

발간등록번호

11-1543000-004468-01

「태양광발전시설을 장기간 설치할 수 있는
간척농지 판정기준 개선방안 연구」
연구용역 최종보고서

2022. 03.



농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부장관 귀하

본 보고서를 “태양광발전시설을 장기간 설치할 수 있는 간척농지
판정기준 개선방안 연구” 최종보고서로 제출합니다.

2022년 03월

강원대학교산학협력단장

장 철 성

사업수행자

참여기관: 강원대학교

연구책임자: 양재의 (강원대학교)

공동연구원: 정덕영 (충남대학교)

최우정 (전남대학교)

김혁수 (강원대학교)

윤정환 (강원대학교)

요약문

I. 연구용역 개요

1. 연구용역명: 태양광발전시설을 장기간 설치할 수 있는 간척농지 판정기준 개선방안 연구

2. 과업의 목적

- 농지법에서 제시한 현행 간척농지 판정기준에 대해 적정성을 검토하고 다양한 요인 (토양 특성, EC 측정방법 및 횡수, 벼 수량, 관개용수 등)을 종합적으로 반영하여 과학적 근거에 따른 판정기준 개선방안을 제시하고자 함

3. 주요 연구 내용

- 주요 연구수행 내용은 국내외 토양염도 분석법 및 기준, 토양염도와 수량과의 관계, 토심 및 시기에 따른 토양 염도 특성 등을 조사하고, 이를 바탕으로 현행 간척농지 판정기준의 적정성 및 개선안을 제시하였음
 - 간척지 분포 및 일반적 특성 조사
 - 국내외 토양염도 기준 조사
 - 토양염도 분석법 검토
 - 토양염도와 수량과의 관계 분석
 - 간척지 토양 표토와 심토의 염농도 특성 분석
 - 시기별 토양염도 변화 조사
 - 간척지 토양 경작 적합도 분류 기준 설정
 - 태양광발전시설 설치를 위한 간척농지 판정기준 개정(안) 제시

4. 연구 추진체계

- 연구진은 간척지 토양에 대해 다수의 선행연구를 수행한 경험이 있는 토양 전문가로 구성되었으며, 상시 회의를 통해 지속적으로 연구결과 및 정보를 공유하였음
- 농어촌공사, 국립농업과학원, 국립식량과학원, 대학의 간척지 토양 관련 전문가와의 자문회의를 개최하여 연구 결과에 대한 자문을 얻었음

II. 주요 연구결과

1. 간척지 분포 및 일반적 특성 조사

- 현재 국내 간척지는 부산, 제주지역을 제외한 경기·인천부터 전남 해안에 이르기까지 크게 12개 지구로 구분되며, 지역별 간척지 분포면적은 전남지역이 45,553ha로 약 33.7%를 차지하고 있으며 이어 전북 26.6%, 충남 21.8%, 경기 16.4% 순으로 간척지가 분포하고 있음
- 간척지 토양은 지하수위가 높고, 토양 배수가 대체로 불량하며 건조시 염분이 작토층으로 상승하는 재염화가 반복되는 특성을 가지고 있음. 일반 농경지보다 표층(A층)이 10cm 내외로 얇음
- 간척지역별 작물재배 면적 현황을 살펴보면 조사된 전체 재배면적의 약 76.3%가 수도 재배를 실시하고 있으며 사료작물이 20.4%, 그리고 콩 맥류 등 밭작물 재배면적은 조사된 재배면적의 약 1.71%인 것으로 조사됨

2. 국내외 토양염도 기준 조사

- FAO나 USDA, 농어촌공사 등 염농도를 이용해 토양을 분류하고 있음

	일반토양	염류토양	강염류토양	극염류토양
염농도(dS/m)	<4	4-8	8-16	>16
작물 영향	제한 없음	일반적인 작물 생육 제한	곡류 작물 생육 제한	대부분의 작물 생육 제한

- 작물 생산성에 따른 토양염도 기준으로 FAO는 EC_e 기준으로 3.0 dS/m부터 생산성이 감소하기 시작하여 5.5 dS/m 일 때 일반농경지 대비 70%의 생산성을 기대할 수 있다고 제시하였고, 농촌진흥청은 벼 재배 적합 염도 기준을 2.0 dS/m 이하로 제시하며, EC 2.0~4.5 dS/m에서 물, 양분 관리(투입증가)를 통한 재배를 추천함. 식량과학원은 토양염도 4.7~6.3 dS/m 수준에서 벼 수량이 38% 감소한다고 보고함.

3. 토양염도 분석법 검토

- FAO와 USDA는 토양포화반죽 침출액(EC_e) 분석방법을 토양 염도별 작물 수량 감소 예측에 활용하고 있지만, 이 방법은 측정자별 오차가 커 정확한 포화수분함량 측정에 어려움이 있고, 분석에 많은 시간이 소요됨
- 우리나라를 비롯한 FAO, 미국 등 여러 국가에서 물론 토양-증류수 혼합 비율을 달리 한 EC_{1:1}, EC_{1:2}, EC_{1:5} 등 다양한 방식으로 측정하고 있으며, 토양-증류수 혼합 비율이

1:5인 $EC_{1:5}$ 를 주로 사용하고 있음

- 염류 토양의 $EC_{1:1}$, $EC_{1:2}$ 또는 $EC_{1:5}$ 와 EC_e 의 상관관계는 매우 다양하며, 이는 토양 특성 및 지역에 따라서도 큰 차이가 있음

4. 토양염도와 수량과의 관계 분석

- 식물은 한계 염농도를 넘으면 생육이 저하되며 그 정도는 식물의 종류 및 재배환경 (토양 등)에 따라 차이가 있음
- 일반적으로 벼는 염류에 매우 민감한 작물로 토양의 전기전도도가 EC_e 기준 3.0 dS/m를 초과하면 수량 손실이 발생함. 예로 EC_e 가 3.5 dS/m 이상이면 10%의 수량 감소가 발생하고 50% 정도의 수량 감소가 발생하는 EC_e 값은 7.2 dS/m 정도로 알려져 있음
- 간척지에서 토양 염도는 주요한 생육 저해 요인이지만 시비관리, 석고 시용, 유기물 투입, 경운 관리, 파종량, 관개용수 염농도, 관개 빈도와 배수 등에 의해서도 생산량은 크게 달라짐

5. 간척지 토양 표토와 심토의 염농도 특성 분석

- 한국농어촌공사에서 34개 필지를 지표면으로부터 토심 100 cm까지 20 cm 간격으로 EC_e 를 조사한 결과, EC_e 값은 토심에 따라 뚜렷하게 증가함
 - 토심이 증가할수록 EC_e 는 0-20 cm와 비교하여 20-40 cm(1.5배) → 40-60 cm(2.1배) → 60-80 cm(2.8배) → 80-100 cm(3.8배)로 증가
- 간척농지 태양광발전시설 설치를 위해 신청된 결과를 분석한 결과 표토와 심토의 토양 염도 평균값은 표토가 심토의 2/3 수준인 것으로 나타났으며, 담수기의 EC 10 dS/m 이하만을 모아놓은 결과에서 표토 대비 심토가 1.67배 높은 유의한 상관관계($R^2=0.6709$)가 있음을 찾아냈고 이를 이용하면 표토 기준을 이용해 심토 기준을 설정할 수 있을 것으로 판단하였음

6. 시기별 토양염도 변화 조사

- 토양 염농도 자동계측기를 이용해 장기간 토양 염농도를 분석한 결과, 0-20 cm의 EC_e 는 영농기에는 감소하고 수확기 이후에는 다시 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 40-80 cm 깊이의 EC_e 는 2-3년간 큰 변화가 없는 것으로 나타남
- 현재 기준인 심토(30-60 cm)는 경시적 변화가 적은 토양층으로 언제나 시료 채취 및 염도 분석을 실시하더라도 편차가 적어, 사업 진행에 용이할 것으로 판단됨

7. 간척지 토양 경작 적합도 분류 기준 설정

- 농업생산성 손익분기점 산정결과 경영비 484,522원이 도달하는 10a 당 206 kg이며, 70% 쌀 수확량은 약 306 kg으로 가격은 약 79.5만원으로 손익분기점 대비 약 36.9만원 수익이 발생함. 손익분기점에서의 토양의 염도(EC_e)는 약 8.27 dS/m 정도로 추정됨
- 용탈요구도, 석력함량, 토양오염도, 관개용수 수질 등에 대해 기준 설정 관련 자료를 수집 및 정리하였으며, 식물 생육과 큰 관계가 있음을 실험적인 조건에서 확인할 수 있었으나 태양광 관련 간척농지 판정기준으로 선정하기에는 현재 이와 관련된 국내 database가 부족한 실정이며, 현행 분석항목 외에 추가로 분석해야 하는 항목들이기에 이로 인해 발생하는 비용 및 시간 등 현실적인 문제가 있음

8. 태양광 발전시설을 위한 간척농지 판정기준 개정(안) 설정

- 조사한 자료를 종합하여 간척농지 판정기준의 염농도, 분석방법, 토양심도, 채취시기, 예외사항에 대해 항목별 개정 방안과 근거를 정리하였음
- 판정기준의 항목별 개정 방안을 조합하여 최종적으로 4개의 간척농지 판정기준 개정(안)을 제시하였음

	염농도	측정 방식	예외사항
현행	5.5 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 예외적으로 토양염도 측정결과서를 반영하여 표토값 적용 가능
1안	7.5 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 표토와 심토 중 하나만 기준을 초과하여도 허가할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 논 토양 적성등급이 3급지 이하인 경우 - 석력 함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역
2안	9.2 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 표토 염도가 4.5 dS/m 이하일 경우 심토 기준을 초과하여도 불허할 수 있음
3안	5.5 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 예외적으로 토양염도 기준을 초과하여도 불허할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 논 토양 적성등급이 2급지 이상인 경우 - 간척시기가 준공 후 20년이 경과하였으며, 염해 피해 이력이 없는 경우 - 석력 함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역
4안	5.5 dS/m ~ 7.5 dS/m (지역별 토양특성 고려)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 다만, 이를 위해 '22년 말까지 전남도/충남도 등 지역별 간척지 표토/심토 속성과 상관관계를 추가 분석하고, 해당 지자체 의견을 수렴하여 세부 개선 방안을 구체화할 필요 * 시·군·구 등 권역을 세분화할 경우 간척농지 판정기준이 너무 많아지게 되어 발전사업자 등에 혼선을 야기할 우려가 있어, 주요 간척지가 밀집한 전남·충남 등 '도' 단위로 기준을 구체화하는 것이 바람직

목 차

요약문	I
목차	V
그림 목차	VI
표 목차	VIII
제1장. 연구 개요	1
1. 연구 필요성	1
2. 연구 목적	2
3. 연구 추진체계	3
제2장. 연구 내용 및 방법	4
1. 간척지 분포 및 일반적 특성 조사	4
2. 국내외 토양염도 기준 조사	4
3. 토양염도 분석법 검토	4
4. 토양염도와 수량과의 관계 분석	5
5. 간척지 토양 표토와 심토의 염농도 특성 분석 및 염해 기준 설정 근거 제시	5
6. 시기별 토양염도 변화 조사	5
7. 간척지 토양 경작 적합도 분류 기준 설정	5
제3장. 연구 결과	6
1. 간척지 분포 및 일반적 특성 조사	6
2. 국내외 토양염도 기준 조사	17
3. 토양염도 분석법 검토	21
4. 토양염도와 수량과의 관계 분석	28
5. 간척지 토양 표토와 심토의 염농도 특성 분석	36
6. 시기별 토양염도 변화 조사	40
7. 간척지 토양 경작 적합도 분류 기준 설정	41
8. 태양광 발전시설을 위한 간척농지 판정기준 개정(안) 설정	67
제4장. 결론	73
참고문헌	75

그림 목차

그림 1. 국내 간척지구 분포도	6
그림 2. 영산강 간척지 토양통별 토양단면 특성	12
그림 3. 우리나라 19개 간척지구 626점 토양 시료의 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 상관관계	23
그림 4. 우리나라 8개 국가 관리 간척지구 토양 시료의 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 상관관계	24
그림 5. 우리나라 11개 민간 매각 간척지구 토양 시료의 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 상관관계	25
그림 6. 간척지구 토양 시료의 모래 함량과 환산 계수의 상관관계	26
그림 7. 염해 내성 최저-최고 전기전도도에 따른 작물 생산성 (Maas and Hoffman, 1977; FAO, 2002)	29
그림 8. 토양염도에 따른 분얼(좌) 및 유수형성(우) 특성 (Grattan et al., 2002)	30
그림 9. 토양염도에 따른 수도생육(좌)와 수량생산성(우) (Grattan et al., 2002)	31
그림 10. 토양의 전기전도도에 따른 수량생산성 (Grattan et al., 2002)	32
그림 11. 염류 토양 EC_e 에 따른 벼 상대 수량 감소율	33
그림 12. 우리나라 전남 지역 간척농지의 $EC_{1.5}$ 변화에 따른 벼 백미 수량 변화 (Lim et al., 2020)	33
그림 13. 우리나라 16개 간척지구 153개 필지 대상으로 조사한 표토(0-20 cm)와 심토(20-40 cm)의 $EC_{1.5}$ - EC_e 와 벼 수량 상관관계	34
그림 14. 염류 토양에서 영농관리 조건에 따른 벼 수량 지수(기준 100) 변화 (Lim et al., 2020)	35
그림 15. 주요 간척지구 필지(34개)의 토심별 EC_e 변화 및 0-20 cm 기준 상대적 EC_e 비율	36
그림 16. 경작년수에 따른 토양염류도 추정	37
그림 17. 표토와 심토 EC 관계	38
그림 18. 담수여부에 따른 표토와 심토 EC 관계 (좌: 비담수기; 우: 담수기)	38
그림 19. 담수기 EC 10 dS/m 이하에서의 표토와 심토 EC 관계	39
그림 20. 영산강 III-1 지구 농경지 필지의 토심별 EC_e 장기 변화	40
그림 21. 쌀생산량에 대한 가격	42
그림 22. 입경크기에 따른 토양 입자 분류표	42

