (Chloroform 0.5 ml 을 가하여 지방산 잔여물 용해 후, 새로운 샘플튜브에 옮겨 담는 과정을 세 번 더 반복하였고, 새로운 샘플튜브에 옮겨진 용액의 최종부피가 2 ml 가 되게 하였다). 그 후, 샘플 튜브에 담긴 용액을 질소 건조하여 모두 증발시켰다.

- (사) 컬럼을 세척하기 위해 Chloroform 5 ml, Acetone 7 ml 을 순차적으로 가한 후, 클로로폼 3 ml 을 가하여 Conditioning 하였다. 그 후, 건조된 시료가 담겨 있는 튜브에 Chloroform 1.5 ml (500  $\mu$ l 씩 세 번) 를 가하여 시료를 녹였다.
- (아) 파스퇴르피펫을 이용하여 전액을 SPE 카트리지로 옮긴 후, SPE 카트리지에 Chloroform 5 ml, Acetone 5 ml을 순차적으로 가하였다. 그 후, 카트리지 아래에 8 ml Screw-cap vial 을 설치하였고, Methanol 5 ml 을 가하여 모두 용출시켰다.
- (자) 8 ml Screw-cap vial 에 받은 용출된 용액을 전량 질소 건조시켰다. 건조된 시료에 Methanol : Toluene 1:1 용액 1 ml, KOH 1 ml 을 넣은 후, 마개를 닫고 볼텍싱하였다.
- (차) vial 을 35 $^{\circ}$ C 항온수조에서 30분간 거치한 후, 상온에서 약 10분 정도 식혔다.
- (카) Hexane : Chloroform 4:1용액 2 ml, Acetic acid 200  $\mu$ l 을 넣었다.
- (타) 리트머스 종이로 pH가 6~7 사이가 되었는지 확인하였다.
- (파) 볼텍싱 후, 3차 증류수 2 ml 을 넣고, 골고루 섞이도록 다시 1분 정도 볼텍싱하였다. 그 후, 볼텍싱한 용액을 진탕기를 이용하여 0 $^{\circ}$ C에서 2000 rpm으로 5분간 원심 분리하였고, 상등액을 새 8 ml Screw-cap vial 에 GC용 시린지를 이용하여 옮겼다.
- (하) Hexane : Chloroform 4:1 용액 2ml 를 넣고 볼텍싱 및 원심분리 하는 과정을 두 번 더 반복한 후, 질소가스로 전량 증발시켰고, 건조된 8 ml 튜브에 Internal standard 용액 100  $\mu$ l 를 가하여 시료를 녹여준 다음 Transfer 스포이드를 이용하여 Vial insert 에 전액 옮겨 담았다. 이 후, GC mass 로 분석하였다.

## 2. 연구결과

### 가. 공시토양 및 Bottom ash 의 물리화학적

사용한 Bottom ash 의 경우 pH 는 7.89 로 중성에 가까운 수준으로 나타났으며, EC 의 경우 1.28 로 공시토양에 비하여 매우 높은 수준으로 나타났다(표 75). 무기태질소 중 암모니아태 질소의 경우 공시토양과 Bottom ash 모두 비슷한 수준으로 측정 되었으며 공시토양의 질산태 질소는 특이적으로 낮은 함량을 보였다. 또한 유효인 함량의 경우 공시토양에 비하여 Bottom ash 가 매우 낮은 수준으로 측정되었다.

표 75 공시 일반 토양 및 Bottom ash 의 물리화학적

	pH	EC (ds m <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N (mg kg <sup>-1</sup> )	Avail. P (mg kg <sup>-1</sup> )
공시토양	6.40	0.04	13.01	0.06	47.82
Bottom ash	7.89	1.28	12.49	6.05	8.24

### 나. 혐기조건에서 Bottom ash 및 유기물 처리에 따른 토양의 이화학적 비교

Bottom ash 를 처리하였을 경우, Bottom ash 를 처리하지 않은 대조구 보다 낮은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 유효인 함량을 나타냈다. 이러한 결과는 Bottom ash 를 처리 하였을 때 토양 미생물들이 Bottom ash 의 공극에 서식하면서 토양영양성분을 흡수하였기 때문으로 사료되었다. Bottom ash 10%, 30% 에 유기물을 처리하였을 때에는 대조구와 비슷한 수준을 나타내었으나 Bottom ash 30% 처리구 에서 특이적으로 암모니아태 함량이 증가됨을 나타냈다(표 76).

표 76 Bottom ash 처리 수준 및 유기물 처리에 따른 토양의 이화학성

처리구	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	Avail. P (mg kg <sup>-1</sup> )
Control	7.42	0.09	14.38	9.38	10.53
Hairy vetch	7.64	0.20	36.05	12.31	16.53
Bottom ash 10%	7.88	0.13	2.52	0.80	4.91
Bottom ash 30%	7.64	0.15	2.69	9.52	5.46
Bottom ash 10% + Barley	7.49	0.22	12.67	12.84	12.45
Bottom ash 30% + Barley	7.30	0.17	14.21	11.78	11.30
Bottom ash 10% + Hairy vetch	7.79	0.27	21.61	8.45	12.08
Bottom ash 30% + Hairy vetch	7.80	0.27	38.80	9.38	13.56

다. 혐기조건에서 Bottom ash 처리에 따른 온난화가스 발생량의 경시적 변화

토양에 Bottom ash 를 처리한 경우, 경시적인 이산화탄소 발생량 변화에서 대조구가 Bottom ash 를 처리한 처리구보다 더 높은 발생량을 보였고(그림 113) 경시적으로 봤을 때, CO<sub>2</sub> 는 초반부에 높은 방출 특성을 가지고 있는 것으로 사료되었다. 경시적인 메탄 발생량에 있어서 Bottom ash 를 처리한 처리구의 경우, 전반적으로 대조구에 비하여 낮은 메탄 발생량을 나타내었다. 또한 아산화질소 발생량 역시 Bottom ash 를 처리한 처리구에서 낮게 측정 되었으며, 항온배양후 2주 경에 가장많은 아산화질소 발생량을 보였다.

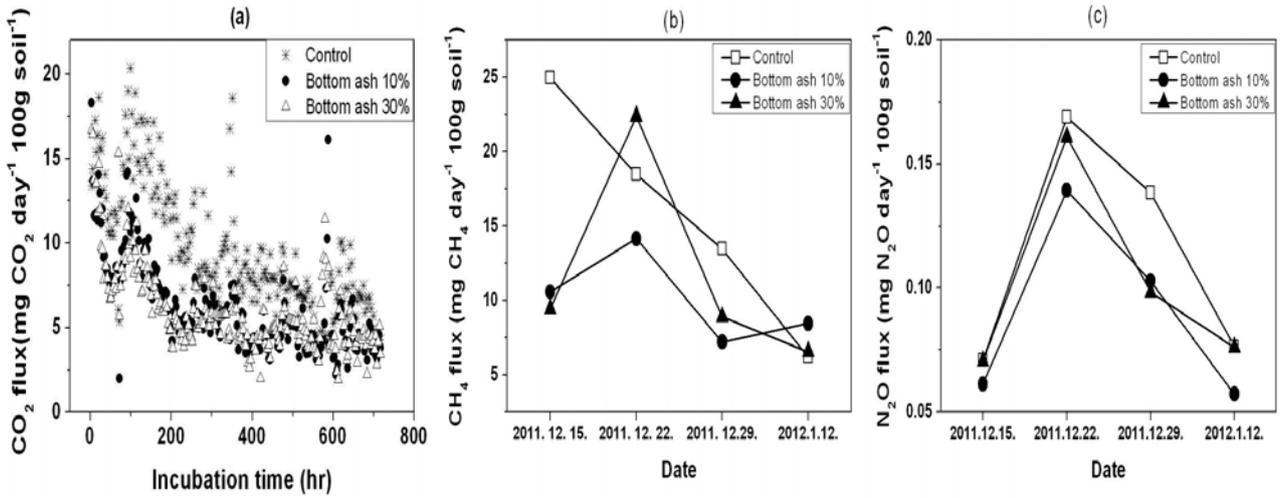


그림 113 혐기조건에서 Bottom ash 처리에 따른 온난화가스의 경시적 발생량  
 (a) 이산화탄소, (b) 메탄, (c) 아산화질소

라. 혐기조건에서 Bottom ash 및 유기물 혼용처리에 따른 온난화가스 발생량의 경시적 변화 (청보리, 헤어리베치)

Bottom ash 와 청보리를 혼용처리 하였을 경우, 항온배양 초기에 이산화탄소가 가장 많이 방출되는 것으로 분석 되었다. 하지만 시간이 경과 할수록 Bottom ash 를 처리한 처리구에서 이산화탄소 발생량이 대조구 보다 감소하는 것으로 나타났다(그림 114). 이는 청보리의 C/N 비율 (약 20) 특성 상 초기에 쉽게 분해되지만 지속적으로 양분공급이 이루어지지 않았기 때문으로 사료된다. 메탄 및 아산화질소의 경시적인 발생량의 경우 Bottom ash 를 10% 처리한 처리구 보다 Bottom ash 를 30% 처리한 처리구 에서 전반적으로 더 낮은 수준으로 측정 되었다.

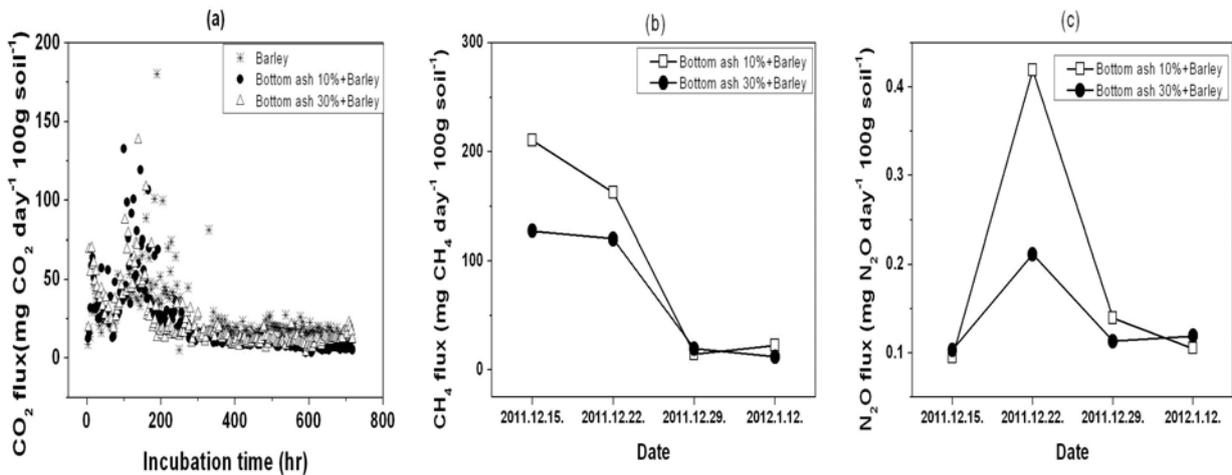


그림 114 혐기조건에서 Bottom ash 및 청보리 혼용처리에 따른 온난화가스의 경시적 발생량  
 (a) 이산화탄소, (b) 메탄, (c) 아산화질소

토양에 헤어리베치를 처리하였을 경우 Bottom ash 를 처리한 처리구가 Bottom ash 를 처리하지 않은 처리구 보다 많은 CO<sub>2</sub> 발생량을 보였으며, Bottom ash 처리 수준이 높아 질수록 CO<sub>2</sub> 발생량이 많아지는 것으로 분석되었다. 그리고 항온배양초기에 가장 많은 CO<sub>2</sub> 가 방출 되었으며, 모든 처리구에서 항온배양 후기(약 600시간 경과)시에도 약 20 ~ 30 mg CO<sub>2</sub> day<sup>-1</sup> 100 g soil<sup>-1</sup> 의 CO<sub>2</sub> 가 발생 하였다. 이는 헤어리베치의 C/N 비율 (약 9.7) 특성상 지속적으로 토양에 양분이 공급되어 토양 미생물이 Bottom ash 의 공극 내에서 미생물이 휴면상태로 전환되지 않고 생육하였기 때문으로 사료된다. 또한 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 발생량에 있어서도 Bottom ash 를 처리하지 않은 대조구보다 Bottom ash 를 처리한 처리구에서 많은 발생량을 보였다(그림 115).