그림 23. 간척지 지표면에 노출된 석력과 석력크기별 분류	43
그림 24. 토양입자 입경크기에 따른 토양 내 입자분포 배열과 구조	43
그림 25. 수도재배시기별 물관리 기준	44
그림 26. 토성별 포화수리전도도 변화 특성	45
그림 27. 용적밀도별 공극율 상관관계	45
그림 28. 자갈함량에 따른 용적밀도와 K_s 변화	45
그림 29. 공식을 적용한 미사질양토(좌)와 다양한 토성의 K_s	46
그림 30. 토양 3각 도표	48
그림 31. 전남 해남 영산강 간척지 지표면 암석 노출 현장(좌)과 지하수 개발 현장(우)	49
그림 32. 석력함량별 포화수리전도도 (K_s) 변화	52
그림 33. 석력함량별 상대적 공극크기별 분포 비율 (Jiangwen Li, 2020)	52
그림 34. 석력함량과 혼합정도에 따른 포화수리전도도 변화 (Zhang et al., 2009)	53
그림 35. 석력크기와 분포함량별 공극율 변화 특성 (Zhang et al., 2009)	53
그림 36. 다층구조 토양의 실질포화수리전도도 환산 공식	54
그림 37. 점토와 석력 비율에 따른 K_s 변화	56
그림 38. 석력함량비율을 구하기 위한 토양시료 채취 방법	57
그림 39. 세척법에 의한 석력분리 방법	58
그림 40. 관개용수 염도에 따른 토양 염도 변화 (Arjen de Vos et al., 2016)	62
그림 41. 관개용수 염도에 따른 토양 공극수 염도 변화 (Arjen de Vos et al., 2016)	63
그림 42. 용탈분획율 (leaching fraction, LF)에 따른 관개용수 수질과 토양염도와의 상관성(Ayers and Westcot, 1985)	65

표 목차

표 1. 지역별 간척지구 현황	7
표 2. 국내 지역별 간척지 분포면적 (1965년 대규모 간척지 개발 사업 이후)	7
표 3. 경기, 인천 지역 간척지구 면적과 토양통 현황	7
표 4. 충남 지역 간척지구 면적과 토양통 현황	8
표 5. 전북 지역 간척지구 면적과 토양통 현황	9
표 6. 전남 지역 간척지구 면적과 토양통 현황	10
표 7. 경남, 부산, 제주 지역 간척지구 면적과 토양통 현황	11
표 8. 간척지 지역별 토성과 면적	12
표 9. 국내 대표 간척지 10개 지구의 표토(A층) 깊이	13
표 10. 간척지구별 상존 지하수위	13
표 11. 간척지구별 지하수 전기전도도	14
표 12. 간척지구별 표층과 심층의 화학성과 수용성 이온 분포 특성	15
표 13. 간척지 토지 이용 현황 (국립식량과학원, 2013)	15
표 14. 간척지역별 작물재배 현황	16
표 15. 염류토양 분류기준 (FAO, USDA, 농어촌공사 등)	17
표 16. 토양 염농도 상태 분류 (Smith and Doran, 1996)	17
표 17. 토양염도에 따른 벼 생산성 기준 (FAO, 1985)	18
표 18. 논토양의 적성등급 기준 (농촌진흥청)	20
표 19. 국내 주요 기관의 EC 측정 방법	21
표 20. 국외 주요 기관의 EC 측정 방법	22
표 21. EC _{1.5} 와 EC _e 상관관계 문헌 자료	23
표 22. 19개 간척지구별 EC _{1.5} → EC _e 환산계수	25
표 23. 토성별 EC _{1.5} 와 EC _e 상관관계 (Gibbs, 2000)	26
표 24. 염농도별 재배가능 작물	28
표 25. 포화침출법에 근거한 근권 평균 염류농도 기준 (Rhoades et al. 1992)	28
표 26. 주요 작물의 내염성 한계 (Smith and Doran, 1996)	29
표 27. 벼 생육단계별 성장장애 한계농도 (三重顯, 1954)	30

표 28. 벼 생육단계별 성장장애 한계농도 (USDA, 2011)	31
표 29. 토양 EC _e 에 따른 벼 상대작물수확량 ($Y = -9.1X + 117.84$)	32
표 30. 태양광 간척농지 일시사용으로 신청된 토양 분석결과	37
표 31. 10a당 쌀생산량 및 총소득 (2016-2020)	41
표 32. 쌀재배농가 소득 평가 (2016-2020)	41
표 33. 토성별 포화수리전도도	45
표 34. 토성별 포화수리전도도(Ks)에 따른 유속 및 유속에 따른 담수심 (7cm) 보수일 수	47
표 35. 해남 산이면 영산강 III-2 단지 토양통 및 통별 토층분화 특성	48
표 36. 수도재배 토지이용 적성등급기준	50
표 37. 석력크기별 함량에 따른 등급 기준	51
표 38. 석력함량 등급별 재배 작물	51
표 39. 연계 토성 조건에 따른 포화수리전도도	55
표 40. 석력크기별 함량에 따른 등급 기준	56
표 41. 논토양의 적성등급 기준(제주도 비화산회 토양 제외)	57
표 42. 토양환경보전법 제1조의5 시행규칙 토양오염우려기준 (개정 2022. 1. 21.)	59
표 43. 농업용수 수질환경기준	60
표 44. 관개용수 수질 지침	61
표 45. 환경부 농업용수 수질환경기준	62
표 46. 중서부 간척지구 농업용수 수질 특성	64

제1장 연구 개요

1. 연구 필요성

- 2019년 7월 1일 시행된 개정 농지법에 따라 간척농지에 타용도 일시사용허가를 받아 태양광발전시설을 최장 20년(최초 5년, 연장 15년) 임대 사용 가능토록 함
- 농지법에 따른 현행 간척농지의 판정기준은 심토(30-60 cm)를 1:5 분석법으로 측정하여 EC 5.5 dS/m 이상이며, 이 값을 초과할 경우 태양광발전시설을 장기간 설치할 수 있음. 이 기준인 EC 5.5 dS/m 이상은 FAO에서 제시한 토양 염도 (EC_e)에 따른 쌀의 70% 감수율 기준에 따르고 있음.
- 현재 간척농지를 경작하는 임차인 등은 간척농지는 식량안보 차원에서 우량농지 확보를 위해 조성된 농경지이며, 태양광발전시설을 설치할 수 있는 현행 기준을 충족하는 간척농지라도 염도가 낮은 담수를 이용해 벼 재배를 실시할 경우 수확량에 문제가 없는 등 현실과 맞지 않는 기준이라고 문제를 제기하며, 이의 개정을 요구하고 있는 실정임
- 현재 태양광발전시설을 장기간 설치할 수 있도록 설정된 간척농지 판정기준의 적정성을 검토하고 아래와 같은 다양한 요인들을 종합적으로 분석하여 기준을 개정할 필요가 있음
 - EC 5.5 dS/m 이상 기준의 적절성 평가: EC 측정 방법 및 토양에 따른 환산계수 확립
 - 우리나라 간척 농경지에서 벼의 수량과 연계된 EC 기준 설정
 - 심토는 농작물 생육과 관련이 적기 때문에 근권 작토층과 깊이를 고려한 기준
 - 시기별 토양염도 변화를 고려한 기준 설정: 현재 1회에 한정된 조사 시기는 신뢰성이 부족: 측정 횟수를 고려한 기준설정 필요
 - 관개용수에 따른 EC 변화를 고려한 기준 필요
 - 현장 농업경영인의 의견 및 정책이행의 수월성을 고려한 기준 설정 필요

2. 연구 목적

- 농지법에서 제시한 현행 간척농지 판정기준에 대해 적정성을 검토하고 다양한 요인 (토양 특성, EC 측정방법 및 횡수, 벼 수량, 관개용수 등)을 종합적으로 반영하여 과학적 근거에 따른 판정기준 개선방안을 제시하고자 함

현행 기준

- 심토 (30-60 cm), EC 5.5 dS/m 이상(1:5 분석법)
- 1회 측정

문제점

- EC 측정 값, 방법, 횡수, 표토 vs 심토
- 우리나라 수량 및 토양 특성 미반영

고려사항

- EC 측정 방법, 횡수, 방법 간 환산계수 등
- EC vs 벼 수량 상관관계
- 토양의 물리화학적 특성 반영
- 관개 용수의 특성 확보방안
- 식량 생산 및 경제성 고려

개선방안

- 현행 기준의 문제점 파악 및 종합적 개선 방안 제시

3. 연구 추진체계

분 담 내 용	책임연구원 및 연구원		
	소 속	직 위	성 명
연구 총괄 및 간척농지 판정기준 제시	강원대학교	교수	양재의
토양 물리적 특성과 토양 염도 관계 및 관개용수에 따른 토양 염도 관계 분석	충남대학교	교수	정덕영
토양염도 분석법 검토 및 토양염도와 수량과의 관계 분석	전남대학교	교수	최우정
토양염도 관련 기준 조사 및 시기별 토양염도 변화 조사간척농지 판정 근거 제시	강원대학교	조교수	김혁수
	강원대학교	연구원	윤정환

태양광 발전시설을 위한 간척농지 판정기준 검토

조사시기 및 기준설정 <강원대>	화학적 특성 및 수량관계 <전남대>	물리성 및 관계용수 <충남대>
<ul style="list-style-type: none"> • 시기별 토양염도 변화 조사 • FAO 토양염도 기준 조사 • 국외 사례 조사 • 개선한 간척농지 판정기준 및 근거 설정 	<ul style="list-style-type: none"> • 토양염도 분석법 검토 - ECe, 1:2, 1:5 등 • 분석법간 상관관계 분석 • 표토와 심토 특성반영 - 기준설정 근거 • 토양염도가 수량에 미치는 영향 	<ul style="list-style-type: none"> • 관계용수와 토양 염도, 염해, 수량 관계 • 물리적 특성(투수력, 석력비 등)에 따른 토양염도 비교 • 토성별 토양염도 상관관계

간척농지 판정기준 개선방안 및 근거 제시

제2장 연구 내용 및 방법

1. 간척지 분포 및 일반적 특성 조사

- 국내 간척지 관련 자료 조사
 - 농어촌공사, 농촌진흥청 등에서 발간된 자료 및 관련 문헌 자료 수집
- 간척지 토양과 지하수 특성 자료 조사
 - 간척지 토양의 일반적 특성 자료 수집 및 정리
 - 간척지 지하수의 일반적 특성 자료 수집 및 정리

2. 국내외 토양염도 기준 조사

- 국내외 토양염도 관련 기준 설정 사례 조사
 - USDA, FAO, 농촌진흥청 등 국내외 토양 염도 관련 기준 자료 수집
- 토양염도에 따른 벼 수량 관계 모델 조사
 - 토양염도별 작물의 yield potential 관련 자료 수집 및 정리: FAO(1985), Mass(1984) 등
 - 정리한 자료를 바탕으로 현재 우리나라에서 적용하고 있는 간척농지 기준 (EC: 5.5 dS/m)에 대한 적합성 여부 검토

3. 토양염도 분석법 검토

- 토양 염농도 분석 방법 비교 검토
 - 1:1, 1:2, 1:5 침출액법과 포화침출액법 (EC_e) 등
 - FAO, USDA, 농촌진흥청 매뉴얼 검토 및 요약
 - FAO: Soil salinity assessment (FAO Irrigation and Drainage Paper 57)
 - USDA: Agricultural Handbook No. 60 Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils (US Salinity Lab)
 - 농촌진흥청: 토양식물체 분석법
- 1:5 침출액 EC ($EC_{1:5}$)과 포화 침출액 EC (EC_e) 비교
 - 현재 사용 중인 $EC_{1:5}$ 와 국제 표준 방법인 EC_e 상관관계 분석
 - 토성에 따른 $EC_{1:5}$ 와 EC_e 상관관계 분석
 - $EC_{1:5}$ 와 EC_e 의 상관 문헌 검토: Sonmez et al. (2008), Khorsandi and Yazdi (2011), Aboukila and Abdelaty (2017), Aboukila and Norton (2017) 등
 - 국내 연구 결과 D/B 구축

4. 토양염도와 수량과의 관계 분석

- 토양 염농도 ($EC_{1.5}$ 와 EC_e)와 비 수량 상관관계 분석
 - 염류 토양 염농도와 비 수량의 상관관계 조사: FAO 등 관련 문헌 자료 조사, EC_e 또는 $EC_{1.5}$ 에 따른 비 수량 조사 결과를 활용하여 토양 염농도에 따른 비 수량 감소율 산정식 개발
 - 우리나라 간척지 토양의 염농도와 비 수량의 상관관계 조사: 국내 사례 조사 결과를 종합하여 간척지구별 특성을 고려하여 토양 염농도와 비 수량 상관관계 분석

5. 간척지 토양 표토와 심토의 염농도 특성 분석

- 토양 깊이별 염농도 분석
 - 토양 깊이별 (0-100 cm, 20 cm 간격) 염농도 변화 조사
 - 토양 깊이별 염농도 상관관계 분석
- 토양 깊이별 염농도 상관관계 검토를 통한 염해 판정 토양 깊이 설정 근거 제시

6. 시기별 토양염도 변화 조사

- 토양 채취 시기별 토양염도 변화 조사
 - 토양 채취 시기에 따른 국내 간척지 토양염도 조사 결과를 수집·정리하여 시기별 토양염도 변화 경향 분석
- 토양염도 판정을 위한 적정 채취 시기 설정
 - 기온, 강우, 낙수시기 등 토양염도에 영향을 미칠 수 있는 영향을 고려하여 간척지의 토양염도를 대표할 수 있는 토양 채취 시기 및 측정 횟수를 제시함

7. 간척지 토양 경작 적합도 분류 기준 설정

- 간척농지의 농업생산성 손익분기점 기준 설정
- 간척농지의 작물생산성 제한 요인 기준 설정
 - 토양물리성 : 표층토 깊이 (작토심 깊이), 용적밀도, 자갈함량, 포화수리전도도
 - 토양화학성 : 특이산성토양 여부, EC_w (또는 EC_e) 기준
 - 조사 항목에 대한 조사 방법 및 기준 선정
- 간척농지 관개용 용수 확보 방안과 관개용수 수질 기준
 - 간척농지의 EC와 적정 관개용수 수질 기준 설정

제3장 연구 결과

1. 간척지 분포 및 일반적 특성

- 국내 간척지는 1965년을 기준하여 이전부터 개발되어 농경지 등으로 사용된 하해혼성 또는 해성충적토를 모재로 하는 간척지와 1965년 이후 정부의 대규모 간척계획에 따라 개발된 135천ha의 간척지로 구분하며 총면적은 약 350천ha (국립식량과학원, 2013)로 알려져 있음
- 현재 국내 간척지는 부산, 제주지역을 제외한 경기·인천부터 전남 해안에 이르기까지 대표적인 12개 지구가 있으며 (그림 1), 지역별 간척지구수는 전남(40개), 충남(18개) 순이고 전북지역은 새만금을 포함하여 총 8개의 간척지구가 있으나 전체 간척지 면적의 26.6%를 차지하고 있음 (표 1)
- 지역별 간척지 분포면적은 전남지역이 45,553ha로 약 33.7%를 차지하고 있으며 이어 전북 26.6%, 충남 21.8%, 경기 16.4% 순으로 간척지가 분포하고 있음(표 2)



그림 1. 국내 대표적 간척지구 분포도

표 1. 지역별 간척지구 현황

지역	간척지구	
인천	홍왕, 사기, 여차	3개
경기	김포, 시화, 화옹, 남양, 아산	5개
충남	삽교천, 석문, 대호, 이원, 소근, 의항, 서산, 창기, 진대, 독개, 중장, 항개, 고남, 어머니, 보령, 남포, 부사, 홍성	18개
전북	새만금, 계화도, 석포, 줄포, 진서, 하대, 고창, 상하	8개
전남	구수, 백수, 염산, 향화, 월천, 복길, 톱머리, 운남, 해제, 내양, 죽도, 내호, 하태, 영산강Ⅱ, 영산강Ⅲ-1, 2, 서심천, 용암, 고천암, 군내 수유, 소포, 보전, 마사, 완도, 고금, 약산, 사내, 신전, 만덕, 덕촌, 삼산 송림, 고흥, 오마, 구암, 해창만, 강산, 죽암, 선학	40개
경남	갈사, 다송, 대사, 개곡 송원, 내구, 다평, 산전, 신촌, 거산, 죽전, 외간, 남동, 산촌	14개
부산	부산, 김해	2개
제주	종달	1개

표 2. 국내 지역별 간척지 분포면적 (1965년 대규모 간척지 개발 사업 이후)

지역별 면적(ha)						
경기(인천)	충남	전북	전남	경남	부산 (제주)	계
22,158	29,465	35,881	45,553	1,969	74	135,100

가. 지역별 간척지구의 면적 및 토양통(土壤統)

- (경기지역) 김포지구는 수자원 부족으로 농업용수 확보가 어려워 염피해가 심하며, 화옹지구는 임대로 벼농사를 하고 있지만 배수불량으로 수량은 낮은 편이고, 2010년부터 수원축협에서 사료작물을 일부 재배하였지만 실패하였음 (표 3).

표 3. 경기, 인천 지역 간척지구 면적과 토양통 현황

순번	지구명	행정구역	면적 (ha)	토양통
1	홍왕	인천광역시 강화군 화도면 홍왕리	288	광활 만경
2	사기	인천광역시 강화군 화도면 사기리	301	광활 만경 복천, 전북
3	여차	인천광역시 강화군 화도면 여차리	102	광활 만경
4	김포	경기도 김포시 대곶면 학운리	3,003	문포
5	시화	경기도 안산시 단원구 대부동,	4,396	문포, 염포, 만경, 포승
6	아산	경기도 평택시 현덕/오성면, 아산시 영인, 둔포	3,197	광활 만경 포승
7	남양	경기도 화성시 장안면, 평택시 포승면 원정리	3,177	광활, 만경, 포승, 전북 부용
8	화옹	경기도 화성시 서신면, 우정읍	6,212	태안, 만경, 문포, 염포, 복천, 여수, 부용

○ (충남지역) 총 18개의 간척지구가 있으며 전반적으로 농업용수가 풍부하여 주로 벼농사를 하고 있으나 일부 지역에서는 밭작물도 재배하고 있음. 이원지구는 미사와 모래가 많고 지하수위가 높아서 재염화가 우려되며 대부분 벼농사만 짓고 있지만 농업용수가 충분하지 않아서 미경작지와 벼가 고사되는 지역이 많음. 남포지구는 전체적으로 지하수위가 낮고 토성은 사질이며 자갈도 나옴 (표 4)

표 4. 충남 지역 간척지구 면적과 토양통 현황

순번	지구명	행정구역	면적 (ha)	토양통
1	삽교천	충남 당진시 신평면, 우강면, 아산시 인주면	5,109	광활, 만경, 전북, 춘포, 포승
2	석문	충남 당진시 석문면 삼화리, 통정리 일원	3,740	문포, 복천, 염포
3	대호	충남 당진시 석문면 교로리, 대호지면 출포리, 서산시 대산읍 회곡리 일원	7,648	광활, 만경, 포, 복천, 포리
4	서산 A,B	충남 서산시 부석면, 해미읍, 고북면, 홍성군 갈산면, 태안군 태안읍, 안면읍, 고남면	15,409	염포, 광활, 만경, 포승, 태안, 포리
5	이원	충남 태안군 이원면 포지리, 원북면 방갈리	1,352	문포, 광활, 만경, 염포
6	소근	충남 태안군 소원면 소근리	256	광활, 만경, 포승, 문포, 태안
7	의항	충남 태안군 의항리, 응도 일원	111	광활, 만경, 포승
8	창기	충남 태안군 안면읍 창기리	238	광활, 만경
9	진대	충남 태안군 안면읍 정당리	92	광활, 만경, 포승
10	독개	충남 태안군 안면읍 승언리	212	광활, 만경, 포승
11	중장	충남 태안군 안면읍 중장리	505	염포, 문포, 만경
12	항개	충남 태안군 안면읍 신야리, 고남면 장곡리	200	전북, 문포, 만경, 포승
13	고남	충남 태안군 고남면 고남리	175	광활, 만경
14	어머리	충남 태안군 고남면 고남리 어머리마을	89	광활, 문포
15	보령	충남 보령시 천북면, 오천면 일원	8,100	염포, 광활, 복천, 포승
16	남포	충남 보령시 양항리, 삼현리 일원	682	염포, 광활, 만경, 금진
17	부사	충남 서천군 서면 부사리, 보령시 웅천읍 증산리	646	염포, 문포, 광활, 만경
18	홍성	충남 홍성군 서부면 신리	900	광활, 문포, 포승, 복천, 전북

- (전북지역) 총 8개 간척지구가 있으며 새만금지구 면적은 총 41,000ha로 이중 육지부는 28,300ha이며, 대부분 사양토이지만 만경강과 동진강이 만나는 곳은 미사질양토와 식양토가 존재하며 부안지구는 자갈도 많이 나옴. 그리고 줄포지구의 광활통은 낮은 지역에 있어 염농도가 높으므로 영농이 불가능하여 생태공원으로 이용하고 있으며, 진서지구도 방수제 등 기반시설이 미흡하여 용수공급이 제한되므로 실질적인 영농을 못하고 있음 (표 5)

표 5. 전북 지역 간척지구 면적과 토양통 현황

순번	지구명	행정구역	면적 (ha)	토양통
1	계화	전라북도 부안군 계화면 계화리	3,600	광활, 문포, 염포, 하사
2	석포	전라북도 부안군 진서면 석포리	100	광활, 금진
3	줄포	전라북도 부안군 진서면 줄포리	76	광활, 만경
4	진서	전라북도 부안군 진서면 신복리	316	광활 염포
5	하대	전라북도 고창군 부안면 수동리	143	광활, 만경
6	고창	전라북도 고창군 부안면 송현리	218	광활 포승
7	상하	전라북도 고창군 상하면, 영광 진덕리	324	광활, 만경, 포승, 문포
8	새만금	전북 군산시 옥서면, 김제시 광활면, 부안군 계화면	40,100	염포, 문포, 광활, 하사 가포

- (전남지역) 총 40개 간척지구가 있으며 내호지구는 모래와 미사가 많고 염농도가 높아 서 양식장으로 이용하고 있으며, 하태지구는 섬과 섬을 연결하여 조성한 간척지로서 염농도가 높고 농업용수가 절대적으로 부족하여 작물재배가 곤란하고 이 지역의 토양 또한 미사가 많고 토양 경도가 높아서 염전으로 적합하여 대부분 염전으로 이용하고 있음

표 6. 전남 지역 간척지구 면적과 토양통 현황

순번	지구명	행정구역	면적 (ha)	토양통
1	신전	전남 강진군 신전면 벌정리, 도암면	623	광활, 만경, 금진, 포승, 포리
2	만덕	전남 강진군 도암면 학장리	316	광활, 포리 포승, 금진
3	사내	전남 강진군 신전면 사초리	822	광활, 포승, 금진, 복천
4	죽암	전남 고흥군 동강면 죽암리	858	포리, 여수, 복천, 포두
5	송림	전남 고흥군 대서면 송림리	186	복천, 전북
6	오마	전남 고흥군 도덕면 오마리, 풍양면	1,132	광활, 만경, 백수, 하사, 염포
7	툽머리	전남 무안군 망운면, 현경면, 청계면	1,633	광포, 복천, 전북, 포승
8	내양	전남 무안군 해제면 산길리, 양월리,		광활, 만경, 백수, 하사, 염포
9	죽도	전남 무안군 해제면 용학리, 천장리		광활, 만경, 백수, 하사, 염포
10	운남	전남 무안군 운남면 성내리, 동암리	648	광활, 광포, 전북, 부용, 복천
11	복길	전남 무안군 청계리 복길리, 낙성리	500	복천 포리
12	선학	전남 순천시 해룡면 선학리	268	부용, 포리, 포승, 포두
13	내호	전남 신안군 안좌면 내호리, 방월리	722	광활, 만경, 부용, 복천
14	하태	전남 신안군 신의면 상태동리, 하태동리	300	광활
15	해제	전남 신안군 지도읍 내양리,	2,200	만경, 전북, 부용, 광활, 울포, 복천
16	백수	전남 영광군 백수읍 하사리, 약수리	377	광활, 만경, 백수, 하사, 염포
17	염산	전남 영광군 염산면 야월리, 가음리, 봉남리	667	광활, 하사, 염포
18	약산	전남 완도군 고금면 관산리	259	복천, 포승, 포리
19	완도	전남 완도군 완도읍 대신리, 정도리	343	포승
20	덕촌	전남 장흥군 대덕읍 잠두리	475	복천, 포승, 포리, 부용
21	군내	전남진도군 군내면 나리, 수유리	1,381	복천, 포승, 여수, 가포, 울포, 일평
22	소포	전남 진도군 지산면 소포리	1,323	광활, 복천, 전북, 포승, 포리
23	마사	전남 진도군 지산면 심동리	483	광활, 전북, 복천, 포리
24	월천	전남 함평군 손불면 월천리	400	광활, 광포, 복천
25	용암	전남 해남군 문내면 용암리	566	복천, 만강, 포승, 광활
26	서심천	전남 해남군 문내면 예락리	238	부용, 전북복천, , 포리, 여수, 포승
27	영산강 II	전남 목포시 하당동, 무안군 일로읍 청호리, 영암군 금강리, 시종면 서학리, 동강면 장동	10,110	금진, 문포, 여수, 울포, 포리, 포승, 복천
28	영산강 III-1	영암군 삼호읍 동호리, 미암면 호포리, 마산면 노하리, 해남군 구성리, 계곡면 잠두리	12,816	광포, 가포, 복천, 포리, 여수, 다평, 울포, 포두, 금진
29	영산강 III-2	해남군 산이면 부동리, 화원면 청룡리, 황산면 우황리	7,433	광포, 복천, 포리, 여수

- (경남지역) 최대 간척지구는 갈사·다송으로 1,108ha이며 신촌지구는 대부분 저지대에 위치하고 있으며 자갈이 많음. 대사지구는 저지대에 위치하고 있으며, 토양은 자갈이 많은 가포통과 구포통으로 벼를 주로 재배하고 쌀 수량은 10a당 470 kg 정도로 일반답과 비슷함 (표 7)

표 7. 경남, 부산, 제주 지역 간척지구 면적과 토양통 현황

순번	지구명	행정구역	면적 (ha)	토양통
1	갈사·다송	경남 하동군 금성면 가덕리	1,108	다평, 포승, 덕하, 전북, 복천
2	개곡	경남 하동군 진교면	45	다평, 포승, 금진, 복천
3	거산	경남 고성군 마암면 삼락리, 거산리, 죽계리	292	가포, 구포, 전북, 부용, 포승
4	남동·산촌	경남 거제시 거제면 남동리, 오수리, 산촌리	86	가포
5	내구·다평	경남 사천시 서포면 내구리, 다평리	169	다평, 구포
6	대사	경남 남해군 고현면 대사리	36	구포, 가포
7	산전	경남 사천시 서포면 외구리, 조도리	137	광포, 구포, 전북
8	송원	경남 하동군 진교면 송원리	200	다평, 광포
9	신촌	경남 사천시 용현면 신촌리, 온정리	110	광포, 다평
10	외간	경남 거제시 거제면 외간리	48	가포, 구포
11	죽전	경남 마산시 진동면 신기리	34	가포
12	종달	제주시 구좌읍 하도리	37	낙천

나. 간척지구별 토양과 지하수 특성

1) 간척지 토양 특성

- 간척지 토양은 해안에 위치하며 해수위와 비슷한 지반고의 영향으로 지하수위가 높고, 토양 배수가 대체로 불량하며 건조 시 염분이 작토층으로 상승하는 재염화가 반복되는 특징을 가지고 있음
- 간척지 토양의 물리적 특성 중 하나로, 세립질 토양에서 토양구조가 발달되지 않은 간척지는 수직배수가 불량하고 연약지반을 형성하여 담수상태에서 대형 농기계의 사용이 어려운 토양이 있는가 하면, 조립질 토양은 토층의 경반화로 인하여 이양작업이 곤란하거나 불가능한 경우도 있음 (그림 2)