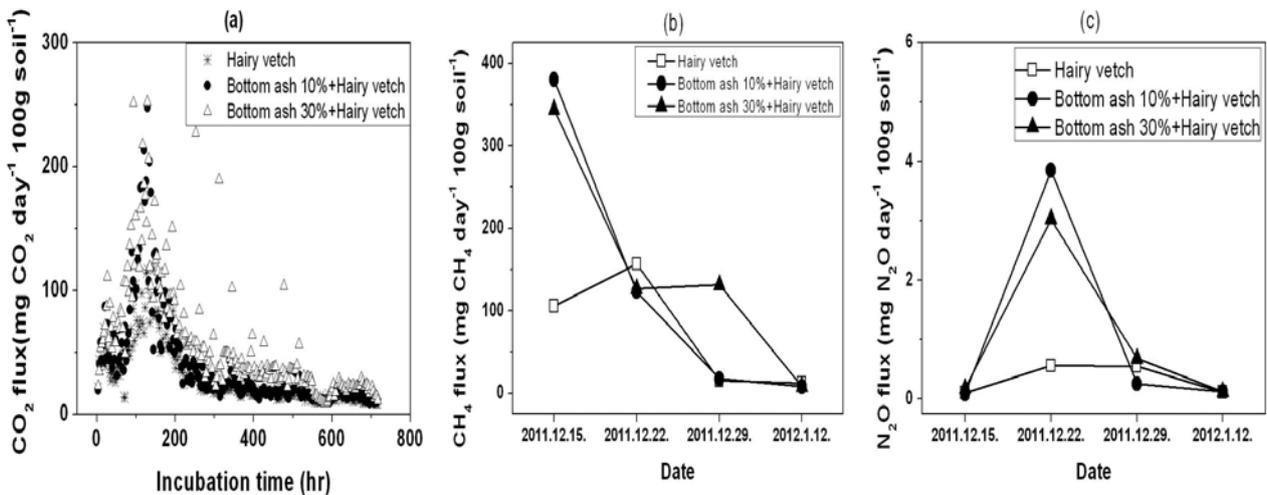


그림 115 혐기조건에서 Bottom ash 및 헤어리베치 혼용처리에 따른 온난화가스의 경시적 발생량 (a) 이산화탄소, (b) 메탄, (c) 아산화질소

마. 혐기조건에서 Bottom ash 처리에 따른 온난화가스의 누적 발생량

항온배양초기 이후에 Bottom ash 를 처리한 처리구에서 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소하기 시작하였으며, 총 누적 발생량의 경우 최종적으로 Bottom ash 를 처리한 처리구에서 CO<sub>2</sub> 발생량이 낮은 것으로 분석되었다. CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 누적 발생량 역시 Bottom ash 를 처리 하였을 때 더 낮은 수준으로 나타났다(그림 116).

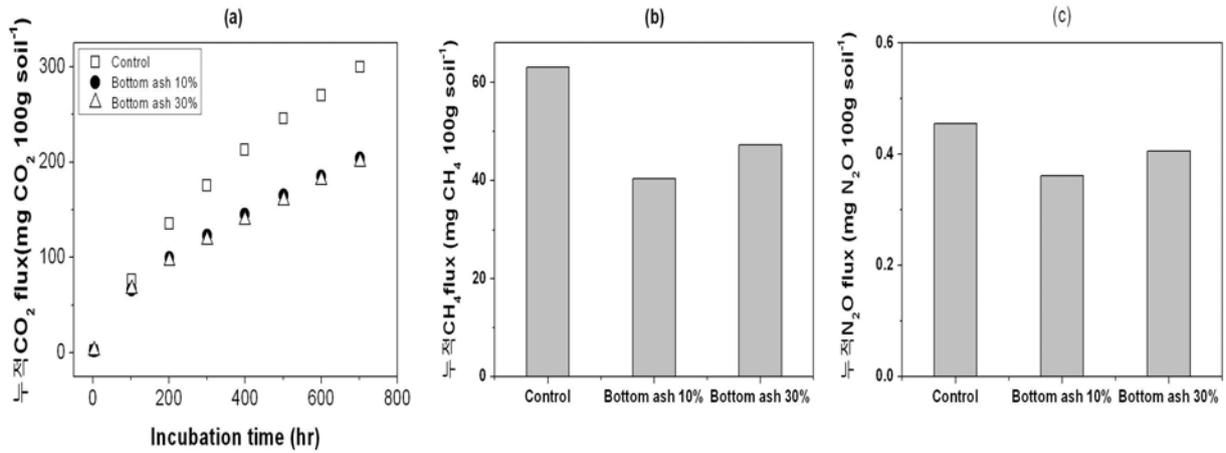


그림 116 혐기조건에서 Bottom ash 처리에 따른 온난화가스의 누적 발생량  
(a) 이산화탄소, (b) 메탄, (c) 아산화질소

바. 혐기조건에서 Bottom ash 및 유기물 혼용처리에 따른 온난화가스의 누적 발생량 (청보리 헤어리베치)

토양에 청보리 및 Bottom ash 를 혼용 처리한 처리구의 경우 향온배양초기 이후부터 Bottom ash 를 처리한 처리구에서 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소하여, 최종적으로 Bottom ash 를 처리한 처리구의 누적 CO<sub>2</sub> 발생량이 Bottom ash 를 처리하지 않은 처리구보다 낮은 수준으로 분석 되었다. CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 누적 발생량은 Bottom ash 처리수준에 따라서 감소한 것으로 나타났다(그림 117).

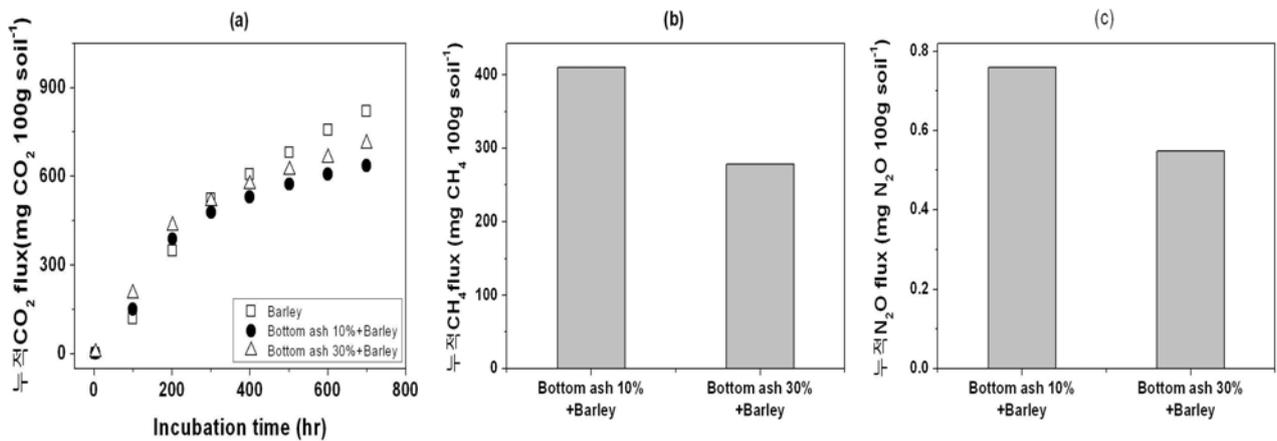


그림 117 혐기조건에서 Bottom ash 및 청보리 혼용처리에 따른 온난화가스의  
누적 발생량 (a) 이산화탄소, (b) 메탄, (c) 아산화질소

토양에 헤어리베치와 Bottom ash 를 혼용 처리한 처리구에서는 누적 CO<sub>2</sub> 발생량이 Bottom ash 를 처리하지 않은 처리구보다 높게 측정 되었다 (그림 118). 이는 헤어리베치가 토양내에서 초기에 많이 분해 되었지만, 최대 CO<sub>2</sub> 발생량을 보인 시점 이후에도 지속적으로 분해되어 토양

중 미생물에게 필요한 양분을 공급하였기 때문으로 사료된다. 이에 따라 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 누적 발생량 대조구보다 높은 수준으로 분석된 것으로 추측된다.

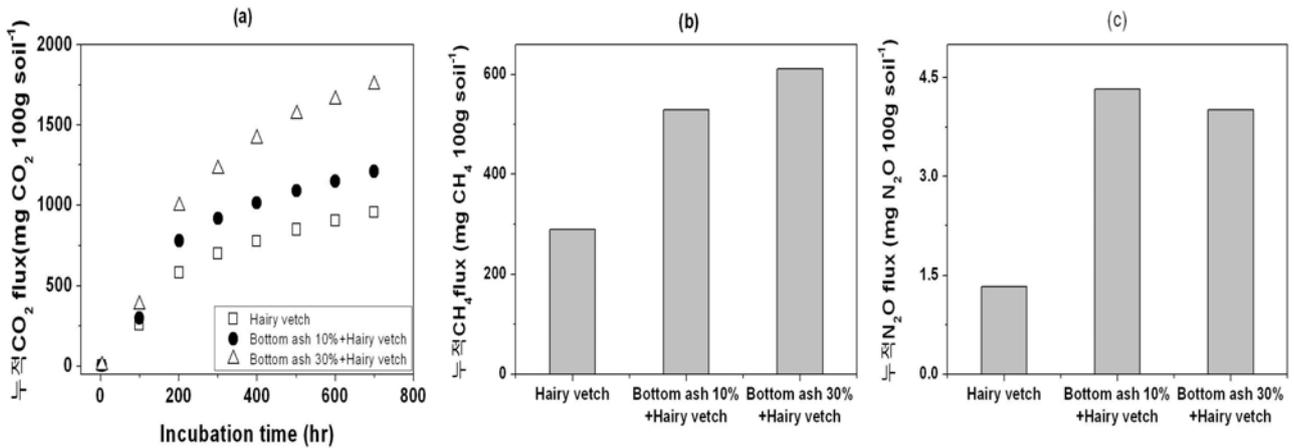


그림 118 혐기조건에서 Bottom ash 및 헤어리베치 혼용처리에 따른 온난화가스의 누적 발생량 (a) 이산화탄소, (b) 메탄, (c) 아산화질소

사. 혐기조건에서의 Bottom ash 처리에 따른 미생물 생체량 변화

토양에 Bottom ash 를 처리함에 따라 미생물 생체량이 증가하는 경향을 보였으며, Bottom ash 의 처리 수준이 높아질수록 많은 미생물생체량이 나타났다 (그림 119). 이는 CO<sub>2</sub> 발생량과는 반대로 Bottom ash 를 토양에 처리하면 Bottom ash 의 공급이 미생물이 서식할 수 있는 물리적 기반을 제공할 뿐만 아니라 천적 미생물로부터 보호 되어 미생물이 토양내에서 무기화 되지 않고 존재 할 수 있기 때문으로 사료된다. 따라서 토양에 Bottom ash 를 혼합 처리하면 토양중 탄소안정화에 기여함으로써 온난화 가스 발생저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

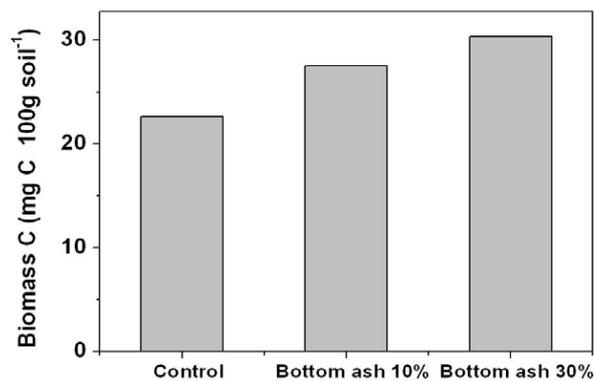


그림 119 혐기조건(논토양)에서 Bottom ash 처리에따른 미생물생체량 변화.

아. 혐기조건에서 Bottom ash 및 유기물 혼용 처리에 따른 미생물생체량 변화 (청보리, 헤어리베치)

청보리를 시용한 토양의 경우 CO<sub>2</sub> 발생량과는 반대되는 경향으로 미생물생체량이 나타났다. 청보리를 시용한 토양에 Bottom ash 를 처리한 경우 미생물 생체량이 증가 하였으며, Bottom ash 처리 수준에 따라 미생물생체량 역시 증가하는 것으로 분석되었다(그림 120). 이는 녹비작물인 청보리의 경우 토양 내 지속적인 양분공급이 이루어지지 않았기 때문에 Bottom ash 공급 내에서 미생물이 휴면상태로 존재하였기 때문으로 사료된다. 따라서 청보리를 처리한 토양에 Bottom ash 처리하면 토양중 탄소저장량이 증대되어 온난화가스 발생 저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

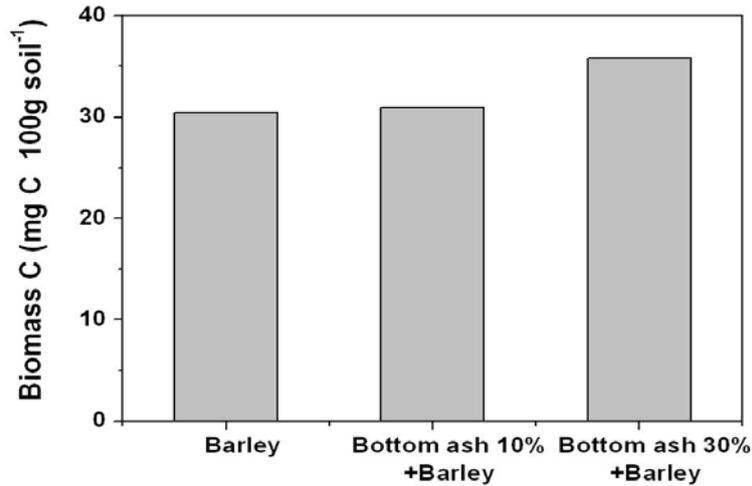


그림 120 혐기조건(논토양)에서 청보리 처리에 따른 Bottom ash 처리수준 별 미생물생체량 변화.

헤어리베치를 처리한 토양의 경우 CO<sub>2</sub> 발생량 경향과 유사하게 Bottom ash 처리에 의해 미생물 생체량 역시 많이 측정 되었으며, Bottom ash 처리 수준이 높아질수록 많은 미생물 생체량을 보였다(그림 121). 이는 헤어리베치의 C/N (약 9.7) 특성상 지속적으로 토양 중으로 양분이 공급되어 미생물이 휴면상태로 전환되지 않고 지속적으로 생육활동을 한 것으로 판단된다. 따라서 온실가스 발생량을 저감시키기 위하여 농경지에 유기성자제의 C/N 에 따른 적합한 사용량이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

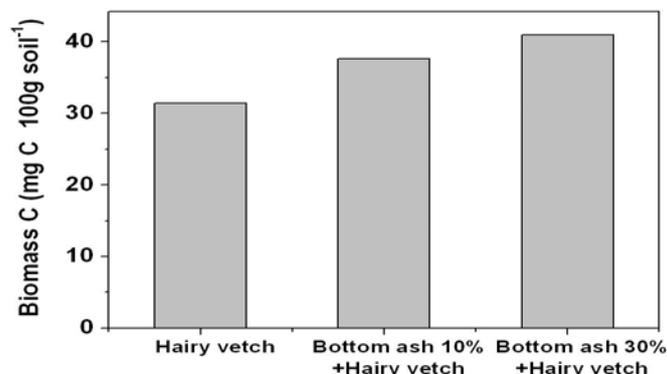


그림 121 혐기조건(논토양)에서 헤어리베치 처리에 따른 Bottom ash 처리수준 별 미생물생체량 변화.

토양에 Bottom ash 를 처리함에 따라 미생물 생체량이 증가하는 경향을 보였으며, Bottom ash 의 처리 수준이 높아질수록 많은 미생물생체량이 나타났다 (그림 122). 이는 CO<sub>2</sub> 발생량과는 반대로 Bottom ash 를 토양에 처리하면 Bottom ash 의 공극이 미생물이 서식할 수 있는 물리적 기반을 제공할 뿐만 아니라 천적 미생물로부터 보호 되어 미생물이 토양내에서 무기화 되지 않고 존재 할 수 있기 때문으로 사료된다. 따라서 토양에 Bottom ash 를 혼합 처리하면 토양중 탄소안정화에 기여함으로써 온난화 가스 발생저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

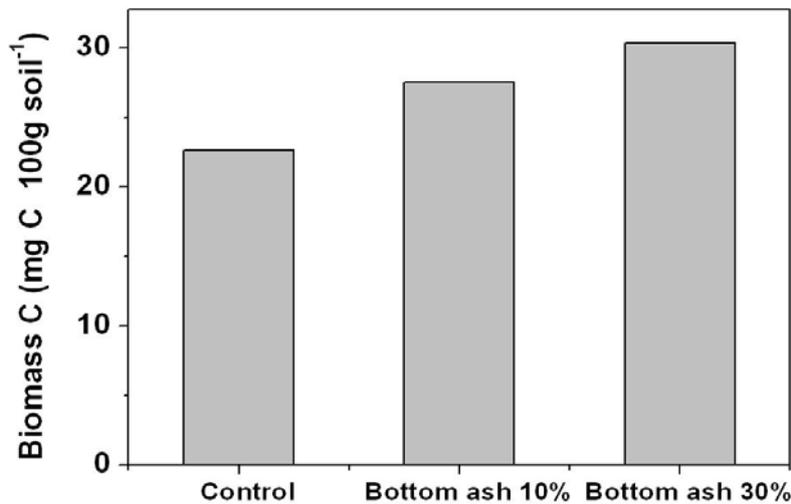


그림 122 혐기조건(논토양)에서 Bottom ash 처리에 따른 미생물생체량 변화.

#### 자. Bottom ash 및 유기물 처리에 따른 토양 미생물 군집량의 변화

Bottom ash를 처리하였을 경우 유기물(헤어리베치) 만을 처리한 처리구 보다 총 군집량이 증가되는 것으로 나타났으며, 박테리아 및 곰팡이 또한 Bottom ash 처리량이 증가될수록 군집량이 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보아 유기물 투입에 의하여 토양 미생물의 증가가 있었고, Bottom ash 가 토양 미생물들의 서식지로 작용함에 따라 증가된 토양 미생물들이 Bottom ash로 고정되는 것으로 사료되었다. 곰팡이 보다는 박테리아가 미생물 군집량에서 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났는데(그림 123), 일반적으로 곰팡이는 비교적 덩어리가 큰 유기물을 분해하는 역할을 하고, 그 분해된 유기물을 박테리아 이용하는 것으로 알려져 있다. 이에 곰팡이에 의해 분해된 유기물이 박테리아 개체수를 증가시킨 것으로 판단되었다.

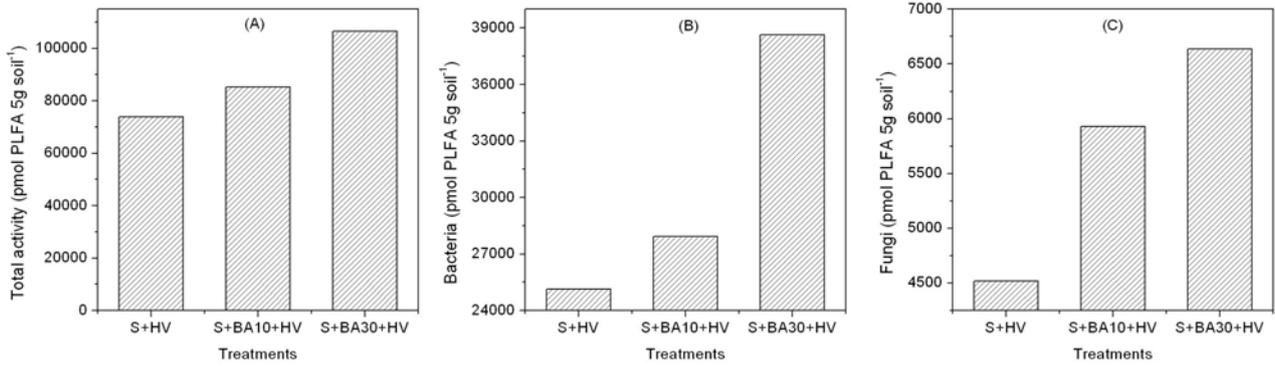


그림 123 Bottom ash 및 유기물 처리에 따른 미생물 군집량  
(A) 총 미생물 군집량, (B) 박테리아, (C) 곰팡이

#### 차. Bottom ash 처리에 따른 토양 미생물 군집변화의 특성

방선균(Actinomycetes), 곰팡이(Fungi), 박테리아 모두 유기물만을 처리하였을 때보다 Bottom ash 와 같이 처리하였을 때 증가됨을 나타내었고, Bottom ash 양이 증가할수록 토양 미생물 양 또한 증가됨을 나타냈다. 그 중 박테리아는 방선균과 곰팡이보다 그 증가량이 높아 Bottom ash 처리에 의하여 토양 미생물 중 박테리아의 군집량이 크게 증가되는 것으로 나타났다(그림 124). 이는 서식지로서의 Bottom ash 가 다른 토양 미생물 보다도 박테리아의 서식지로서 작용한다는 것으로 판단되었다.

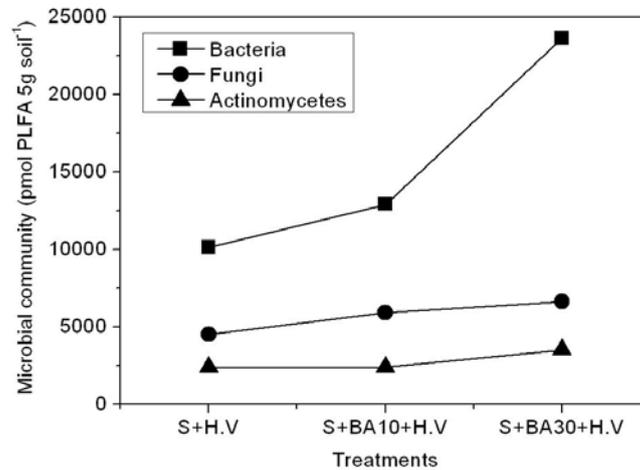


그림 124 Bottom ash 처리에 따른 토양미생물 상 군집의 변화

카. 혐기조건의 간척지토양에서 Bottom ash 및 유기물 혼용 처리에 따른 CO<sub>2</sub> 발생량의 경시적 변화  
유기물과 Bottom ash 20% 를 혼합 처리한 처리구에서 항온배양 초기(항온배양 100시간)에 CO<sub>2</sub> 가 가장 많이 발생하였으며 CO<sub>2</sub> 최대 발생 시기가 지난 후, 청보리와 Bottom ash 20% 를 혼합 처리한 경우 전반적으로 Bottom ash 를 처리하지 않은 대조구 보다 낮은 CO<sub>2</sub> 발생량을 보였

다. 헤어리베치와 Bottom ash 20% 를 혼합 처리한 처리구의 경우 CO<sub>2</sub> 최대 발생 시기가 지난 후에도 Bottom ash 를 처리하지 않은 대조구보다 높은 CO<sub>2</sub> 발생량을 보였다. 이는 청보리와 헤어리베치의 C/N 비율 차이에 기인한 것으로 C/N 비율이 낮은 헤어리베치의 경우 CO<sub>2</sub> 최대 발생 시기가 지난 이후에도 지속적으로 토양미생물에게 양분을 공급하였기 때문으로 사료된다.