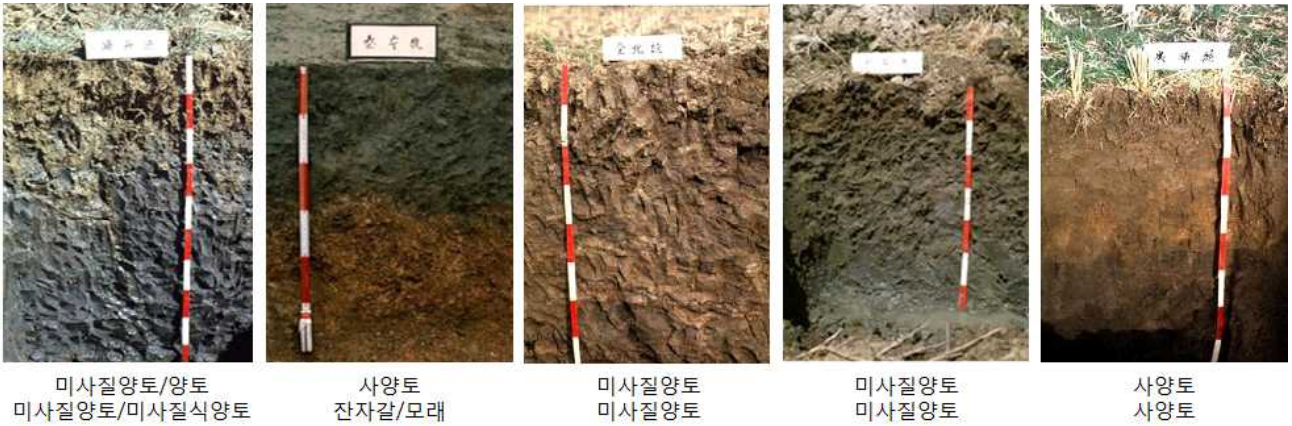


그림 2. 영산강 간척지 토양통별 토양단면 특성

- 1990년 한국농어촌공사가 조사한 지역별 토성별 분포 특성을 살펴보면 미사질양토 (47.2%), 양질사토(21.7%), 사질양토 (15.3%) 순이며, 사토, 양질사토, 사질양토 등 모래가 많은 조립질토양이 43.2%를 차지하고 있고 미사질계 토양은 47.2%, 그리고 점토함량이 많은 식질계 토양은 9.5%임
- 간척지 토양의 특성은 지역별로 볼 때 경기, 전남지역은 세립질(미사질양토~미사질식양토), 전북 지역은 조립질토양(세사양토~사양토) 그리고 충남지역은 조립질과 세립질 토양이 혼재하여 분포하고 있음 (표 8)

표 8. 간척지 지역별 토성과 면적

토성	면적 (ha)						비율 (%)
	경기	충남	전북	전남	경남	계	
사토 (Sand)	1,189	4,845	920	8,748	692	16,394	6.18
양질사토(Loamy sand)	3,038	4,163	45,050	5,119	50	57,420	21.7
사질양토(Sandy loam)	4,730	3,066	29,450	2,706	677	40,629	15.3
미사질 (Silty)	467	-	-	-	-	467	0.18
미사질양토 (Silty loam)	23,416	7,786	30,380	56,073	7,507	125,162	47.2
미사질 식양토 (Silty clay loam)	-	250	-	14,537	7,191	21,978	8.29
미사질식토 (Silty clay)	-	-	-	3,055	-	3,055	1.15
계	32,840	20,110	105,800	90,238	16,117	265,105	100.00

출처: <https://www.nongsaro.go.kr/portal/ps/psb/psbk/kidoContentsFileView.ps?kidofcomdtYNo=20502>

- 2015년 국립식량과학원 경기·인천지역부터 전남에 이르기까지 국내 대표 간척지 10개 지구 조사 결과를 살펴보면 표층(A층)의 깊이는 대부분 10 cm 내외로 일반 농경지 표층 깊이보다 얇은 것으로 조사되었다 (표 9)

표 9. 국내 대표 간척지 10개 지구의 표토(A층) 깊이

구분 \ 지구	시화	석문	이원	남포	삼산	고흥	군내	보전	영산강 III-1	영산강 III-2
표층 깊이(cm)	12.2	11.3	10.5	12.9	12.3	10.2	10.5	10.5	12.5	10.5

2) 간척지 지하수 특성

- 일반적으로 간척지의 지하수위는 지형적으로 표고가 높은 지역과 육지부에 가까울수록 지하수위가 100 cm 이하로 낮은 반면에 호측으로 갈수록 높아짐
- 한국농어촌공사가 2015년에 발표한 간척지구별 대표 지하수위 조사 결과를 살펴보면 비담수기의 지하수위가 영농기 지하수위보다 낮게 나타났고, 군내, 보전지구는 평균 지하수위가 70 cm 이하로 낮게 측정되었음 (표 10)

표 10. 간척지구별 상존 지하수위

구분 \ 지구	석문	이원	남포	삼산	고흥	군내	보전	영산강 III-1	영산강 III-2	시화
	(cm)									
최대	-120.0	-120.0	-70.0	-120.0	-110.0	-100.0	-110.0	-115.0	-115.0	-125.0
최소	0.0	0.0	0.0	-10.0	0.0	-40.0	-60.0	0.0	0.0	0.0
중간	-20.0	-65.0	-20.0	-60.0	-20.0	-70.0	-90.0	-30.4	-20.0	-100.0
평균	-41.4	-64.9	-23.7	-64.6	-32.9	-73.0	-91.7	-44.4	-35.9	-85.6

- 2015년 국립식량과학원이 발표한 간척지구별 지하수 전기전도도 변화특성을 살펴보면 간척지 특성상 해수의 영향으로 최대값이 40 dS/m 이상으로 높았으며, 최소값은 군내 (7.8 dS/m)을 제외하고 모두 2 dS/m 이하였음. 평균값은 남포에서 3.7 dS/m로 가장 낮았고 나머지 지역은 모두 10 dS/m를 넘는 것으로 나타났으며, 시화가 29.6 dS/m로 가장 높았음 (표 11)

표 11. 간척지구별 지하수 전기전도도

지구 구분	석문	이원	남포	삼산	군내	고흥	보전	영산강 Ⅲ-1	영산강 Ⅲ-2	시화
	(dS/m)									
최대	47.2	48.5	32.3	40.5	40.2	46.5	33.9	42.2	41.2	52.3
최소	1.0	2.1	0.8	1.8	7.8	1.3	3.4	1.0	0.7	1.6
중간	8.3	12.6	3.0	23.7	25.5	19.5	13.0	15.7	15.3	38.2
평균	11.3	16.6	3.7	24.5	23.6	20.4	15.0	16.8	16.6	29.6

- 간척지구별 표층과 심층의 화학성과 수용성 이온 분포 특성을 조사한 결과 각 지구별 토양 전기전도도는 염류용탈 및 고염도의 지하수의 영향으로 표토에 비하여 심토의 전기전도도가 높은 경향을 보이며 이는 각지구별 상존 지하수 깊이와 연관성이 높은 것으로 추정됨
- 삼산지구의 경우 조사된 시점에서 표층과 심층의 전기전도도는 16.7과 22.1 dS/m로 가장 높았고 공극수내 존재하는 수용성 이온의 농도도 가장 높았음. 사질토양으로 토양 내 자갈도 존재하는 남포지구의 경우 지하수위가 낮아 조사된 간척지구 중 표층과 심층의 전기전도가 가장 낮은 2.2와 3.3 dS/m로 조사되었음 (표 12)

표 12. 간척지구별 표층과 심층의 화학성과 수용성 이온 분포 특성

지구명	토층	EC _e (dS/m)	pH	수용성 이온 (cmol _c /L)			Cl (cmol _c /L)	SAR
				Ca	Mg	Na		
석문	표층	4.5	8.0	4.7	7.2	31.8	30.8	12.2
	심층	8.0	8.2	5.8	13.2	61.5	59.7	18.9
이원	표층	18.7	8.3	18.1	33.7	139.9	147.3	27.5
	심층	20.2	8.4	15.0	34.4	157.9	158.4	31.5
남포	표층	2.3	7.2	1.9	2.6	15.7	15.6	10.8
	심층	3.3	7.6	3.2	4.2	21.6	23.5	11.2
삼산	표층	16.7	8.5	27.0	32.3	122.3	119.5	20.5
	심층	22.1	8.4	31.6	43.4	164.5	159.8	26.1
고흥	표층	8.4	8.7	9.0	15.2	58.4	58.3	17.1
	심층	13.6	8.9	8.3	22.2	104.0	105.1	26.9
군내	표층	8.4	8.5	21.2	20.2	52.5	46.1	11.8
	심층	12.6	8.7	19.3	28.1	90.0	78.8	18.5
보전	표층	7.4	8.3	15.8	13.8	49.1	47.6	12.3
	심층	12.7	8.2	21.0	26.1	91.4	85.9	17.8
영산강 Ⅲ-1	표층	6.3	7.8	3.7	8.8	45.4	40.0	18.0
	심층	10.9	7.8	5.4	15.6	85.1	77.2	26.2
영산강Ⅲ-2	표층	4.9	8.5	4.1	6.4	34.7	32.1	14.9
	심층	9.9	8.5	6.1	13.8	77.5	71.8	24.3
시화	표층	10.9	7.5	5.0	16.3	82.2	83.8	25.0
	심층	14.3	7.8	5.3	22.2	115.8	118.6	31.7
적정 범위	논	-	5.5-6.5	5.0-6.0	1.5-2.0	-	-	-
	밭	-	6.0-6.5	5.0-6.0	1.2-2.0	-	-	-

다. 간척지 토지이용과 작물재배 현황

○ 2013년 기준 간척지 토지이용현황을 살펴보면 논이 284천ha로 전체 간척지 면적의 약 81.3%를 차지하며 밭(1.57%), 임지(1.17%), 기타(15.4%)인 것으로 조사되었음 (표 13)

표 13. 간척지 토지 이용 현황 (국립식량과학원, 2013)

구분	논	밭	과수	초지	임지	기타	계
면적(ha)	284,872	5,497	160	2,014	4,095	53,868	350,506
비율(%)	81.3	1.57	0.05	0.57	1.17	15.4	100

- 국립식량과학원이 2018년에 발표한 간척지역별 작물 재배면적 현황을 살펴보면 조사된 전체 재배면적의 약 76.3%가 수도재배를 실시하고 있으며 사료작물이 20.4%, 그리고 콩 맥류 등 밭작물 재배면적은 조사된 재배면적의 약 1.7%인 것으로 조사됨
- 인천지역은 지역적 위치 조건뿐만 아니라 간척지 토양구조와 염도 등의 문제로 인하여 사료작물 재배면적 비율이 63.2%에 달하고 있으나 전남지역의 경우는 수도재배면적 비율이 91.1% 가장 높았음. 충남지역의 간척지는 밭작물 재배면적이 약 279.1ha로 전체 지구 간척지 면적의 약 1.5% 정도가 밭작물재배지로 이용되고 있으며 전북지구는 전체 간척지 면적의 5.4%가 밭작물 재배로 이용되고 있음 (표 14)

표 14. 간척지역별 작물재배 현황

구분	재배면적 (ha)	벼	사료 작물	밭작물										
				콩	맥류	감자	고구마	마늘	고추	양파	양배추	대파	메밀	생강
계	51,551.1 (100)	45,999.6 (89.2)	4,654.4 (9.0)	211.0	85.5	74.0	1.0	42.0	7.8	92.7	6.0	10.0	30.0	8.0
경기	1,598.5 (100)	1,384.5 (86.6)	214.0 (13.4)											
인천	389.2 (100)	113.0 (29.1)	246.0 (63.2)											
충남	19,131.3 (100)	16,931.2 (88.5)	1,852.1 (9.7)	93.9	35.5	14.0	1.0	42.0	6.0	72.7	6.0			8.0
전북	3,341.3 (100)	2,890.0 (86.5)	271.3 (8.1)	60.0		60.0				20.0		10.0	30.0	
전남	27,090.8 (100)	24,680.9 (91.1)	2,071.0 (7.6)	57.1	50.0				1.8					

2. 국내외 토양염도 기준

가. 토양분류에서의 염류토양 기준

- 토양은 일반적으로 염도가 낮지만 해안지대나 건조 및 반건조지대의 내륙지방에서는 염류의 집적에 의하여 염도가 높아지고 토양 반응도 중성 또는 알칼리성으로 됨. 이 외에 간척지와 같이 바다를 막아 새로 생성된 토양은 바닷물에 의한 영향으로 염도가 매우 높아 제염이 이뤄지지 않고서는 식물 생육이 어려움
- 토양을 조사하고 분류하는 기준에서도 이에 염도에 따라 토양을 분류하여 염류토양을 구분하고 있음. FAO나 USDA, 농어촌공사 등 대부분의 국가 및 기관에서 이 기준을 이용해 염류토양을 구분하고 있으며, 염농도를 뜻하는 토양포화침출액의 전기전도도가 4-8 dS/m 인 경우 염류토양으로 분류하고 있으며, 8-16 dS/m은 강염류토양, 16 dS/m 이상은 극염류토양임
- 염류토양 분류기준에 따르면 염류토양에서는 일반적인 작물 생육이 제한되고, 강염류토양에서는 곡류 작물이, 극염류토양에서는 대부분의 작물 생육이 제한된다고 알려져 있음

표 15. 염류토양 분류기준 (FAO, USDA, 농어촌공사 등)

	일반토양	염류토양	강염류토양	극염류토양
염농도(dS/m)	<4	4-8	8-16	>16
작물 영향	제한 없음	일반적인 작물 생육 제한	곡류 작물 생육 제한	대부분의 작물 생육 제한

○ 토양의 염농도 상태 분류

- EC_e 기준으로 2.0 dS/m 이하는 비염류토양으로 분류되고, 8.1 dS/m 이상은 강염류토양으로 분류됨 (Smith and Doran, 1996)

표 16. 토양 염농도 상태 분류 (Smith and Doran, 1996)

EC _e (dS/m)	토양 분류
0-2.0	Non-saline
2.1-4.0	Slightly saline
4.1-8.0	Moderately saline
8.1-16.0	Strongly saline
>16.1	Very saline

나. 벼 생산성 관련 토양염도 기준

1) FAO

- FAO (1985)에서는 다양한 작물에 대해 다양한 토양 염류조건에서의 생산성을 제시하고 있음. 벼는 염류에 대해 보통의 민감한 작물로 분류되며, 표 17과 같이 EC_e 기준으로 3.0 dS/m 부터 생산성이 감소하기 시작하여 토양 염도가 5.5 dS/m 일 때 일반 농경지 대비 70%의 생산성을 기대할 수 있다고 제시하였음
- 국제적으로 통용되는 염류토양에서의 작물 생산성 관련 토양 염도 기준으로 널리 사용되고 있음

표 17. 토양염도에 따른 벼 생산성 기준 (FAO, 1985)

	벼 생산성						
	100%	90%	75%	70%	60%	50%	0%
염농도 (dS/m)	3.0	3.8	5.1	5.5	6.3	7.2	11

2) 농촌진흥청

- 농촌진흥청에서는 벼 재배 적합 염도 기준을 2.0 dS/m 이하로 제시하고 있으며, EC 2.0 ~4.5 dS/m에서 물, 양분 관리(투입증가)를 통한 재배를 추천하고 있음 (농촌진흥청 고시 제2020-14호)
- 우리나라에서 진행한 선행 연구결과를 종합한 결과 토양염도가 4.5 dS/m 이상인 경우 수량성(경제성)이 떨어지기에 벼 재배에 적합하지 않다고 판단하고 있음
 - 해당 기준은 일반 농경지 대비 70~80% 수준의 수량성을 기준으로 설정되었음