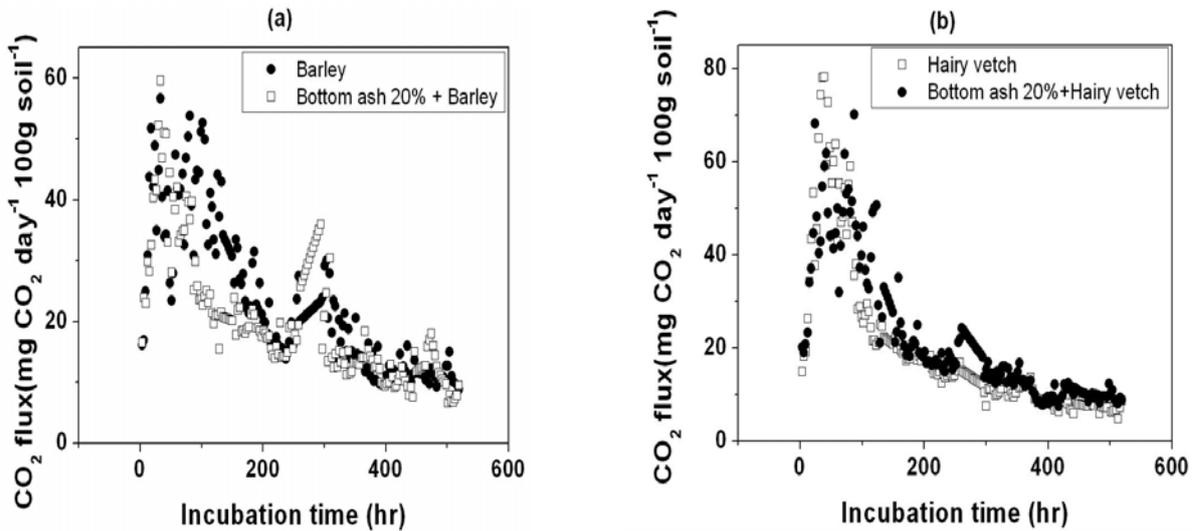


그림 125 혐기조건의 간척지토양에서 Bottom ash 및 유기물 혼용 처리에 따른 경시적 CO<sub>2</sub> 발생량 (a) 청보리, (b) 헤어리베치

다. 혐기조건의 간척지토양에서 Bottom ash 및 유기물 혼용 처리에 따른 누적 CO<sub>2</sub> 발생량 변화 청보리와 Bottom ash 를 혼합 처리한 처리구의 경우 항온배양 초기 (약 100시간) 이후부터 Bottom ash 를 처리한 처리구의 누적 CO<sub>2</sub> 발생량이 Bottom ash 를 처리하지 않은 처리구보다 낮게 측정 되었다. 이는 청보리의 경우 C/N 비율 (약 20) 특성상 유기물 투입 초기에 쉽게 분해되어 토양미생물에게 양분을 공급할 수 있지만, 시간의 경과에 따라 지속적인 양분공급능력이 감소한것에 기인하여 Bottom ash 및 토양에 서식하는 미생물이 휴면상태로 전환된 것으로 사료된다. 반면 헤어리베치와 Bottom ash 를 혼합처리한 처리구의 경우 항온배양 초기 이후에도 Bottom ash 를 처리하지 않은 처리구보다 누적 CO<sub>2</sub> 발생량이 높은 수준으로 측정되었다. 이는 헤어리베치의 C/N 비율 (약 9.7) 특성상 항온배양 초기 이후에도 지속적으로 토양미생물에게 양분이 공급 되어 미생물의 생장이 일어난 것으로 사료된다.

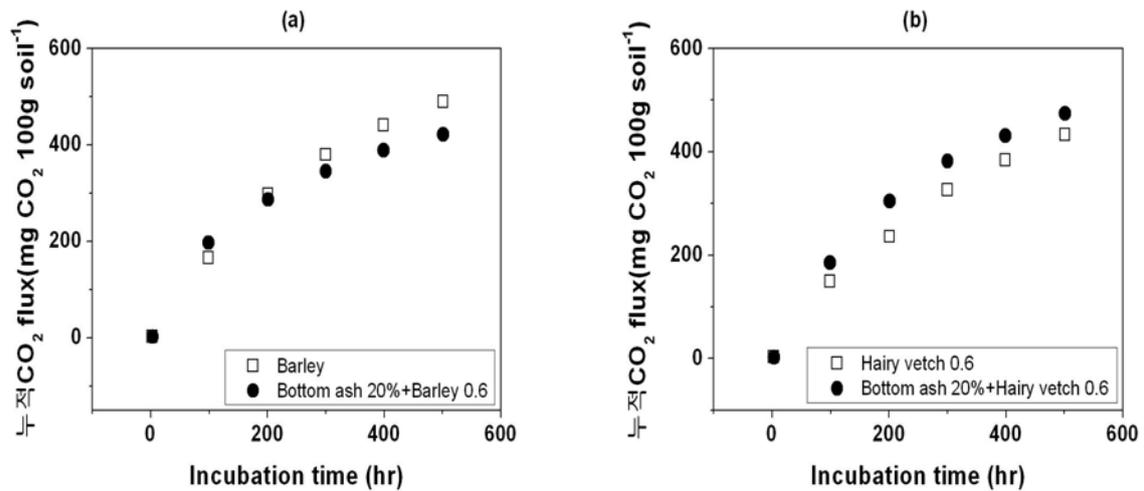


그림 126 혐기조건의 간척지토양에서 Bottom ash 및 유기물 혼용 처리에 따른 누적 CO<sub>2</sub> 발생량 (a) 청보리, (b) 헤어리베치

### 3. 결과 요약

혐기, 호기 조건의 간척지 토양에서 Bottom ash 처리에 따라 온실가스 저감효과가 있었으며 Bottom ash 의 처리수준에 따라 저감효과 또한 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 유기자재를 혼합 처리 하였을 경우 CO<sub>2</sub> 발생량 저감에 효과가 있었지만 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 발생량저감에는 뚜렷한 효과가 없었다. 그리고 Bottom ash 처리수준이 증가됨에 따라 일반적으로 미생물 생체량 역시 증가하는 것으로 나타났다. 항온배양실험을 통하여 일반 발토양 조건에서 이화학성이 상이한 Bottom ash 를 친환경자재/유기자재와 혼합처리한 경우 일반적으로 Bottom ash 처리수준이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 발생량이 감소하는 것으로 분석되었다. 일반 논토양 조건에서 Bottom ash 를 처리 하였을 때 온난화가스 발생 저감에 이점이 있는 것으로 나타났으며, 미생물 생체량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 Bottom ash 와 유기물을 혼합처리 한 경우 C/N 비율 특성에 따라 Bottom ash 의 탄소 안정화 효과 및 온실가스 저감효과가 다른 것으로 분석되었다. Bottom ash 처리에 의한 토양 미생물상 군집 변화에서는 Bottom ash 처리에 의하여 토양 미생물 군집이 처리하지 않았을 때 보다 증가하는 것으로 나타났으며, 토양 미생물 군집 중 박테리아 군집의 증가에 효과적으로 작용하는 것으로 나타났다.

## 4절 온실가스 발생 저감과 생산성 향상 친환경 농자재 개발

기술 집약형 영농으로 인한 안정된 농수산물의 공급은 우리나라의 선진화에 큰 역할을 담당해 왔다. 그러나 다년간의 집약 영농은 과도한 화학비료의 연용, 각종 농업용 화합물(농약, 비닐, 생리활성 물질 등)의 과용, 노동 집약성 및 토양 착취성 경작 등을 초래하여 이에 따른 토양 및 수질오염, 토질 악화, 지력 감소 등의 농업적·환경적 문제점을 유발시키고 있다. 특히, 시설재배지 토양은 난분해성 유독성 농약의 과다살포, 화학비료의 과다시용 및 장기연용에 의한 염류집적은 토양 본래의 기능성 상실은 물론 농산물의 생산성에도 큰 영향을 미치므

로 보다 근본적인 토양 물리성 개선방법이 시급한 실정이다.

석탄재는 석탄을 이용하는 화력발전소에서 미분탄을 연소 후 부산물로 발생하는 재(ash)를 말하며 석탄재의 발생위치에 따라 플라이애시(fly ash), 바텀애시(bottom ash), 신더애시(cinder ash)로 구분할 수 있다. 특히, 바닥재는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 괴상 또는 입지의 입경이 큰 회 성분을 보일러의 하부로 낙하되는 것으로 석탄회 발생량 중 약 10% 이상을 차지하였다. 석탄회는 대부분 석탄재 처리장에 매립하여 왔으나, 1982년부터 자원재활용의 일환으로 석탄회 이용에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. 비산재의 경우에는 이용 가능한 폐기물로 간주되어 재활용에 관한 많은 연구가 수행되어 졌으나, 석탄바닥재는 관심부족으로 대부분 해양매립에 의존하고 있는 실정이다. 하 등(1996)은 화력발전소에서 생성되는 석탄재를 토양에 시용한 결과 토양의 pH가 현저히 상승하였으며, 토양내 유효인산, 치환성 염기 및 붕소의 함량이 증가하였으며, 재배 작물에서 증수효과를 나타내었다고 하였다. 박 등(1991)은 석탄재는 완전히 소토된 물질이며 여러 가지 유효한 무기성분을 함유하고 있어서 활용가능성이 매우 높고, 석탄재의 자원화 시킬 필요성이 있다고 하였다.

그러므로 본 연구에서는 지금까지 매립에 의존되어 온 석탄바닥재를 시설재배지 토양에 일정한 비율로 혼합하여 첨가소재로서 인공토 개발 가능성을 평가하고 온실가스 발생 저감 저탈질-완효성 친환경 농자재 개발과 처리 방법을 개발하고자 하였다.

## 1. 연구방법

### 가. 화석연료 부산물

충남 보령에 위치한 T화력발전에서 발생한 시료를 채취하여 연구에 사용하였다. 석탄바닥재의 화학적 조성은 X-선 형광분석기(PW 2400, Phillips)로 분석하였다. 적외선분광분석은 시료와 KBr을 1:99의 비율로 혼합하여 KBr disk를 만들어 Fourier Transmittance Infrared spectrophotometer(MB104, Bomen)로 4000에서 500  $\text{cm}^{-1}$  범위를 측정하였다.



그림 127 화석연료 부산물.

나. 기초 이화학성 - pH, EC, CEC, 무기태질소, 유효인산 및 치환성 양이온 등의 화학적 특성을 기존 무기재료 Vermiculite, Perlite, Zeolite, 규조토 등과 비교 평가하고 bottom ash의 유해 성분 함량을 조사하였다. 그리고 물리적 특성 분석 항목은 입경분포 비율과 입자밀도, 용적밀도, 포화수리전도도 및 보수력과 기상부피(air volume), 이용수분(easily available water), 완충수분(water buffering capacity), 최적 수분포텐셜(optimum matric potential) 등의 수분 특성 등을 평가하였다. 입도분포는 ASTM 표준체를 이용하여 5 등급으로 분포도를 조사하였다.



그림 128 시설하우스 실습포장(위)과 충남 논산시 양촌읍 거사리 노지 포장(아래) 현장 사진

표 77. 생육시험 실시 내용

구분	내용
시험규모	1) 처리구당 시험면적 15m <sup>2</sup> (1.5m×10m) 2) 노지에서 임의배치법의 3반복으로 수행
처리내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대조구(관행) : 공시토양 + 추천시비량 시비</li> <li>· 반량구 : 공시토양 + ACBA 추천처리량 50% + 추천시비량</li> <li>· 적량구 : 공시토양 + ACBA 추천처리량 100% + 추천시비량</li> <li>· 배량구 : 공시토양 + ACBA 추천처리량 150% + 추천시비량</li> </ul> ※ 추천시비량(kg/10a) : N:P:K:Ca = 10:5.9:6.4:150
시비/재배방법	농촌진흥청의 엽채류 표준재배법에 따른 엽채류의 표준 시비량
경종개요	정식 : 2010. 7. 20 재식거리 : 20cm × 15cm
시비방법	상추 정식 5일전인 2010년 7월 15일 기비로 퇴비를 처리하여 기물함량이 2.5%가 되도록 조절한 다음 공시 ACBA를 각 처리구별로 적량을 처리 후 비닐멀칭을 실시. 그리고 상추를 7월 20일에 정식한 다음 매 15일 간격으로 공시 ACBA를 상추가 자라는 토양표면에 엽면시비로 살포
수확	생육기간 중 ACBA를 처리한 후 20일째인 2010년 8월 10일, 8월 25일, 9월 10일, 9월 20일, 10월 5일에 처리수별로 각각 10개채씩 임의로 총 5회 시료를 채취하여 실시하여 Leaf Area Index(LAI)에 준하여 평균 생체중으로 계산함.

#### 라. 포트시험

본 시험은 충남대학교 농장에서 3 반복으로 수행하였다. 풍건 후 파쇄한 시설재배지 토양과 AA-석탄바닥재를 무게 기준으로 일정한 비율로 혼합하여 포트(바닥직경 12.5 cm, 높이 15 cm, 상부직경 21 cm)에 약 3.0 kg씩 충전하였다. 석탄바닥재가 염류가 집적된 시설재배지 토양에 미치는 영향을 조사하기 위하여  $\text{CaCl}_2$ 로 토양의 EC를 6.0 dS/m으로 먼저 조절한 후, 석탄바닥재를 무게 기준으로 일정한 비율로 혼합하였다.

상추(*Lactuca sativa*, cv. Jeokchima)를 공시작물로 하여 각 포트에 N-P-K를 10-5.9-6.4 kg/10a의 비율로 질소(요소), 인산(용성인비) 및加里(KCl)를 시비하였으며, 유기질 비료는 1500 kg/10a 수준으로 시비하였다. 각 포트에 상추를 한 주씩 정식하였으며, 매 3~5일 마다 충분히 관수하였다. 정식 40일 후 수확하여 상추의 생체중량 및 신장을 조사하였고, 토양은 혼합한 후 일부를 채취하여 이화학성을 분석하였다.

#### 마. 연구 결과

석탄바닥재의 입경분포를 조사한 결과 0.25~2.0 mm 사이가 76.6% 이었으며, 2 mm 이상인 자갈함량도 19.1%로서 입자크기가 매우 큰 것으로 나타났다. 또한, 0.1 mm 이하의 크기도 4.3%로서 대부분이 모래 또는 자갈 성분인 것으로 나타났다. X-선 회절분석에 의한 시료의 결정학적 특성은 quartz, mullite 및 feldspars가 주요 결정상으로 존재하였음. 화학적 조성은  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$  순이었다.

부산물의 활산도는 8.1, 그리고 잠산도는 8.5로 일반적으로 무연탄의 연소로부터 발생하는 석탄재 pH 8.5-10.0에 비해 다소 낮다. 또한, 전기전도도 2.46 dS/m, 총인 0.31% 및  $\text{SO}_3$  2.38%로서 황의 함량이 다소 높은 것으로 나타났다. 따라서 석탄바닥재를 미생물 담체로 사용할 경우 미생물 배양영양원으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

보수력 특성 - 이용수분 20%. 완충수분 12%로서 양호한 배지 특성을 보유하고 있으며 또한 고상을 제외한 공극의 50%는 공기, 나머지 50%는 수분으로 채워진 조건을 의미하는 기준인 최적수분퍼텐셜은 5.5 kPa로서 수분을 적당히 함유한 상태에서 기상을 확보해 주는 양호한 소재 특성을 가지고 있다.

#### 2. 첨가소재로서 인공토 개발 가능성 평가

석탄바닥재와 AA 처리량 별로 혼합 결과 AA의 처리량이 석탄바닥재의 중량비로 3% 미만일 때 최종 산물의 pH는 6.2 이상으로 작물 생육에 적합하며 한편 EC 값도 2 이하로 문제가 없는 것으로 조사되었다. 그리고 다공성 상태로 수분함량이 포장용수량 이상일 경우에도 산화환원 전위가 +104mV로 산화상태로 유지되고 있다 (표 78, 79, 80).

표 78. 인공토 개발 가능성 평가-AACBA

구분	pH		EC(dS m-1)	
	평균	표준편차	평균	표준편차
A-P-2	5.71	0.65	1.16	0.06
A-Y-2	7.25	0.07	2.38	0.1
A-C-2	6.05	0.46	1.64	0.27
A-M-2	6.58	0.24	3.43	0.03
B-P-2	6.29	1.06	1.8	0.57
B-Y-2	7.34	0.09	2.6	0.12
B-C-2	7.18	0.08	1.71	0.18
B-M-2	7.04	0.1	2.36	0.16
C-P-2	7.14	0.04	1.42	0.14
C-Y-2	7.35	0.07	2.3	0.15
C-C-2	6.67	0.23	1.94	0.05
C-M-2	7.01	0.06	3.48	0.06

표 79. AA-PCBA 기초 기능성 평가

시료	평균	표준편차	평균	표준편차
AP1	6.29	0.75	1.13	0.06
AY1	7.03	0.29	2.30	0.11
AC1	6.03	0.52	1.75	0.31
AM1	6.30	0.11	3.51	0.05
BP1	6.84	0.86	2.36	0.58
BY1	6.76	0.26	2.71	0.09
BC1	7.09	0.07	1.86	0.17
BM1	6.85	0.03	2.55	0.17
CP1	6.96	0.11	1.41	0.14
CY1	7.01	0.10	2.21	0.14
CC1	6.69	0.16	1.95	0.04
CM1	6.28	0.08	3.53	0.07

표 80 AA-CBA 처리 전후 토양 이화화성 변화

구분	pH (1:5)	EC dS/m	T-N %	OM %	평균 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg	Exchangeable cations (cmol <sub>c</sub> /kg)				CEC cmol <sub>c</sub> /kg	
						Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
퇴비/ACBA 처리 전	6.58	0.61	0.11	1.75	69.8	655.8	84.4	59.6	11.6	8.1	
정식 5일전(시료처리 후)	6.21	0.81	0.13	2.46	155.3	688.8	124.40	115.9	11.8	16.9	
2010. 9.10	대조구(관행구)	6.33	0.45	0.18	2.48	135.3	633.2	111.3	119.8	10.9	17.4
	반량구	6.24	0.32	0.16	2.39	142.4	678.5	118.6	122.1	12.4	18.6
	적량구	6.18	0.29	0.14	2.44	138.3	692.4	122.4	118.9	12.8	18.4
	배량구	6.11	0.24	0.17	2.37	145.9	702.5	126.9	115.4	12.8	18.2
2010. 10.20	대조구(관행구)	6.44	0.17	0.17	2.36	93.8	586.2	101.42	95.9	13.6	17.04
	반량구	6.31	0.22	0.17	2.62	178.1	657.7	116.67	143.6	14.8	19.69
	적량구	6.19	0.17	0.13	2.47	178.3	715.3	128.10	100.7	14.3	18.05
	배량구	6.33	0.19	0.21	2.27	179.7	718.8	124.80	114.8	13.9	17.65

표 81 공시 ACBA이 상추의 생육에 미치는 효과

처리구	수확량		개체중량	
	(kg/주)	지수	(g/10EA)	지수
대조구(관행)	1.99 <sup>a</sup>	100	57.7 <sup>a</sup>	100
추천 반량구	2.01 <sup>a</sup>	101	58.3 <sup>a</sup>	101
추천 적량구	2.13 <sup>a</sup>	107	62.9 <sup>a</sup>	106
추천 배량구	2.04 <sup>a</sup>	103	58.9 <sup>a</sup>	102

\*DMRT at 5% level

표 82. AA-CBA 처리에 따른 생육 특성

채취일	처 리 구	엽 장		엽 폭		Chlorophyll 함량	
		(cm)	지수	(cm)	지수	(g/100 cm <sup>2</sup> )	지수
2010 9.15	대조구(관행)	10.6 <sup>a*</sup>	100	9.5 <sup>a*</sup>	100	1.2 <sup>a</sup>	100
	추천 반량구	10.5 <sup>a</sup>	99	8.9 <sup>a</sup>	94	1.2 <sup>a</sup>	101
	추천 적량구	8.4 <sup>a</sup>	79	7.8 <sup>a</sup>	82	1.1 <sup>a</sup>	93
	추천 배량구	5.9 <sup>a*</sup>	56	7.3 <sup>a</sup>	77	1.1 <sup>a</sup>	91
2008 10.5	대조구(관행)	16.9	100	12.1 <sup>a</sup>	100	1.8 <sup>a</sup>	100
	추천 반량구	14.8 <sup>a*</sup>	88	12.1 <sup>a</sup>	100	1.8 <sup>a</sup>	99
	추천 적량구	17.8 <sup>a</sup>	105	12.5 <sup>a</sup>	104	1.9 <sup>a</sup>	107
	추천 배량구	17.2 <sup>a</sup>	102	12.2 <sup>a</sup>	101	1.9 <sup>a</sup>	103
2008 10.25	대조구(관행)	23.9 <sup>a*</sup>	100	14.1	100	2.23 <sup>a</sup>	100
	추천 반량구	23.6 <sup>a</sup>	99	14.3 <sup>a</sup>	101	2.28 <sup>a</sup>	102
	추천 적량구	25.4 <sup>a</sup>	106	15.9 <sup>a</sup>	113	2.37 <sup>a</sup>	106
	추천 배량구	24.4 <sup>a</sup>	102	15.4 <sup>a</sup>	109	2.31 <sup>a</sup>	104

\*DMRT at 5% level

### 3. 상추 비해 조사 결과

#### 1) 상추 비해 조사 결과

작물별 조사 결과 상추의 모든 처리구에서 비해 증상은 조사되지 않았다(그림 129).



그림 129 상추 비해 조사 결과 정식 전(왼쪽), 정식 후 40일(오른쪽)

비해 조사에 대한 기준은 다음과 같다.

- 0 : 육안조사 결과 비해 인정되지 않음
- 1 : 아주 가벼운 비해로서 엽반점 또는 생육장애 증상이 인정됨
- 2 : 처리된 작물의 매우 작은 부분에 비해와 생육저하가 인정됨
- 3 : 처리된 작물의 50% 정도 비해가 인정되며 생육 저하가 뚜렷함.
- 4 : 처리된 작물의 70% 정도 비해가 인정되며 생육저하가 뚜렷함

5 : 처리된 작물의 100% 정도 비해가 인정되며 생육저하가 뚜렷함.

표 83 ACBA 처리가 상추에 미치는 비해 검정 결과

처리구	비해 (0-5)					비해증상
	10일	20일	30일	40일	50일	
관행구	○	○	○	○	○	없음
반량구	○	○	○	○	○	없음
적량구	○	○	○	○	○	없음
배량구	○	○	○	○	○	없음

#### 4. 결과 요약

가. 본 실험은 공시 ACBA 처리가 상추에 대한 생육 및 수량에 미치는 효과를 검토하기 위하여 본 연구소에서 위탁시험으로 실시하였다. 또한 작물생육에 유해한 중금속 농도를 조사하였다

나. 제공된 ACBA제품의 pH는 4.65이며 권장 희석배수(500배)의 경우도 pH가 4.83 정도로 강산성에 속하는 것으로 조사되었다. 따라서 토양에 처리 시 토양의 pH를 낮추어 양이온교환용량과 토양내 양이온과 음이온의 가용도에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 ACBA 처리 시 토양의 산도 등을 고려하여 처리하여야만 칼슘과 인산의 가용화도를 높여 작물 생육에 영향을 줄 수 있다.

다. 작물재배시험 전·후 토양의 화학성 변화를 살펴보면, ACBA 처리 후 토양의 pH는 다소 감소하는 경향을 보여주고 있으나 작물 생육에는 영향을 주지 않을 것으로 조사되었다. 그리고 ACBA 처리 후 토양내 가용성 양이온의 함량이 표층토에서 감소하는 경향을 보여주었다.

이는 ACBA 처리 후 토양 pH가 일시적으로 낮아지고 또한 관개에 의해 일부 수용성상태의 양이온이 근권층으로부터 토양의 하부로 이동된 것으로 추정된다. 이외 총질소, 유기물, 유효인산, 양이온 등은 작물 재배시험 후 전체 처리구간에 토양의 이화학적 특성에 큰 차이는 발견할 수 없었다.

라. 상추의 생육 특성을 살펴보면 초기 상추 정식 후 일부 배량구에서 상추가 고사하여 결주가 발생하였다. 이는 강산성 상태의 ACBA이 어린 상추 유묘에 직접적으로 접촉하여 영향을 준 것으로 판단된다. 따라서 ACBA 처리는 정식 후 뿌리가 활착한 이후에 처리하는 것이 바람직하다. 이러한 문제를 조사하기 위하여 2차 상추 정식을 실시하여 조사한 결과 상추 정식 후 약 10일 이후에 ACBA을 처리하면 상추 생육에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

결론적으로, 전 시험기간을 통하여 공시 ACBA은 상추 정식 후 최 10일 이후에 처리하는 것이

바람직하며 공시토양미생물제제의 처리에 따른 상추의 생육 상태는 대조구보다 처리량에 따라 엽장과, 엽폭 등이 증가되었고, 수확량 및 개체 중량은 추천 적량구에서 증수 효과가 인정되었다.