간척지 영농에 적합한 작물과 재배정보 고시

[시행 2020. 6. 8.] [농촌진흥청고시 제2020-14호, 2020. 5. 29., 일부개정]

간척지 영농에 적합한 작물과 재배정보 : 별표1

작물: 벼

가. 토양염농도

- 1) 벼 재배 적합 토양 염농도는 2.0 dS/m 이하이며, 그 이상의 토양 염농도에서는 환수제염 등 염농도 경감과정이 필요함

나. 간척지 적응 품종

- 1) 토양 및 관개수 염농도에 의한 품종별 적응성 차이가 있으므로, 이를 고려한 품종선택과 재배관리 방법이 필요함
- 2) 밥쌀용 추천품종 : 청호

다. 재배관리

1) 염분제거

- (1) 토양염농도가 2.0 dS/m 이상인 논토양에서 염분제거가 필요할 경우 부산석고를 시용할 수 있음
- (2) 부산석고는 토양염농도에 따라 시용량을 산정하고 벼 이앙일 기준 1~2개월 전 시용 후 토양과 잘 혼합하고 환수제염 해야 함

2) 물관리

- (1) 토양염농도 2.0 dS/m이하의 논토양에서도 필요할 경우 이앙 전 로타리 후 환수제염을 하고, 이앙 후에 벼 뿌리 활착시까지 논바닥이 마르지 않도록 담수관리해야 함
- (2) 토양염농도 2.0~4.5 dS/m의 논토양에서는 이앙 및 파종 전에 로타리 후 3회 정도 환수제염을 하고, 이앙 후에는 담수관리를 하되 적정 염농도 수준까지 환수제염이 요구됨

3) 비료주기

- (1) 간척지는 대체적으로 토양 pH가 높으므로 질소질비료는 요소비료보다 유안비료의 사용을 추천함
- (2) 토양염농도 2.0 dS/m 이하
 - 간척지 질소비료사용 추천량은 11 kg/10a임
 - 분시는 밀거름-새끼칠거름-이삭거름으로 나누어 질소비료는 40-30-30% (이앙전-출수전 24일-출수기), 인산은 5.1 kg/10a 전량기비, 칼리는 5.7 kg/10a(60-40%, 이앙전-출수기)를 사용함
- (3) 토양염농도 2.0-4.5 dS/m
 - 질소비료는 추천량 대비 증시가 필요하며 최대 18 kg/10a 시용할 수 있음
 - 분시는 밀거름-새끼칠거름-최고새끼칠거름-이삭거름-알거름으로 나누어 30-20-20-20-10% (이앙 전-이앙 후 12일-이앙 후 24일-출수전 24일-출수기), 인산은 5.1 kg/10a 전량기비, 칼리는 5.7 kg/10a (40-30-30%, 이앙 전-이앙 후 12일-출수기)를 사용함

- 식량과학원의 자료에 따르면 토양염도 4.7~6.3 dS/m 수준에서 벼 수량이 38% 감소함
- 논토양에 대한 적성등급을 4개로 구분하여 토양에 대한 적지 관정을 하고 있음. 여기서 염농도도 하나의 기준으로 포함되어 있고, 각 기준은 염류토양 분류기준과 동일한 기준을 사용하고 있음 (표 18)

표 18. 논토양의 적성등급 기준 (농촌진흥청)

	1급지	2급지	3급지	4급지
생산력	고	보통	낮음	매우 낮음
토양관리	제한 없음	다소 제한	특수관리 재배기술 필요	매우 심한 제한 경제적 이용성 낮음
염농도(dS/m)	<4	4-8	8-16	>16

3. 토양염도 분석법

가. 국내외 토양염도 분석방법

- 토양 염도는 토양포화반죽 침출액 EC_e 는 물론 토양-증류수 혼합 비율을 달리한 $EC_{1:1}$, $EC_{1:2}$, $EC_{1:5}$ 등 다양한 방식으로 측정함
- EC_e 는 FAO와 USDA에서 토양 염도별 작물 수량 감소 예측에 활용되고 있음 (Rhoades et al., 1989)
- 하지만, EC_e 는 정확한 포화수분함량 측정에 어려움이 있어 오차가 큰 편이며, 많은 시간이 소요됨 (Al-Busaidi et al., 2006)
- 따라서, 많은 국가에서 $EC_{1:1}$, $EC_{1:2}$, $EC_{1:5}$ 등을 추가로 활용하고 있음. 우리나라를 비롯한 호주, 중국, 중앙아시아는 $EC_{1:5}$ (Shirokova et al., 2000; Lee et al., 2003), 미국과 캐나다는 $EC_{1:1}$ 을 주로 활용함 (Hogg and Henry, 1984; Zhang et al., 2005; He et al., 2013)
- 국내외 주요 기관별 EC 측정 방법을 표 19와 표 20에 정리하였음
 - 국내외 주요 기관의 EC 측정 방법은 토양-증류수 혼합 비율이 같더라도 교반 시간과 정치 시간에 다소 차이가 있음

표 19. 국내 주요 기관의 EC 측정 방법


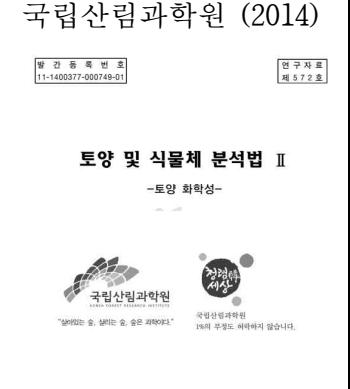

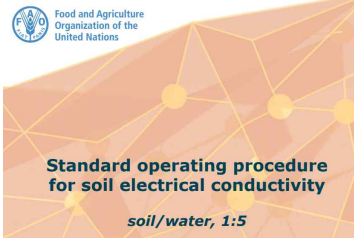
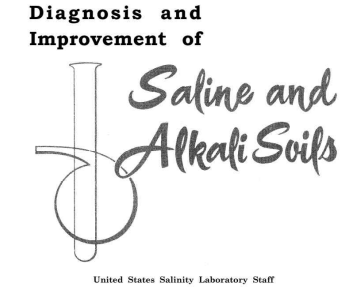
기관	EC 측정 유형	세부 방법	참고문헌
농촌진흥청	$EC_{1:5}$	토양 10 g에 증류수 50 mL 투입하여 30분 교반 후 여과하여 측정	농촌진흥청 (2000) 
	EC_e	토양 250 g 포화 반죽 16시간 경과 후 침출하여 측정	
국립산림과학원	$EC_{1:2}$	토양 40 g에 증류수 80 mL 투입하여 1시간 교반 후 여과하여 측정	국립산림과학원 (2014) 
	$EC_{1:5}$	토양 15 g에 증류수 75 mL 투입하여 1시간 교반 후 여과하여 측정	
	EC_e	토양 250 g 포화 반죽 4시간 경과 후 침출하여 측정	

표 20. 국외 주요 기관의 EC 측정 방법

기관	EC 측정 유형	세부 방법	참고문헌
FAO	EC _{1:2}	토양 40 g에 증류수 80 mL 투입하여 1시간 교반 후 여과하여 측정	FAO (2008) 
	EC _{1:5}	토양 50 g에 증류수 250 mL 투입하여 1시간 교반하고 30분간 정치한 후 측정	FAO (2021) 
USDA	EC _{1:1} , EC _{1:5}	해당 비율에 맞게 토양과 증류수 혼합하고, 15분간 교반 후 1시간 정치 및 5분간 추가 교반 후 여과하여 측정	USDA (1954) 
	EC _e	토양 250 g 포화 반죽 4-16시간 경과 후 침출하여 측정(시간은 토양의 CaSO ₄ 함량에 따라 상이)	

나. EC 분석 방법별 상관관계

○ 염류 토양의 EC_{1:1}, EC_{1:2} 또는 EC_{1:5}와 EC_e의 상관관계는 매우 다양함

- 해당 상관관계는 EC_e 측정을 위해 투입되는 증류수 양에 따른 희석 계수는 물론 토양-증류수 교반 과정에서 난용성 염(CaSO₄ 등)의 가용화와 양이온 교환 정도에 크게 영향을 받기 때문에, EC_e 환산계수는 토양 특성별로 매우 상이함
- 또한, 2차 염류집적으로 형성된 외국의 염류 토양과 달리, 우리나라 간척지는 1차 염류 토양으로 EC_e 환산계수가 상이할 수 있음

표 21. EC_{1.5}와 EC_e 상관관계 문헌 자료

염류토양 종류	참고 문헌	상관관계 기울기(환산계수) (EC _e = Slope × EC _{1.5})
비간척지	Sonmez et al. (2008)	7.98
	Khorsandi and Yazdi (2011)	5.48
	Aboukila and Norton (2017)	5.49
	Aboukila and Abdelaty (2017)	7.89
간척지	Lee et al. (2003)	5.49-9.94
	Park et al. (2019)	8.70

- 우리나라 주요 간척지 토양의 EC_{1.5}와 EC_e의 상관관계는 간척지구별로 상이함
 - 국립식량과학원에서 2018-2021년 동안 수행한 연구결과를 종합하여 검토한 결과에 의하면, 19개 간척지구에서 채취한 토양 626점의 EC_{1.5}와 EC_e 자료를 활용하여 상관관계를 분석한 결과 EC_{1.5} → EC_e 환산계수는 7.5로 평가되었음

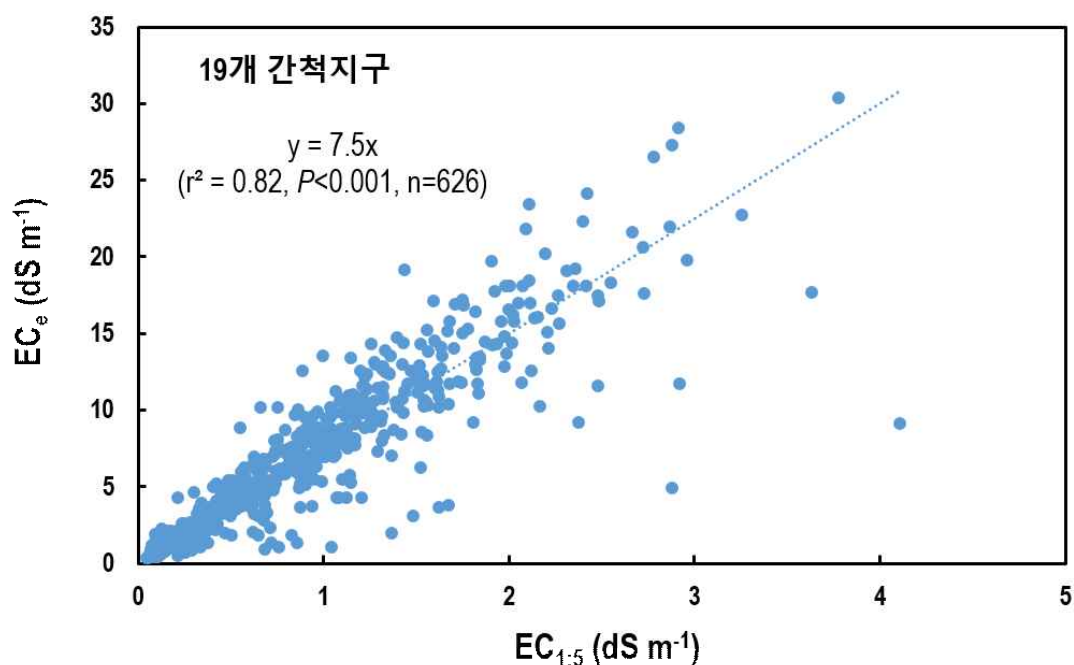


그림 3. 우리나라 19개 간척지구 626점 토양 시료의 EC_{1.5}와 EC_e 상관관계

○ 19개 간척지구의 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 의 상관관계는 지구별로 차이가 컸으며, 간척지구별 환산계수는 4.6~9.9의 범위로 염산지구가 9.9로 가장 컸고, 사내지구가 4.6으로 가장 작았음

- 지역별 토양 특성(토성) 및 간척시기 등이 다르기 때문에 이와 같이 지구별, 지역별 환산계수가 다양하게 나타남

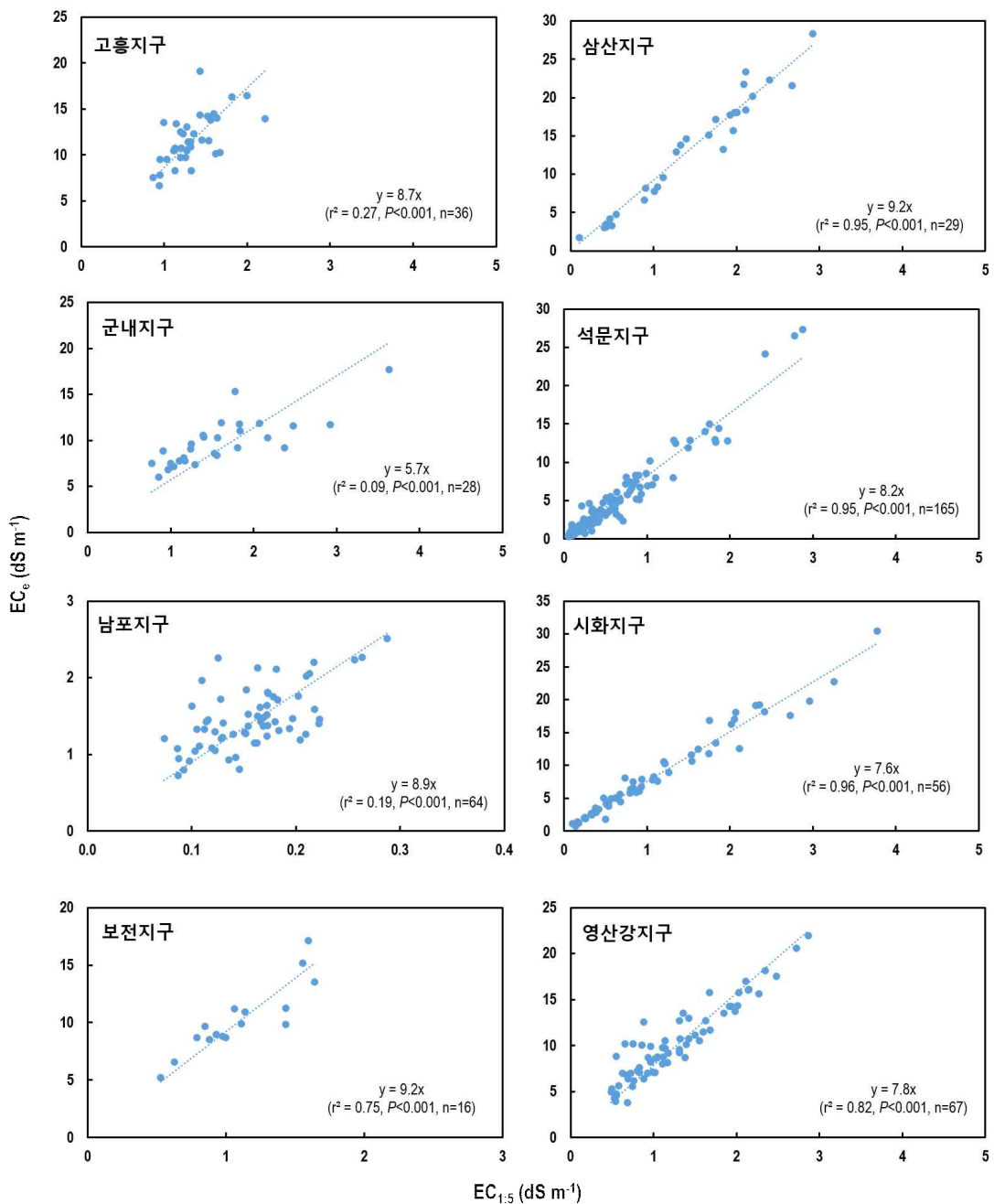


그림 4. 우리나라 8개 국가 관리 간척지구 토양 시료의 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 상관관계