그리고 성장특성을 살펴보면 생육중기에 처리효과 생육초기나 생육 후기보다 양호함을 알 수 있었다. 그리고 상추와 같이 수분을 많이 요구하는 작물을 재배하는데 있어서 처리된 ACBA의 유효도를 높이기 위해서는 관개량과 시기에 대한 검토가 필요하다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 1. 연구개발목표의 달성도

1세부(주관) : 친환경 소재를 활용한 간척지 토양구조 개선과 관리 기술 개발

구분 (년도)	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
1차	토양물리성 개선 소재 특성과 모세관 상승과 EC 변화	100	간척지 토양 구조 개선 소재 기준과 처리량 근거 확보 지하수 상승 차단 중간 구조층 기준 확보
2차	연속 표층 - 지하수 차단층 물질과 수분 이동 경시 변화	100	서로 상이한 다층 구조내에서 수분과 물질 이동 상관성과 수분요구량과 시간 구명 간척지 토양 미생물상 구명-질소 손실
3차	현장 적용 적정 토양구조 모형과 현장 적용 구조 설계	100	수직-수평 수분이동에 관여하는 요인 구명 특히 압거 또는 명거 배수시 제약 요인 구명 간척지 제염 토양 구조 개선 모델 개발

2협동 : 재활용 자원 활용 간척지 농경지 탄소 저장량 증대 및 온난화 가스 저감 농자재 시비 방안

구분 (년도)	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
1차	화석연료 부산물을 이용한 토양 탄소 안정화	100	재활용 자원 시용을 별 토양호흡, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O 발생량/요인
		100	유기물의 흡착/안정화에 미치는 영향
2차	화석연료 부산물을 이용한 토양 탄소 안정화	100	친환경 농자재 처리별 온실가스 발생저감효과
		100	유기물과 다공재 처리 함량별 이산화탄소 발생량 측정
		100	재활용 농자재/유기자재 시용 시 토양호흡, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O 발생량에 미치는 영향
3차	화석연료 부산물을 이용한 토양 탄소 안정화	100	화석연료 부산물 Bottom ash 의 토양 탄소 저장량 양상 효과 규명
		100	유기성 자재에 대한 Bottom ash 의 온난화 저감 효과 특성 인자 규명

협동(참여기업) : 온실가스 발생 저감과 생산성 향상 친환경 농자재 개발

구분 (년도)	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
1차	친환경 재활용 농자재 이 화학적 특성 조사	100	경량다공체인 석탄바닥제 향후 용도 개발 기준 확보
2차	친환경 농자재-부산물 자재 처리 비율별	100	질소 손실량을 감소시키는 간척지 시비 방안 확보
3차	저탈질-완효성 친환경 농자재 시제품 개발 및 상품화	100	석탄바닥제의 기공을 활용한 완효성 비료 개발 기준 설계

제 2 절 관련분야에의 기여도

- ☞ 간척지 염류 문제와 지하수 상승에 따른 재염화 방지와 기존의 기술과 차별화된 접근 방식
- ☞ 최근 개발되는 신규 간척지의 경우 논농사가 아니 발작물을 재배하도록 되어 경작자들의 수입과 수익을 보장할 수 있는 조기 숙전화 또는 답전운작기술로 활용할 있음.
- ☞ 화석연료 부산물(Bottom ash)을 토양에 처리할 때 온난화가스 발생저감 및 토양탄소 고정에 효과적인 수준을 결정함으로써 합리적인 처리기술로 활용.
- ☞ Bottom ash 와 유기물의 혼용 시 유기물의 C/N 비를 확인하여야 하며, 다양한 C/N 비율을 가진 유기자재들과의 혼용기술을 개발하는데 활용 될 수 있음.
- ☞ Bottom ash 와 같은 다공성 매질로서 이용될 수 있는 물질들에 대하여 비슷한 방식으로 평가를 하여야 하며, 상대적으로 우수한 다공성 매질 자재 및 기타 유기자재들과의 혼용기술을 개발하는데 활용 될 수 있음.

정책제안 :

- ① 신간척지 조기제염을 위한 석탄바닥재 활용 토층개량 건의( '10)
  - 건의부서 : 농림수산식품부 4대강새만금과

미국의 경우 화력발전소에서 발생하는 석탄바닥재는 2003년 기준 약 1810만톤 정도이며 이중 약 360만톤 정도가 토양개량(Soil modification/stabilization)과 농업(Agriculture)에 사용되었다 (Table 87).

Table 87. Coal Combustion Product (CCP) Production and Use Survey (ACAA, 2003)

CCP Categories	Fly Ash	Bottom Ash
CCP Production Category Totals**	70,150,000	18,100,000
CCP Production Total		
CCP Used Category Totals***	27,136,524	8,247,273
All CCP Used Total		
CCP Use By Application****	Fly Ash	Bottom Ash
1. Concrete/Concrete Products /Grout	12,265,169	298,181
2. Cement/ Raw Feed for Clinker	3,024,930	493,765
3. Flowable Fill	136,618	20,327
4. Structural Fills/Embankments	5,496,948	2,443,206
5. Road Base/Sub-base/Pavement	493,487	1,138,101
6. Soil Modification/Stabilization	515,552	67,998
7. Mineral Filler in Asphalt	52,608	0
8. Snow and Ice Control	1,928	683,556
9. Blasting Grit/Roofing Granules	0	42,604
10. Mining Applications	683,925	1,184,927
11. Wallboard	0	0
12. Waste Stabilization/Solidification	3,919,898	30,508
13. Agriculture	12,140	3,534
14. Aggregate	137,171	512,769
15. Miscellaneous/Other	396,150	1,327,797
CCP Category Use Totals	27,136,524	8,247,273
Application Use To Production Rate	38.68%	45.57%

한편 Junfeng (2008) 등이 연구한 결과를 살펴보면 석탄바닥제를 처리량이 증가함에 따라 콩의 근부와 지상부의 생체중과 건물중이 증가하였다고 보고하였다. 이와 같이 석탄바닥제는 식물 생육에 도움이 되는 것으로 많은 연구 결과에서 보고되고 있다 (그림 131).

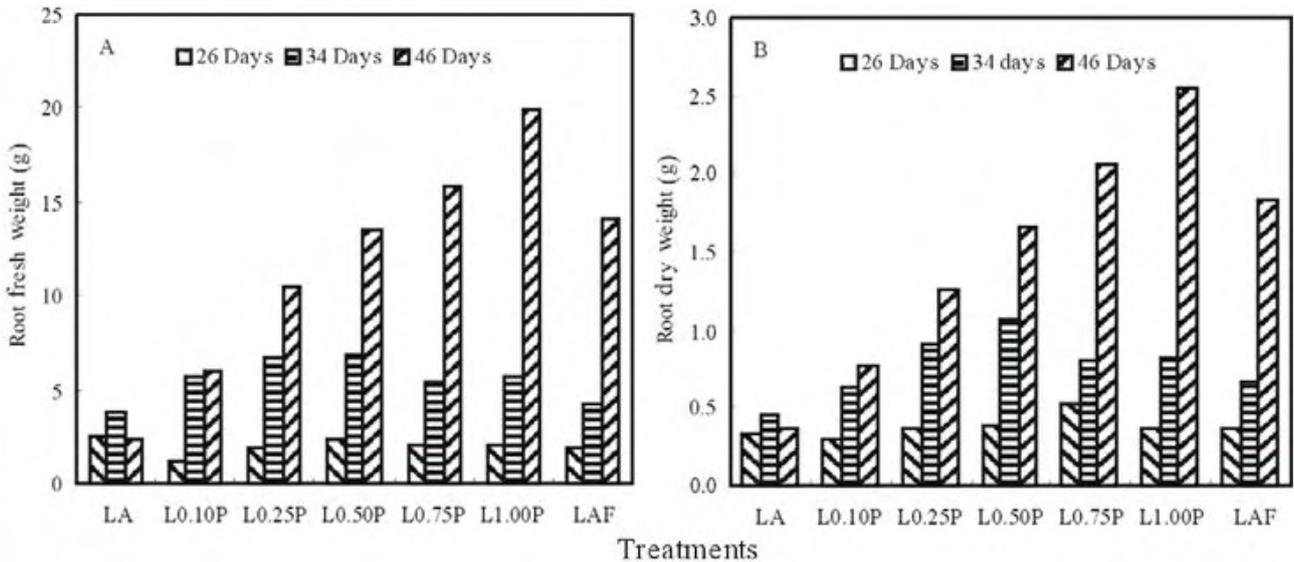


Fig. 131. Fresh weight (A) and dry weight (B) of root of maize grown in different amount of a coal bottom ash at different harvest dates.

② 신간척지 제염 및 재염 방지 토양구조 개선안

국내 간척지 토양의 이화학 특성과 관련하여 여러 문헌들을 조사한 바, 현재 국내 간척지는 염농도가 높고 모래와 미사가 많고 지하수위가 높아 배수가 불량하고 표토에 염분집적이 쉬울 뿐만 아니라 제염을 실시한 후 다시 지하수 상승 등에 의한 재염화현상이 발생할 우려가 매우 높다. 특히 5월부터 장마 이전 그리고 장마 이후 간척지 지표면에서 증발산에 따른 염상승과 알카리성 상태로 존재하는 토양에 대한 개선 방안이 매우 필요하다. 따라서 상기에서 조사 평가한 결과를 토대로 간척지를 효과적으로 이용할 수 있는 개선방향의 하나로 석탄바닥제를 활용한 골배수구조를 통한 제염 및 재염 방지 방안을 간척지에 적용하여 조기 토양 안정화를 통한 발작물 재배가 가능한 토양관리 방안을 제시하고자 한다. 이와 같은 토양구조개선 작업에 앞서 선결되어야 할 문제는 간척지 등에서 토양개선용으로 석탄바닥제를 활용 시 현재 일반 폐기물로 분류된 석탄바닥제의 재활용방안에 대한 정책적 지원 방안이 마련되어야 한다.

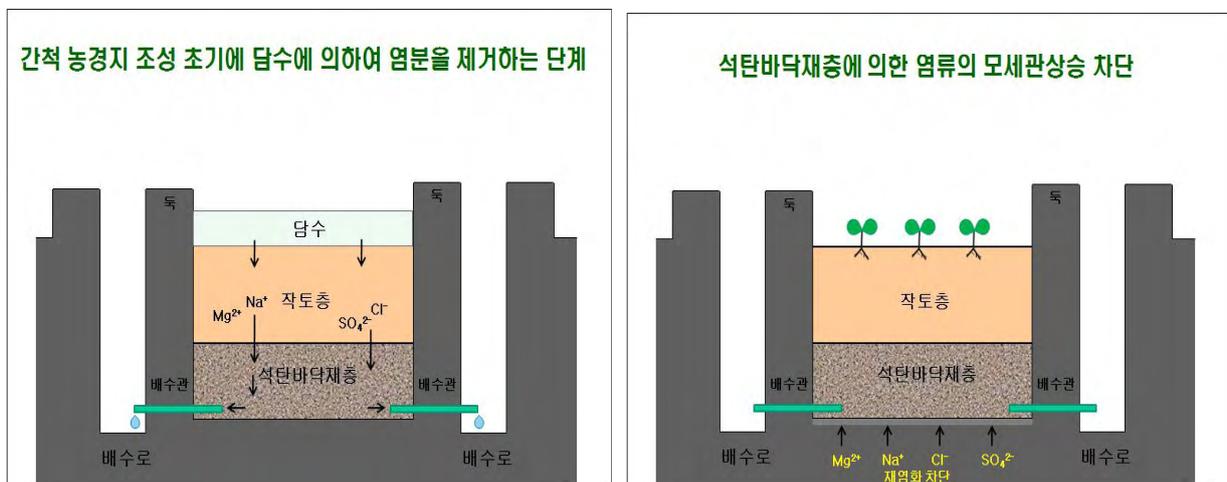
## 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

### 제 1 절 : 실용화 · 산업화 계획

1. 신간척지 발작물 재배를 위한 석탄바닥재 지원 농림부와 환경부에 시책 건의(2010년)
2. 간척지토양구조 개선 공정과 처리 소재에 대하여 농촌진흥청 등에 자료를 제공하여 향후 간척지 토양 개선 사업에 적용하도록 건의할 예정이다.
3. 국내 쌀 생산 과잉으로 인해 신간척지에서 발작물 재배가 중요시되고 있으나 간척지토양은 매우 높은 염농도를 가지고 있고, 수직배수 불량으로 인해 제염이 어려우며 또한 재염화 현상이 발생이 발행하여 발작물 재배가 곤란하므로 신간척지 기반조성 시 작토층 하부에 석탄바닥재를 소재로 한 대공극층을 형성하여 제염촉진 및 재염화 방지를 위한 석탄바닥재 활용 지원을 건의하였다. 단, 석탄바닥재는 입경선별 및 세척 등의 처리를 통해 대공극 확보 및 안전성이 입증된 자재를 활용하여야 하였다.
4. 영산강 간척지 토양에 다공체를 골배수제로 처리하는 실증시험 준비 중. 특히 현재 폐기물로 분류된 석탄바닥재의 활용방안과 거의 동일한 문제를 가지고 있는 간척지 제염과 재염방지를 위한 기술로서 한국농어촌 공사 등에 정보를 제공할 예정이다.
5. ㈜세와비전은 아미노산피복 대공극 다공체에 대한 현장 적용 시험을 통하여 자체 상품으로 최종 개발하여 상품화를 실시할 예정이다.

### 제 2 절 : 특허, 품종, 논문 등 지적재산권 확보계획

현재 2건의 특허를 출원하였으며 8편의 국내 등재학회지에 논문을 발표하였으며 이외 국내학술대회에서 10편의 구두발표 또는 포스터 전시를 실시하였다. 앞으로의 계획은 SCI급 국내외 학회지에 2편 정도의 논문을 제출할 예정이며 그리고 2012년 국내 학술대회에서 3편 정도의 구두 또는 포스터 발표를 예정하고 있다.



## 2. 논문

계재 연도	논문명	저자		학술지명	Vol. (No.)
		주저자	교신저자		
2010	Patterns of Leaching and Distribution of Cations in Reclaimed Soil according to Gypsum Incorporation Rate	유진희	정덕영	한국토양비료학회지	43(5)
2010	Leaching and Distribution of Cation in Multi-Layered Reclaimed Soil Column with Intermediate Macroporous Layer	유진희	정덕영	한국토양비료학회지	43(5)
2010	Application of Stable Isotopes in Studies of Gas Exchange Processes Between Biosphere and the Atmosphere	한광현		한국토양비료학회지	43(2)
2011	Effect of Soil Water Contents on Urea Hydrolysis and Nitrification in a Newly Reclaimed Tidal Soils	박미숙	정덕영	한국토양비료학회지	44(1)
2011	Breakthrough Curves and Miscible Displacement of Cadmium Through Double-Layered Soils of Reclaimed soils Macroporous Granule	정덕영	정덕영	한국토양비료학회지	44(1)
2011	Fate of Nitrogen Influenced by Circumstances of a Reclaimed Tidal Soils		정덕영	한국토양비료학회지	44
2012	Effects of bottom ash amendment soil an respiration and microbial biomass under anaerobic conditions	박종찬	한광현 정덕영	한국토양비료학회지	45(2)
2012	Effects of soil-amended bottom ash on decomposition rates of organic matter as investigated by an enforced-aeration respirometer	정석호	한광현 정덕영	한국토양비료학회지	45(2)

## 3. 특허 출원

출원 특허				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호
2010	바텀애쉬를 활성성분으로 함유하는 토양처리용 온실 가스 저감제	대한민국(농촌진흥청) 충남대학교 산학협력단 충북대학교 산학협력단	한국	102010010861
2011	간척지토양를 이용한 간척지 토양의 제염촉진 방법	대한민국(농촌진흥청) 충남대학교 산학협력단 충북대학교 산학협력단	한국	10-2011-0010090

## 4. 학술발표

다공성소재가 처리된 간척지 다층토주에서 염류의 모세관 상승 특성 (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

다공성소재와 Gypsum 처리 간척지 다층토주토양의 수리전도 특성 (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

논에서 퇴비단 여과 액비 처리에 의한 지구온난화가스 발생량 평가(2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

Bottom ash 처리에 의한 지구온난화 가스 발생 저감 및 탄소 저장량 증대 효과 규명 (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

항온배양실험을 통한 bottom ash, 유기물 처리가 CO<sub>2</sub> 발생량 및 토양 미생물상에 미치는 영향 평가. (2011 한국토양비료학회 추계학술발표회)

Bottom ash/유기자재 혼합처리가 토양 이화학성, 미생물 생체량 및 온난화가스 발생에 미치는 영향. (2011 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

Bottom ash 처리에 의한 지구온난화 가스 발생 저감 및 탄소 저장량 증대 효과 규명. (2010 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

새만금 간척지 토양특성 구분(2011 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

간척지 발 토양 경종적 염분상승 억제(2011 한국토양비료학회 춘계학술발표회)

Elution Patterns and Distribution of Salts from Multi-Layer Reclaimed Soils with Subsurface Layer of Porous Granule in Newly Reclaimed Saemangeum Tidal Area('10, 19 차 세계토양학회)

### 제 3 절 : 추가연구, 타 연구에 활용 계획

대공극 소재를 활용한 간척지 토층구조의 개선과 이를 통한 작물 생산성 증대 기술을 개발하기 위한 재료로 사용하는 석탄바닥재는 2012~2015 국립식량과학원 간척지농업과에서 주관하는 간척지 발작물 재배를 최적기술개발 중 간척지염분상승 억제기술 개발 세부과제의 재료로 석탄바닥재 외 연탄재, 파쇄목, 왕겨, 쇄석, 패각 등을 비교하는 재료로 사용할 계획임

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

한편 외국의 사례를 보면 일본에서는 일찍부터 노지채소, 시설국화와 같은 원예작물을 재배하기 위하여 배수기반 조성 시험을 수행하였다. 간척지 밭 뿐 만 아니라 일반 밭에서도 습해를 방지하기 위하여 기본 암거 및 보조 암거 시설에 관한 시험을 수행하였다. 일본에서는 주로 나가사키현 종합농림시험장에서 옥수수, 수수, 세스바니아 등을 재배하기 위하여 명거, 암거 등 제염 및 녹비작물에 의한 토양개량 시험을 수행하였다.

중국에서는 간척초기에 제염을 촉진하기 위해서 대규모 하천과 관정을 파거나 지대가 높아서 제염이 이루어진 곳에는 벼를 심고 낮은 곳에는 담수어 양식을 하는 등 현실적인 간척지 이용, 즉 실사구시 정신으로 간척지를 활용하고 있다. 한편 전 국토가 간척지로 구성되어 있는 네델란드에서는 이미 오래 전에 간척지 제염에 관한 연구를 끝마치고 지금은 개발한 기술을 종합하여 이집트, 인도, 아프리카 등 개발도상국에 염해지 토양 제염 및 개량에 관한 교육과 컨설팅을 실시하고 있는 상업화 단계에 이르렀다.

간척지에서 염분상승을 억제하는 방법으로는 휴립과 비닐 멀칭이 주로 검토되고 있다. 김과 유(1989)는 감자와 목화를 재배하면서 휴립, 퇴비 시용 후 휴립, 생고시용 후 휴립, 휴립 후 비닐 멀칭, 휴립 후 골 관수 등의 처리를 하여 그 효과를 비교하였다. 그 결과 감자 생육 기간 중 염농도의 변화는 수확기에 평휴 재배에서 0.63%상승하였지만, 휴립 후 멀칭한 곳에서는 0.42%로 염분의 상승이 억제되었다고 하였다. 이에 따라서 감자의 수량도 염분 상승이 억제된 비닐 멀칭구에서 증수 되었으며, 퇴비시용 후 휴립구에서도 증수의 효과가 있었다고 하였다. 목화 재배 시험구에서도 감자 재배 시험구에서와 비슷한 경향이었으나, 휴립 후 골관수구에서는 습해가 심하였다고 보고하였다.

이러한 결과를 토대로 이들은 간척지에서 밭작물 재배에 고품을 추천하고 있고, 또한 경운과 휴립은 추계에 실시하는 것이 바람직하다고 제언하고 있다. 한편, 최 등(1983)은 해남의 배수가 불량하고 점토함량이 많은 간척지에서 황토를 재료로 하여 두께 20~80cm로 복토를 하거나 모래 차단막을 지하에 설치하여 여러 가지 작물을 재배하면서 모래차단막과 복토의 효과를 얻을 수 있었다고 하였다. 기존 간척지에 대한 현장조사와 토양에 대한 분석결과 가장 문제가 되는 것이 염농도와 지하수위라고 알려져 있다.

따라서 신 간척지를 밭으로 이용하고자 할 때는 지하수위를 지표로부터 60cm이하 깊이로 낮추어 재염화가 쉽게 일어나지 않도록 하여야 하고, 이를 위하여 배수체계의 정비가 무엇보다도 시급하다고 하였으며, 투수성의 유지와 염과 토양양분의 균형, 그리고 관개수의 조절이 필요하다고 하였다. 또한 간척지의 작부체계를 세우기 위해서는 대상 작물에 대한 내염성뿐만 아니라 내습성도 고려해야 한다고 지적하였다.

외국의 간척지 사례를 살펴보면 일본 아키다현에 있는 하치로가타 간척지는 1966년에 방조제가 완공된 이후 1968년부터 영농이 시작되었으며, 내부공사를 진행한 다음 1977년 3월에 모든 공사가 완료되었다. 하치로가타 간척지 내에서 발생하는 유출수는 중앙간선배수로에 설치된 배수장을 통해 배출되고 있다. 한편, 담수호의 수위가 간척지보다 높기 때문에 관개용수는 간척제방에 설치된 취수구를 통해 유입되어 용수간선과 용수 지선을 통해 자동 관개하는 시스템을 갖춘 농업단지가 된 것이다.

이러한 농업기반을 조성한 결과, 농경지에서 발생하는 배출수는 집수구를 통해 배수장으로 도착하여 담수호로 양수한 후 다시 농업용 관개용수로 순환하여 이용하고 있어서 농업용수이용 효율 증진과 담수호 수질보전에 기여하고 있다. 이같이 잘 발달된 용수와 배수구조 시설에다 농가의 포장별로 개폐형 암거배수시설을 설치하여 식물의 근권으로 부터 지하위 염분수가 멀어지고 작물이 염분피해를 받지 않아 짧은 기간에 다양한 생물들이 자랄 수 있게 된다(이 등, 2004).

중국 산둥성(禹城)지구의 토양개량 5단계를 소개하면 다음과 같다. 즉 1단계에서는 50~60m 깊이의 관정수를 양수하여 지하수위를 낮추어 지하염분수의 상승을 막고 2단계에서는 4~5m의 배수기반(溝)을 조성하고, 3단계에서는 경사도 0~2%로 평탄작업(平)을 하고 4단계에서는 녹비작물 재배에 의한 토질을 향상시키고, 5단계에서는 녹화조림사업에 의한 표층토의 재염화를 방지하고 6단계에서는 작부체계 개선에 의한 작물생산성을 향상시키고 있다(이 등, 2003). 이곳에서는 천층 지하 염류수의 모관상승에 인한 재염화를 방지하고자 8ha당 1개의 관정을 20~30m 깊이 총 1,050개로 개발하여 양정용량은 시간당 60~80m<sup>3</sup>씩 양정하였다.

이와 같이 지하 염분수를 강제 양수함으로써 지하수중 염농도를 저하시키고, 천층 지하수의 증발을 억제하는 한편, 지하수층 공간형성에 의한 수직배수개선 효과가 있다고 하였다. 포장에서부터 간선 배수구까지 배수구 깊이별로 毛溝, 農溝, 斗溝, 支溝, 干溝를 설치하였다. 여기서 毛溝는 깊이 1.0~1.5m, 100m 간격으로 설치하고, 이들의 집수구에 農溝를 깊이 1.5~2.5m, 500m 간격으로 설치하였다. 또한 斗溝를 깊이 2.5~3.0m, 500~1,000m 간격으로 설치하고, 여기에 支溝를 깊이 3.0~3.5m, 2,000m 간격으로 설치하고, 마지막으로 깊이 4~5m의 干溝를 설치하여 배수를 개선하였다.

이러한 결과로 과거에는 높은 염농도와 수분함량으로 인하여 작물재배가 어려웠던 지역에서도 옥수수, 콩, 면화, 밀 등이 재배되고 있다. 또한 녹화조림사업에 의한 표층토의 재염화 방지 사업에 의하여 염해지구에 포플러 등 수목을 4×10<sup>6</sup>주 식재하고, 4관목 2.5×10<sup>6</sup>주, 과수원 250ha를 조성한 결과 수목류의 증산작용에 의한 지하염분수의 지하수위가 저하되어 수직적 배수가 개선되고, 일평균 온도는 0.7~0.9℃ 낮아지고, 상대습도는 5~15% 증가함에 따라 토양 표

면증발량이 10~18% 저하되어 결과적으로 재염화가 방지되었다. 최근에는 지하관개라는 새로운 기술이 개발되고 있다.

이것은 지하에 유공관을 매설하고 장마기에는 배수구 역할을 하여 습해를 방지하고 건조기에는 이를 통해 관수를 함으로써 염분의 상승을 억제하는 기술이다. 그러나 지하관개에 의한 제염방법도 극심한 가뭄기에는 토양 하층으로부터 올라오는 염을 막지 못하기 때문에 안정적인 발작물을 재배하기 위해서는 석탄바닥재와 같은 다공성 물질을 활용하여 대공극 층위를 형성함으로써 재염화 현상을 막을 수 있을 것으로 생각된다.