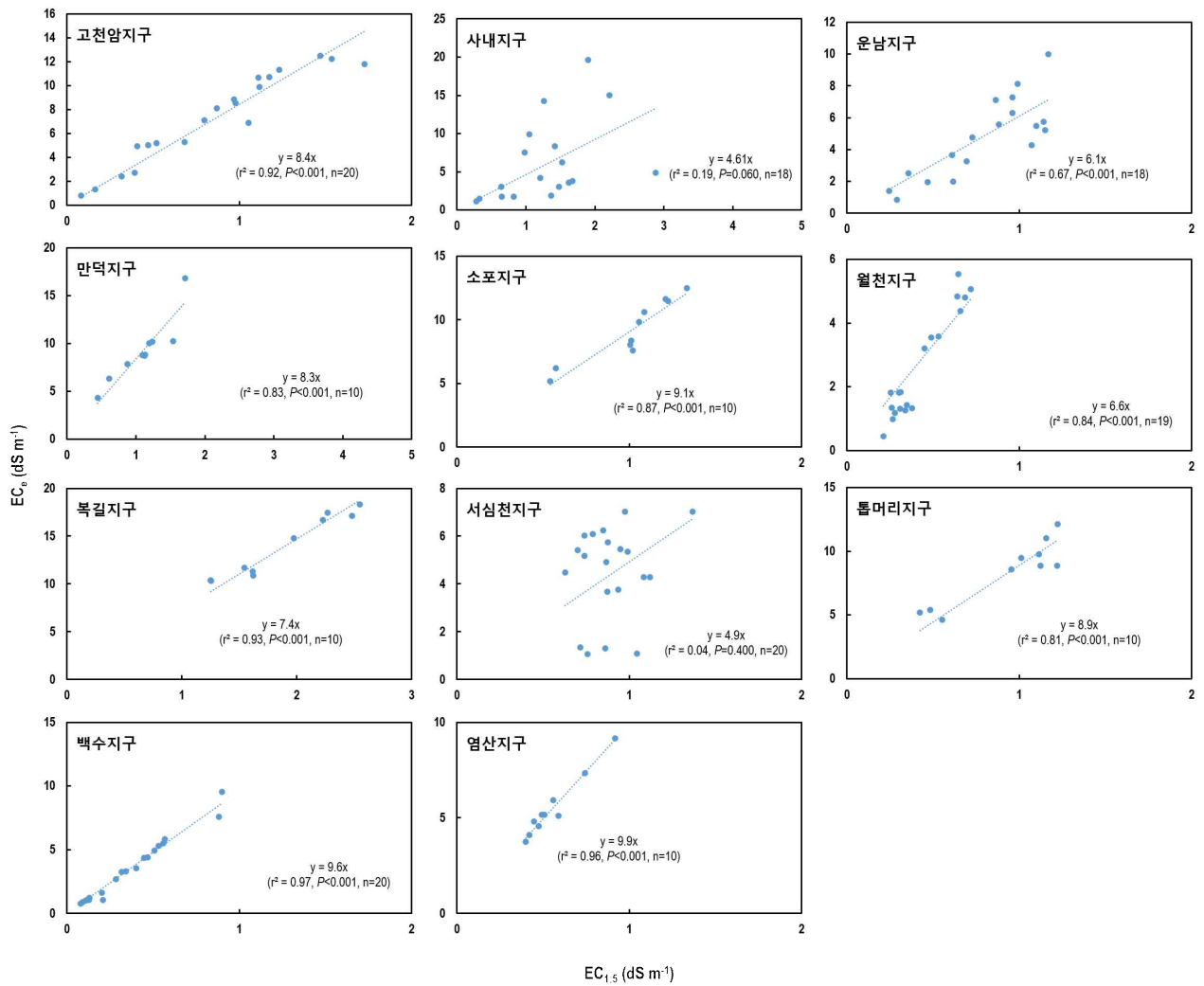


그림 5. 우리나라 11개 민간 매각 간척지구 토양 시료의 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 상관관계

표 22. 19개 간척지구별 $EC_{1.5} \rightarrow EC_e$ 환산계수

간척지구	환산계수	간척지구	환산계수	간척지구	환산계수	간척지구	환산계수
고흥	8.7	석문	8.2	복길	7.4	염산	9.9
군내	5.7	시화	7.6	백수	9.6	운남	6.1
남포	8.9	영산강	7.8	사내	4.6	월천	6.6
보전	9.2	고천암	8.4	소포	9.1	툽머리	8.9
삼산	9.2	만덕	8.3	서심천	4.9		

- 간척지구별 환산계수는 토양 모래 함량과 유의한 상관관계가 있음
 - 환산계수는 모래 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보임

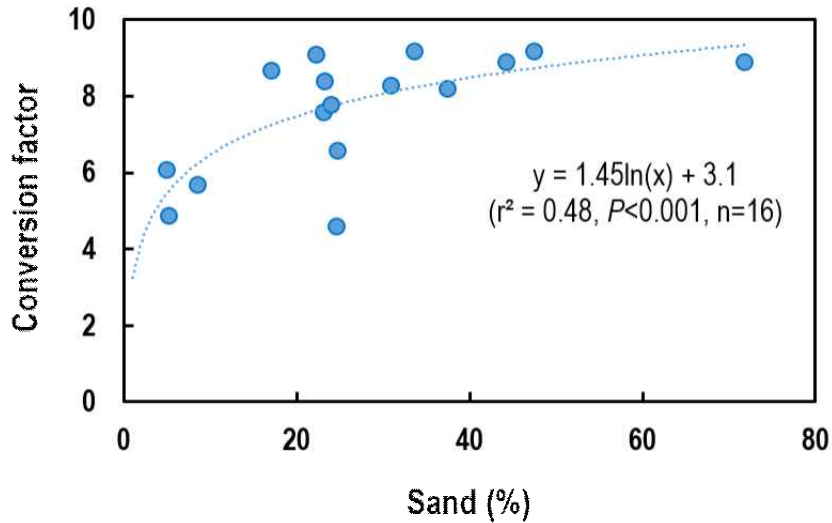


그림 6. 간척지구 토양 시료의 모래 함량과 환산계수의 상관관계

- 토성에 따른 공극률 차이에 의해 포화침출액의 증류수 투입량이 달라지며, 일반적으로 모래 함량이 많을수록 공극률이 낮아 증류수 투입량이 적어서 $EC_{1.5}$ 와 비교하여 염이 농축되어 환산계수가 높아짐 (Gibbs, 2000)
- 하지만, 환산계수는 염의 종류와 토양의 양이온교환용량 등 다양한 요인에 의해서도 영향을 받음

표 23. 토성별 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 상관관계 (Gibbs, 2000)

토성	환산 계수 ($EC_{1.5} \rightarrow EC_e$)
사토	17
사양토	13.8
양토	9.5
식양토	8.6
식토	7

- 간척농지 판정기준 설정을 위한 $EC_{1.5} \rightarrow EC_e$ 환산계수 적용 방안
 - 태양광 설치 부지에 해당하는 간척지구의 고유 환산계수가 개발된 경우 해당 환산계수 적용이 가능함

- 고유 환산계수가 미개발된 조건에서는 간척지 평균 환산계수(7.5) 적용 가능
- 간척농지의 식량 생산 기능을 최우선적으로 고려하여 보수적으로 적용할 경우 가장 낮은 환산계수(4.6) 활용 가능
- 또한, 현재 사용하고 있는 환산계수인 5 역시 과학적으로 근거가 있으며, 보수적인 기준인 4.6보다 높아 사업의 연속성 및 개정의 최소화를 위해서라면 5를 그대로 사용해도 충분하다고 판단됨

4. 토양염도와 수량과의 관계 분석

- 염농도가 한계를 넘으면 식물의 생육이 저해되는데 작물의 생육을 저해할 수 있는 한계 염농도는 식물의 종류와 상태, 그리고 온도, 습도, 풍속 등의 외부환경과 근권 수분 포텐셜 등에 의하여 결정되며, 생육저해는 염농도가 높아질수록 증가한다. 일반적으로 작물 재배가 가능한 토양 염농도는 0.3% 이하로 알려져 있으며 일본 토양비료학회가 제시한 작물별 내염정도에 따른 적용 가능한 염농도 분류 결과를 살펴보면 저농도 0.1% 이하(극약), 중농도 0.1-0.2%(약), 0.2-0.4%(중), 그리고 고농도 0.3-0.4%(강)로 구분하고 농도별 벼는 중농도 약으로 1.56-3.13 dS/m에 해당함 (표 24)

표 24. 염농도별 재배가능 작물

분류	내염성	염농도		재배 작물
		(%)	(dS/m)	
저농도	극약	0.05-0.1	0.78-1.56	강낭콩, 당근, 딸기, 양파, 무, 상추, 레드클로바, 고구마,
중농도	약	0.1-0.2	1.56-3.13	옥수수, 감자, 양배추, 시금치, 오이, 토마토, 브로콜리, 벼
	중	0.2-0.3	3.13-4.69	수단그라스, 톨페스큐, 휘트그라스, 호박, 유채, 자운영,
고농도	강	0.3-0.4	4.69-6.25	페레니알라이그라스, 호밀, 사탕수수
	극강	0.4-0.5	6.25-7.81	대맥, 버뮤다그라스, 목화, 사탕무, 이탈리아안라이그라스,

- 이와 별도로 Rhoades 등 (1992)이 제시한 결과를 살펴보면 (표 25), 벼의 적정 생육범위는 1.5-3.0 dS/m로 정함

표 25. 포화침출법에 근거한 근권 평균 염류농도 기준 (Rhoades et al. 1992)

Crop sensitivity	범위 (EC _{SE} , dS/m)	Crop example
민감 (Sensitive)	0-1.5 (또는 1.3)	Bean, Pea, Onion, Carrot, Peach, Clover
다소 민감(Moderately Sensitive)	1.5-3.0	Rice , Maize, Broad Bean, Alfalfa, Tomato, Grape
중간 내염 (Moderately Tolerant)	3.0-6.0	Sorghum, Soybean, Wheat, Red Beet
내염 (Tolerant)	6.0-10.0	Barley, Cotton, Sugar Beet, Date Palm
고내염 (Very Tolerant)	> 10	Atriplex, Agropyron, Kochia, Salsola
생육 불가 (No Plant Growth)	> 30-40	(Estimated)

- 주요 작물의 내염성은 작물의 종류에 따라 상이하하며, EC_e 기준 내염성은 보리(8.0), 목화(7.7), 사탕무(7.0), 밀(6.0), 라이그라스(5.6), 대두(5.0), 톨페스큐(3.9), 땅콩(3.2), 벼(3.0), 알팔파(2.0), 옥수수과 감자(1.7) 순서임 (Smith and Doran, 1996)
- 따라서, EC_e 8.0 dS/m 이상인 토양에서는 대부분의 작물 재배가 어려움

표 26. 주요 작물의 내염성 한계 (Smith and Doran, 1996)

작물	내염성 한계 EC_e (dS/m)
보리	8.0
목화	7.7
사탕무	7.0
밀	6.0
라이그라스	5.6
대두	5.0
톨페스큐	3.9
땅콩	3.2
벼	3.0
알팔파	2.0
옥수수, 감자	1.7

- Maas and Hoffman (1977)와 FAO (2002)는 그림 7에서 보는 바와 같이 작물별 염해에 대한 최저 염농도(수량성 100%)-최고 염농도(수량성 0%) 기준을 설정하였다. 염해에 민감한 작물로 분류된 벼의 최저 염농도는 2 dS/m, 최고 염농도는 8 dS/m로 정하고 있음

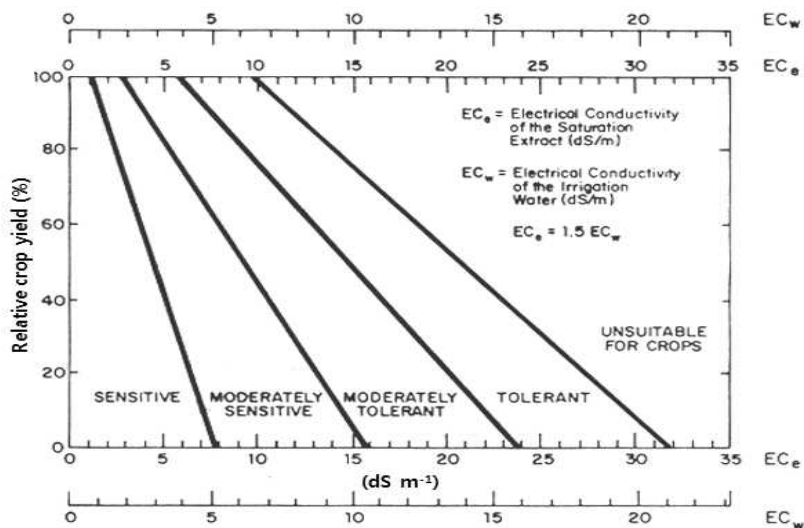


그림 7. 염해 내성 최저-최고 전기전도도에 따른 작물 생산성 (Maas and Hoffman, 1977; FAO, 2002)