## 제 7장 참고문헌

- 고태훈, 이성진, 신민호, 김병석, 이제근, 이태운, 2010, 바텀애쉬의 유해물질 함량 측정 및 용출특성 평가연구, 한국지반환경공학회 논문집, 11(6):77-83
- 고태훈, 이성진, 신민호, 김병석, 이제근, 이태운, 2010, 바텀애쉬의 유해물질 함량 측정 및 용출특성 평가연구, 한국지반환경공학회 논문집, 11(6):77-83
- 구자용, 남우. 1986. 염해토양개량에 있어서 수리전도도의 영향. 전북대학교 농대논문집 17:129-135.
- 구자용, 손재권, 최진규, 이동욱, 송재도. 2002. 간척지 토양의 제염예측 프로그램 개발. 한국농촌계획학회지 8:33-40.
- 구자용, 은종호. 1988. 간척지토양의 제염과정중 수리전도도의 변화. 한국농공학회지 30:85-93.
- 구자용, 최진규, 손재권, 윤광식, 이동욱, 조경훈. 2001. 간척지토양의 제염과정중 전기전도도 분석. 한국농공학회지 43:37-49.
- 구자용, 최진규, 손재권. 1998. 우리나라 서해안 간척지 및 간척지 토양의 이화학적 특성. 한국토양비료학회지 31:120-127
- 구자용, 한강완, 손재권, 이동욱. 1992. 간척지 발작물의 정상생육을 위한 관개용수량 및 물 관리방법의 결정. 한국농공학회지 34:80-96.
- 구자용, 한강완, 은종호. 1989. 간척지토양의 제염용수량산정에 관한 실험연구. 한국농공학회지 31:96-105.
- 구자용, 한강완, 은종호. 1989. 새만금지구 간척지토양의 염분거동해석 및 제염효과분석을 위한 실험적연구. 한국농공학회지 31:92-103.
- 김상수, 이선용, 한규홍, 어임수. 1997. 계화도 간척지에서 암거배수가 토양의 염분농도와 비의 생육 및 수량에 미치는 영향. 한국작물학회지 42:61-67.
- 김수경, 이태운, 2009, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집, 한국지반환경공학회, 2009(9):348-352
- 김수경, 이태운, 2009, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집, 한국지반환경공학회, 2009(9):348-352
- 김정갑, 한민수. 1990. 간척지 사료작물 재배에 있어서 모래를 이용한 토양 mulching의 효과. II. 간척지 재배목초의 생육 및 건물축적형태와 사료가치에 관한 연구. 한국초지학회지 10:77-83.
- 김필주, 이도경, 정덕영. 1997. 깊이별 용적밀도가 다른 시설재배지 토양의 염류분포. 한국토양비료학회지 30:226-233.
- 농어촌진흥공사. 1995. 한국의 간척.
- 농촌진흥청 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법.

- 류순호, 이상모. 1988. 간척지 제염과정에서 일어나는 토양의 수리전도도와 유출액의 화학적 특성변화에 관한 실험적 연구. 한국토양비료학회지 21:3-10.
- 류철현, 양창휴, 김택겸, 유진희, 정지호, 강승원, 김재덕, 정광용. 2007. 계화간척지 논토양의 물리화학적 특성 및 영농실태. 한국토양비료학회지 40:109-113.
- 문용택, 1994, 煉炭灰 및 Fly Ash 廢棄物을 原料로 한 Zeolite 合成과 特性에 關한 研究, 건국대학교 대학원 농화학과, pp 52-62
- 문용택, 1994, 煉炭灰 및 Fly Ash 廢棄物을 原料로 한 Zeolite 合成과 特性에 關한 研究, 건국대학교 대학원 농화학과, pp 52-62
- 민기식, 1996, 石炭재가 麥酒麥 生育과 收量에 미치는 影響, 경상대학교 대학원 농화학과, pp 2-5
- 민기식, 1996, 石炭재가 麥酒麥 生育과 收量에 미치는 影響, 경상대학교 대학원 농화학과, pp 2-5
- 백승현, 2007, 석탄회의 성토 및 매립재로서의 활용에 관한 연구, 한양대학교 공학대학원, vi:54
- 백승현, 2007, 석탄회의 성토 및 매립재로서의 활용에 관한 연구, 한양대학교 공학대학원, vi:54
- 손보균, 이돈진, 박범기, 채광식. 2007. 간척지 논의 부산석고비료 시용효과. 한국토양비료학회지 40:145-150.
- 손재권, 구자웅, 최진규, 송재도. 2000. 간척초기답의 제염용수량 결정을 위한 기초연구. 한국농공학회지 42:55-62.
- 손재권, 구자웅, 최진규. 1994. 간척지 발작물의 관개용수량 추정을 위한 토양염분예측모형 개발. 한국농공학회지 36:96-110.
- 손재권, 구자웅, 최진규. 2000. 간척 초기답의 벼 생육기간중 염분농도 분석. 한국농촌계획학회지 6:3-11.
- 손재권, 구자웅, 최진규. 2001. 석고처리에 의한 간척지토양의 제염효과. 한국관개배수학회지 8:70-79.
- 손재권, 구자웅, 최진규. 2002. 개발초기 간척답의 관개용수량 산정에 관한 연구. 한국농촌계획학회지 8:26-40.
- 심종성, 강태성, 이현기, 이규석, 2010, 폐석탄회의 숯크리트 적용성 평가, 공학기술논문집, 20:72-73
- 안지환, 임미희, 2009, 소각바닥재의 재활용 현황과 염화물이 환경에 미치는 영향, 한국지구시스템공학회지, 46(1):97-107
- 오영택, 류순호, 정영상, 홍종운, 박천서. 1976. 담수 토양계에서 염분의 일차원적 확산. 한국토양비료학회지 9:1-8.
- 오왕근. 1990. 개흙의 제염과 세척수량. 한국토양비료학회지 23:114-118.
- 오왕근. 1990. 석회의 종류와 해성간척지 토양의 제염. 한국토양비료학회지 23:107-113.

- 오왕근. 1991. 개흙의 제염에 미치는 벚짚, 석회의 병용효과. 한국토양비료학회지 24:35-40.
- 윤명근, 2010, Immobilization of soil bacteria with coal bottom ash for using as microbial carrier, 경상대학교 대학 응용생명과학부, iv:55
- 윤원섭, 2010, 연약지반개량재료로서 저희의 활용에 대한 실험 연구, 수원대학교 대학원 토목공학과, pp 5-12
- 윤종희, 1992, Fly ash 施用이 水稻의 收量과 논 土壤의 有效珪酸含量에 미치는 影響, 전남대학교 대학원 농화학과, pp 3-11
- 은종호, 구자웅. 1988. 간척지토양의 제염과정중 전기전도도와 치환성소듐백분률 및 pH 사이의 관계. 한국농공학회지 30:127-133.
- 이명헌, 2011, 저탄소 녹색성장과 산업의 잠재성과에 관한 실증분석, 한국환경경제학회 한국자원경제학회, 자원 환경경제연구, 20(1):99-120
- 이종식, 김종구, 류철현, 강종국, 김호중. 1991. 간척지 발토양의 염분이동에 관한 연구. 한국토양비료학회지 24:28-34.
- 이창호, 2011, 매립 저희를 재활용한 혼합토의 강도 특성, 단국대학교 대학원 토목공학과, iii:62
- 이한백, 2011, 산업부산물을 활용하여 제조한 저흡수 인공경량골재의 물리적 특성에 관한 연구, 건국대학교 건축공학과, xii:197
- 조성진, 박천서, 엄대익 등 11명. 2003. 4정 토양학. 향문사.
- 조영길, 조인상, 엄기태. 1992. 신간척지에서 근권의 염농도 저하 방법이 토양특성과 작물생육에 미치는 영향. 한국토양비료학회지 25:127-132.
- 한국농촌공사. 2007. 기반조성사업 2007 사업현황.
- 한우종, 2008, 준설토와 Bottom ash 재활용을 위한 무보강 및 섬유 보강 복합지반재료의 역학적 특성 비교, 부경대학교 대학원 해양공학과, pp 3-8
- 호남농업시험장. 2002. 한국의 간척지농업.
- 호남농업연구소. 2007. 간척지 농토양 관리기술.
- 황남열, 류정, 나종성, 오동훈, 박건호, 최봉주. 1991. 계화도 간척지 토양의 년도별 염분함량 변화. 한국토양비료학회지 24:265-271.
- A.K. Gupta et al., 2007, Metal accumulation and growth performance of Phaseolus vulgaris grown in fly ash amended soil, Bioresource Technology Volume 98, Issue 17, December 2007, pp 3404 - 3407
- Al-Rashidi, R. K. and Al-Jabri, M. M. 1990. 'Nitrification and urea hydrolysis in amended calcareous saline soils', Arid Land Research and Management, 4.4:243-252.
- C.W. Kwonga, C.Y.H. Chao, 2009, Fly-ash products from biomass co-combustion for VOC control, Bioresource Technology Volume 101, Issue 3, February 2010, pp 1075 - 1081
- C.W. Kwonga, C.Y.H. Chao, 2009, Fly-ash products from biomass co-combustion for VOC control, Bioresource Technology Volume 101, Issue 3, February 2010, pp 1075 - 1081
- J.R. Pichtel, 2003, Microbial respiration in fly ash/sewage sludge-amended soils,

- Environmental Pollution Volume 63, Issue 3, 1990, pp 225 - 237
- K.S Sajwan, 2003, Assessing the feasibility of land application of fly ash, sewage sludge and their mixtures, Advances in Environmental Research Volume 8, Issue 1, October 2003, pp 77 - 91
- L. Reijnders, 2004, Disposal, uses and treatments of combustion ashes: a review, Resources, Conservation and Recycling Volume 43, Issue 3, February 2005, pp 313 - 336
- Nicholas T. Carlina et al., 2009, The economics of reburning with cattle manure-based biomass in existing coal-fired power plants for NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions control, Biomass and Bioenergy Volume 33, Issue 9, September 2009, pp 1139 - 1157
- O.N. Belyaeva, R.J. Haynes, 2009, Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash, Bioresource Technology Volume 100, Issue 21, November 2009, pp 5203 - 5209
- Prashanta K Sarangi et al., 2000, Soil biochemical activity and growth response of rice *Oryza sativa* in flyash amended soil, Bioresource Technology Volume 76, Issue 3, February 2001, pp 199 - 205
- S. Mukhtara et al., 2007, Acidic and alkaline bottom ash and composted manure blends as a soil amendment, Bioresource Technology Volume 99, Issue 13, September 2008, pp 5891 - 5900
- Sadhna Tiwari, Babita Kumari, S.N. Singh, 2007, Evaluation of metal mobility/immobility in fly ash induced by bacterial strains isolated from the rhizospheric zone of *Typha latifolia* growing on fly ash dumps, Bioresource Technology Volume 99, Issue 5, March 2008, pp 1305 - 1310
- Sarah Jamil, 2009, Fly ash trapping and metal accumulating capacity of plants: Implication for green belt around thermal power plants, Landscape and Urban Planning Volume 92, Issue 2, 15 September 2009, pp 136 - 147
- Sharada S. Patia, Sanjat K. Sahu, CO<sub>2</sub> evolution and enzyme activities (dehydrogenase, protease and amylase) of fly ash amended soil in the presence and absence of earthworms (*Drawida willsi* Michaelsen) under laboratory conditions, Geoderma Volume 118, Issues 3 - 4, February 2004, pp 289 - 301
- Tracy Punshon, 2002, Restoration of drastically eroded land using coal fly ash and poultry biosolid, Science of The Total Environment Volume 296, Issues 1 - 3, 16 September 2002, pp 209 - 225
- Vimal Chandra Pandey, 2009, The Indian perspective of utilizing fly ash in phytoremediation, phytomanagement and biomass production, Journal of Environmental Management Volume 90, Issue 10, July 2009, pp 2943 - 2958
- Vimal Chandra Pandey, Nandita Singh, 2009, Impact of fly ash incorporation in soil systems, Agriculture, Ecosystems & Environment Volume 136, Issues 1 - 2, 15 February

2010, pp 16 - 27

Vlek PLG and Craswell ET. 1979. Effect of nitrogen source and management on ammonia volatilization losses from flooded rice-soil systems. *Soil Sci Soc Am J* 43, 352-358

Vlek PLG and Stumpe JM. 1978. Effect of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems. *Soil Sci Soc Am*

Vlek PLG, Hong CW, and Youngdahl LJ. 1979. An analysis of N nutrition on yield and yield components for the improvement of rice fertilization in Korea. *Agron J* 71, 829-833

Vlek PLG, Stumpe JM, and Byrnes BH. 1980. Urease activity and inhibition in flooded soil systems, *Fertilizer Research* 1, 191-202

Y.L Bi et al., 2003, Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash, *Chemosphere* Volume 50, Issue 6, February 2003, pp 863 - 869

Y.L Bi et al., 2003, Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash, *Chemosphere* Volume 50, Issue 6, February 2003, pp 863 - 869

## 주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 농림개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 농림개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.