- 일반적으로 벼는 염류에 매우 민감한 작물로 토양의 전기전도도가 EC_e 기준 3.0 dS/m 를 초과하면 수량손실이 발생함. 예로 EC_e가 3.5 dS/m 이상이면 10%의 수량 감소가 발생하고 50% 정도의 수량 감소가 발생하는 EC_e 값은 7.2 dS/m 정도로 알려져 있음
- 벼의 생육시기별 염분 허용한계를 요약하여 보면 (표 27) 발아기에는 염분농도가 높아 도 발아는 가능하나 염분농도가 0.6% 에서부터 발아가 늦어지며 1.4% 이상에서는 발아가 불가능함. 따라서 발아에서부터 이앙할 때까지는 염분농도 0.09% 이하가 되도록 해야 하며, 이앙 후 활착기간은 벼의 전 생육기간 중 염해를 가장 받기 쉬운 시기로서 이 시기에는 0.05% 이하로 염분농도 유지가 필요함. 활착 후에는 뿌리의 발달이 왕성하고 아울러 지상부 생육도 왕성하기 때문에 0.13%의 비교적 높은 농도에서도 정상 생육이 가능함. 그러나 영양생장기를 지나 생식생장기로 접어들어 유수형성기로부터 수잉기까지는 0.07%, 수잉기부터 출수기까지는 0.09% 이하로 유지시켜야 하며 이후는 염해에 크게 민감하지 않으므로 0.13% 이하만 유지하면 정상적인 벼 생육을 할 수 있음

표 27. 벼 생육단계별 성장장애 한계농도 (三重顯, 1954)

생육단계	모내기	이앙기-활착기	활착기-유수형성기	유수형성기-수잉기	수잉기-출수기	등숙기
한계 염소(Cl) 농도 (ppm)	< 500	< 300	< 700	< 400	< 500	< 700
염분농도(%)	0.09	0.05	0.13	0.07	0.09	0.13
EC (dS/m)	1.41	0.78	2.03	1.09	1.41	2.03

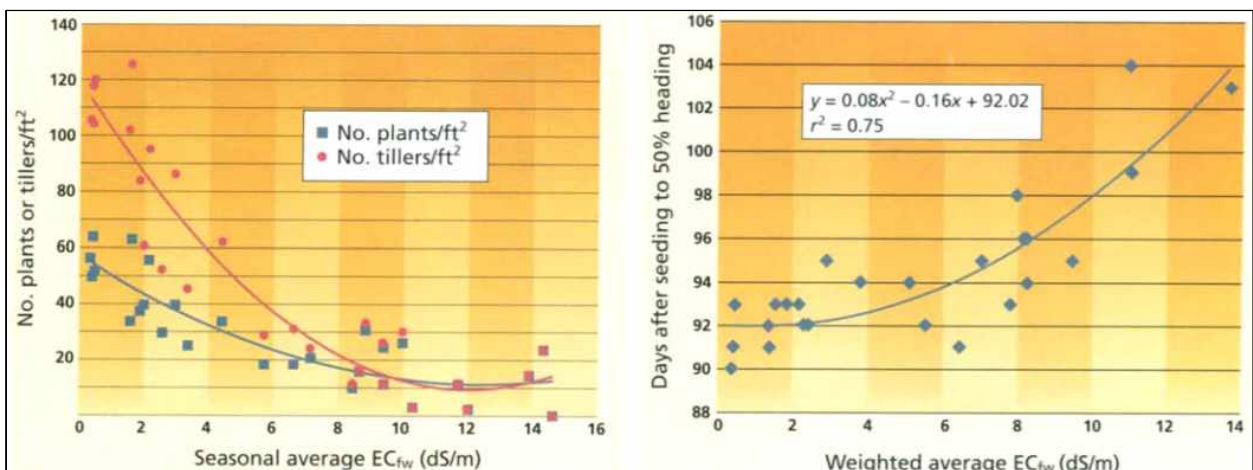


그림 8. 토양염도에 따른 분얼(좌) 및 유수형성(우) 특성 (Grattan et al., 2002)

- 2011년 미국 USDA NRCS 자료에 따르면 논토양의 EC가 2.0 dS/m 이하에서는 수량에 영향을 미치지 않으나 EC가 2.6, 3.4 dS/m 이상으로 증가함에 따라 수량손실은 10%, 25%로 증가함 (표 28). 25% 수량감소에 해당하는 전기전도도 값은 USDA 값이 3.4 dS/m 이상이고 미에 아키라 결과는 3.91 dS/m로 USDA 결과보다 약 0.5 dS/m 정도 높음

표 28. 벼 생육단계별 성장장애 한계농도 (USDA, 2011)

작물	100%		90%		75%		50%		0%	
	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w
벼 (논)(<i>Oriza sativa</i>)	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11	7.6

- California Agriculture가 2002년도에 발표한 자료에 따르면 수량감소가 발생하는 전기전도도는 약 1.96 dS/m이며 (그림 9), 25%의 수량감소가 발생하는 전기전도도는 약 2.58 dS/m인 것으로 조사되었음

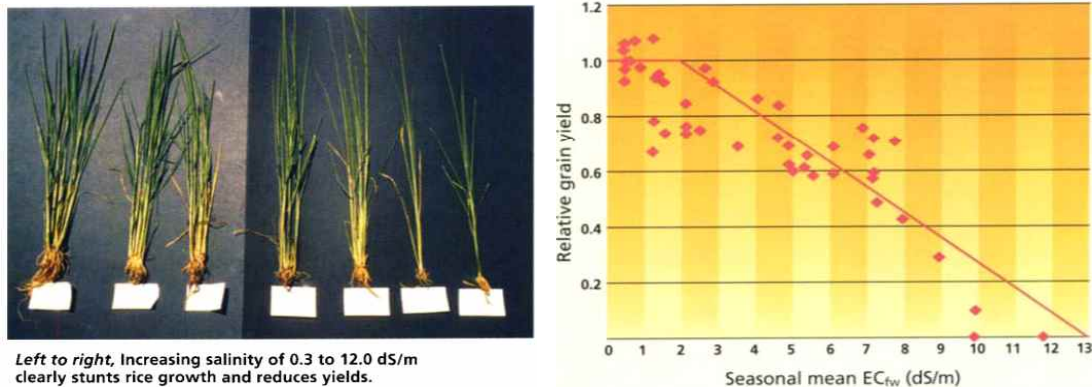


그림 9. 토양염도에 따른 수도생육(좌)와 수량생산성(우) (Grattan et al., 2002)

- 이러한 조사 결과에 따른 상대작물수확량(Y, %)은 주어진 염류조건 (EC_{se}, dS/m)에서 작물별 수확량을 환산한 것으로 아래 공식을 이용하여 얻을 수 있음 (Maas and Hoffman, 1977)

$$Y (\%) = 100 - 9.1 (EC_{avg} - 1.98)$$

EC_{avg} = 수도재배기간 중 평균 전기전도도 (EC_e)

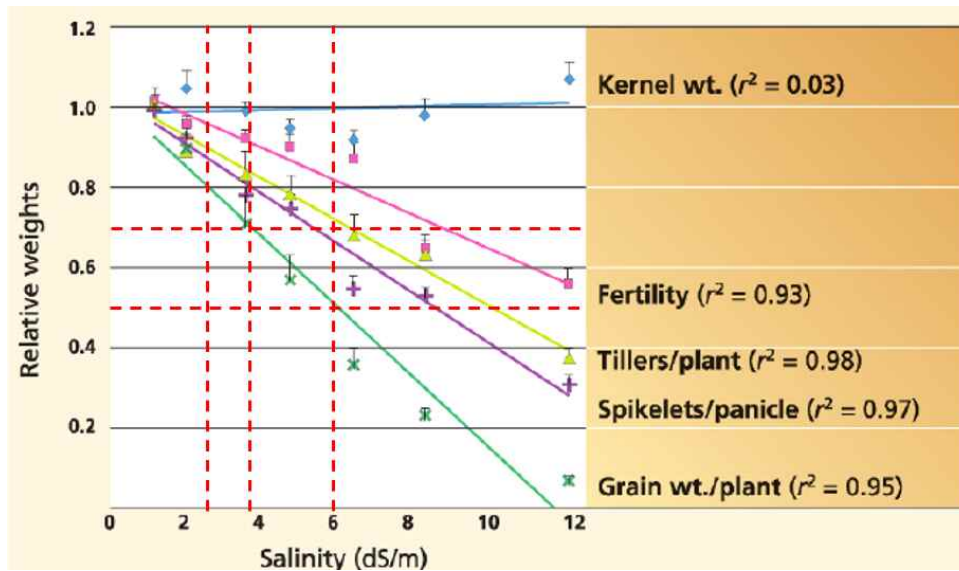


그림 10. 토양의 전기전도도에 따른 수량생산성 (Grattan et al., 2002)

- 상대작물수확량 공식을 이용하여 각각의 수확량에 대한 EC_e 를 환산한 결과 약 70% 벼 수확량에 대한 EC_e 는 5.26 dS/m 정도로 추정됨 (표 29)

표 29. 토양 EC_e 에 따른 벼 상대작물수확량 ($Y = -9.1X + 117.84$)

수확량(Y, %)	100	91.4	82.3	73.2	64.1	55.0	45.9	36.8	27.7	18.6	9.55	0.45
EC_e (X, dS/m)	1.96	2.9	3.9	4.9	5.9	6.9	7.9	8.9	9.9	10.9	11.9	12.9

- 염농도에 따른 벼 수량 변화로 일반적인 염류토양에서는 3.0 dS/m에서부터 감소하기 시작하며, EC_e 가 6-7 dS/m 범위에서 수량이 50% 감소하는 것으로 보고됨 (Maas and Hoffman, 1977).
- 간척지 염류-나트륨성 토양에서 수행한 연구 결과에 의하면, 벼 수량은 EC_e 6 dS/m 이하에서는 변화가 없고 20 dS/m에서 50% 감소하는 것으로 보고된 바 있음 (Rased et al., 2003).

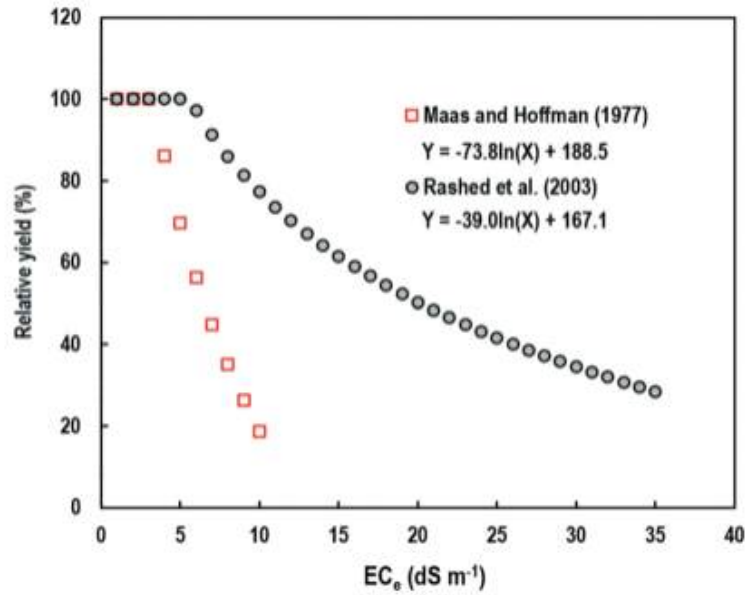


그림 11. 염류 토양 EC_e 에 따른 벼 상대 수량 감소율

- 우리나라에서 전남지역 소재 간척지 대상 2013년 연구 결과에 의하면, $EC_{1.5}$ 기준으로 벼 백미 수량은 최대 $631 \text{ kg } 10a^{-1}$ 에서 염농도가 증가함에 따라 최저 $200 \text{ kg } 10a^{-1}$ 이하로 감소하는 것으로 나타났음 (Lim et al., 2020)
- 하지만, 해당 연구에서 $EC_{1.5}$ 와 백미 수량 회귀식의 결정 계수(r^2)가 0.138로 벼 백미 수량 변화는 염농도 이외 다른 요인에 의해서도 크게 영향을 받는 것을 알 수 있음

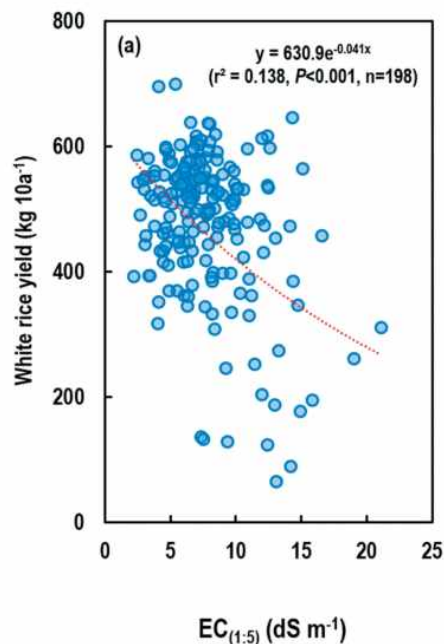


그림 12. 우리나라 전남 지역 간척농지의 $EC_{1.5}$ 변화에 따른 벼 백미 수량 변화 (Lim et al., 2020)

- 2018-2021년에 국립식량과학원이 16개 간척지구 153개 필지를 대상으로 조사한 결과에 의하면, 표토(0-20 cm)와 심토(20-40 cm)의 $EC_{1.5}$ 와 EC_e 모두가 벼 수량과 95% 수준에서 부(-)의 상관관계가 있었음
- 하지만, 상관관계 회귀식의 결정 계수(표토 0.067, 심토 0.027)가 매우 낮아서, 벼 수량은 염농도 이외의 다른 요인에 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났음. 결정 계수에 의하면 토양 염농도는 벼 수량 변화에 대한 다양한 요인 중 10% 미만에 해당함

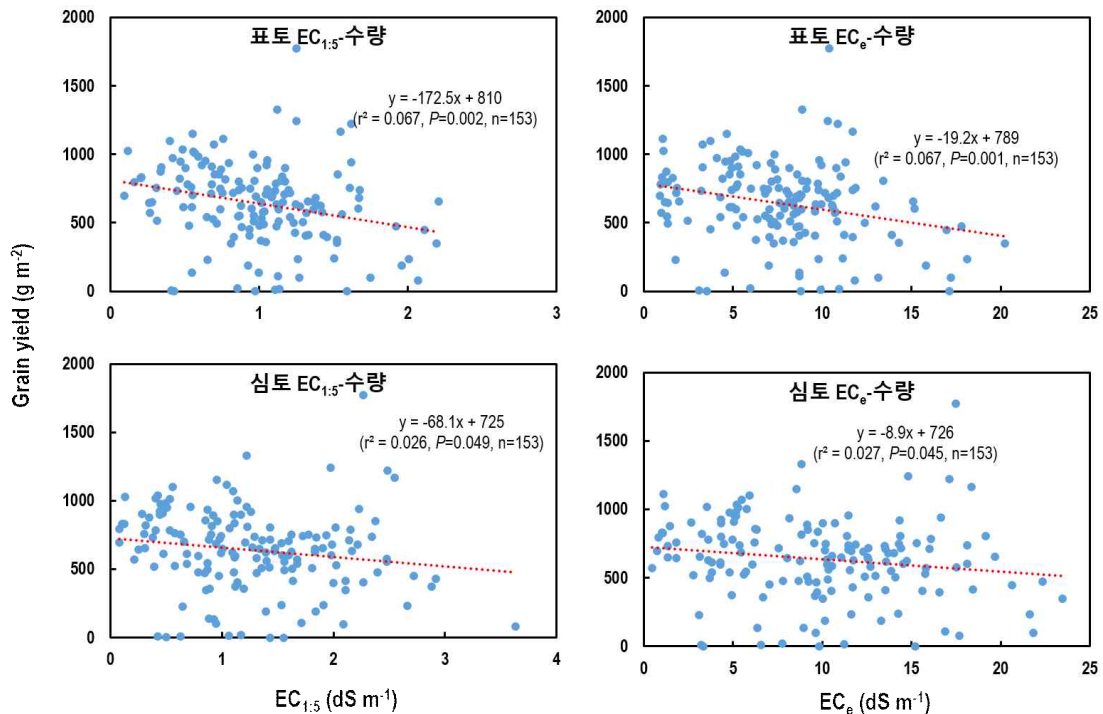


그림 13. 우리나라 16개 간척지구 153개 필지 대상으로 조사한 표토(0-20 cm)와 심토(20-40 cm)의 $EC_{1.5}$ - EC_e 와 벼 수량 상관관계

- 간척지를 포함하는 염류 토양에서 벼 생육과 수량은 매우 다양한 영농관리 인자에 의해 영향을 받음
- Lim et al. (2020)의 관련 연구 리뷰 결과에 의하면, 염류 토양에서 벼 수량은 시비관리, 석고 시용, 유기물 투입, 경운 관리, 파종량, 관개용수 염농도, 관개 빈도와 배수 등에 의해서 크게 달라짐 (그림 14)
- 따라서, 자연적인 고염농도 조건에서 인위적인 영농관리가 투입되는 간척농지에서 염농도가 벼 수량에 미치는 영향을 명확하게 분리하여 계량화하는 것은 한계가 있음

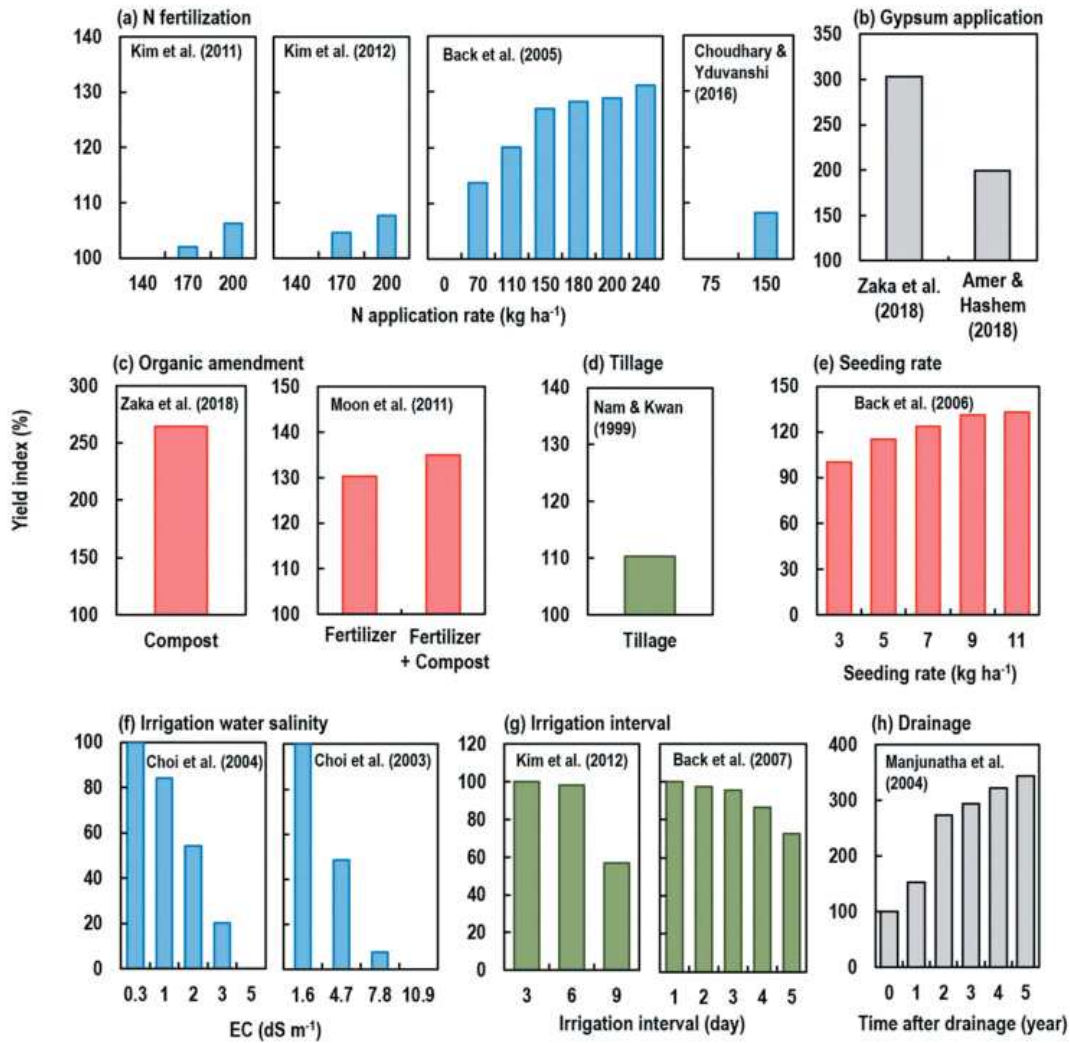


그림 14. 염류 토양에서 영농관리 조건에 따른 벼 수량 지수(기준 100) 변화 (Lim et al., 2020)

5. 간척지 토양 표토와 심토의 염농도 특성 분석

가. 토양 깊이별 염농도

- 한국농어촌공사에서 고흥(4), 군내(1), 남포(1), 석문(1), 영산강(27) 등 모두 34개 필지에서 100 cm까지 20 cm 간격으로 EC_e 를 조사한 결과에 의하면, EC_e 는 토심에 따라 뚜렷하게 증가함
- 깊이별 평균 EC_e 는 0-20 cm (5.7 ± 2.7 dS/m) → 20-40 cm (8.2 ± 4.0 dS/m) → 40-60 cm (11.2 ± 5.4 dS/m) → 60-80 cm (14.2 ± 6.6 dS/m) → 60-100 cm (17.3 ± 7.5 dS/m)로 증가
- 토심이 증가할수록 EC_e 는 0-20 cm와 비교하여 20-40 cm (1.5배) → 40-60 cm (2.1배) → 60-80 cm (2.8배) → 80-100 cm (3.8배)로 증가

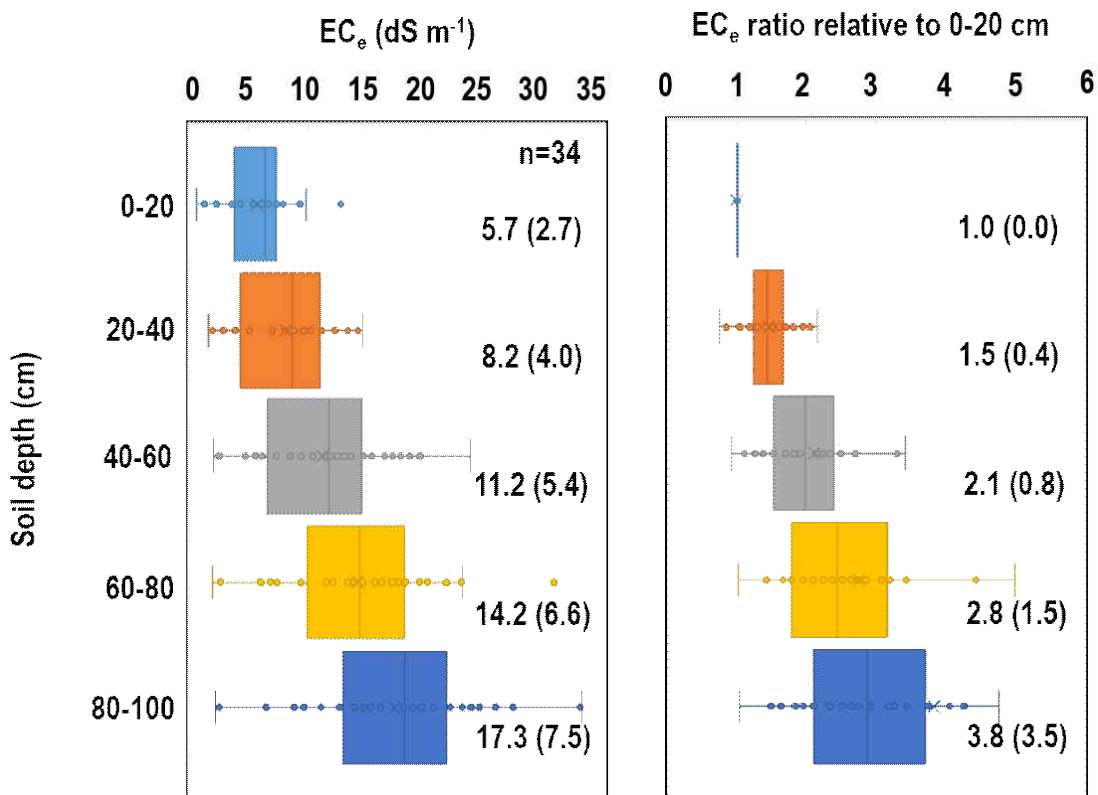


그림 15. 주요 간척지구 필지(34개)의 토심별 EC_e 변화 및 0-20 cm 기준 상대적 EC_e 비율

나. 경작년수에 따른 표토와 심토 염도 비교

- 농어촌공사(2004)는 간척년대별로 토양의 염류도 변화를 추정하였음. 그 결과 그림 16과 같이 EC_e 로 염류토의 기준인 4 dS/m 이하로 유지하기 위해서는 20년 이상의 기간이 소요되었고, 0.3% (4.7 dS/m) 이하의 염류도를 유지하기 위해서는 15년 정도의 기간이 필요하다고 보고하였음

- 또한, 이 결과를 이용해 표토와 심토의 토양 염도를 비교해 보면 경작년수가 1~3년인 간척지 준공 직후는 표토와 심토 비율이 약 0.65였으며, 경작년수가 증가할수록 비율은 감소하여 경작년수가 20년이 넘을 경우 표토의 제염 효과로 표토와 심토 비율은 약 0.4 정도로 낮아짐

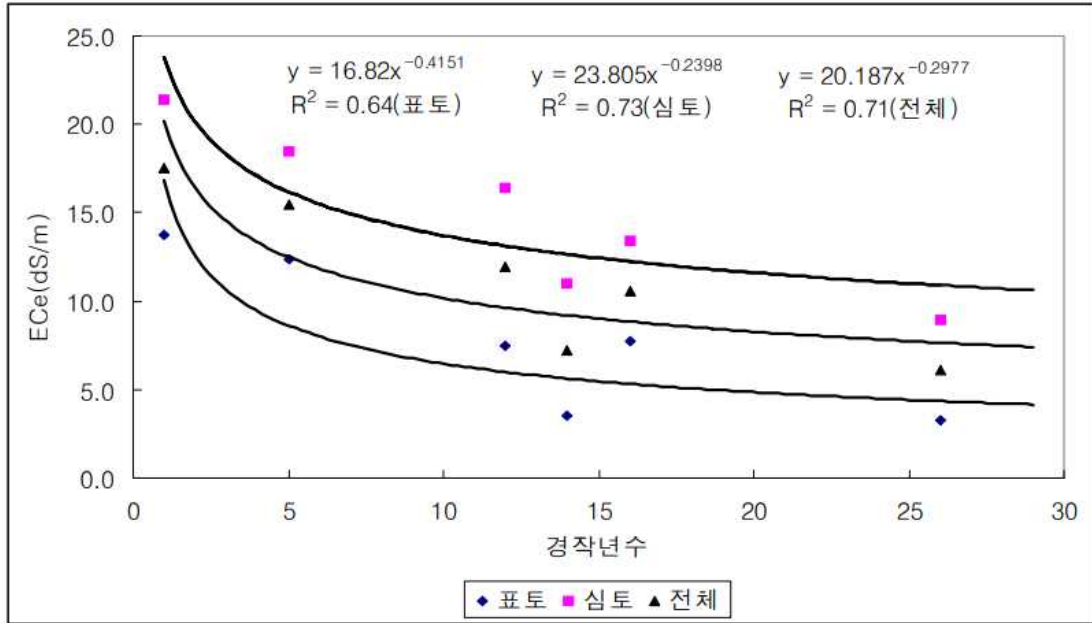


그림 16. 경작년수에 따른 토양염류도 추정

다. 태양광 간척농지 일시사용 관련 분석결과

- 태양광 간척농지 일시사용으로 신청된 면적은 3,721 ha ('19.07.01~'21.11.30 기준)이며, 이 토양 분석결과를 정리하여 표토와 심토의 비율을 정리하였음
- 토양 분석결과 표토와 심토의 평균값은 표토가 심토의 2/3 수준인 것으로 나타났으며, 담수기와 비담수기에 따른 차이도 있었음. 하지만 이 분석결과는 1회 실시한 것을 정리한 것이기에 담수기에 실시된 지역의 염농도가 높아 담수기가 비담수기보다 높은 것으로 나타났다고 판단됨

표 30. 태양광 간척농지 일시사용으로 신청된 토양 분석결과

	전체	담수기	비담수기
표토	6.2 dS/m	6.9 dS/m	6.0 dS/m
심토	9.3 dS/m	9.7 dS/m	9.3 dS/m

- 표토와 심토의 관계를 전체 토양 분석결과로 그림 17과 같이 분석한 결과 상관계수(R^2)가 0.1563으로 낮으며, 특히 기준이 포함되는 10 dS/m 이하에서는 표토와 심토의 관계를 알아보기 어려웠음

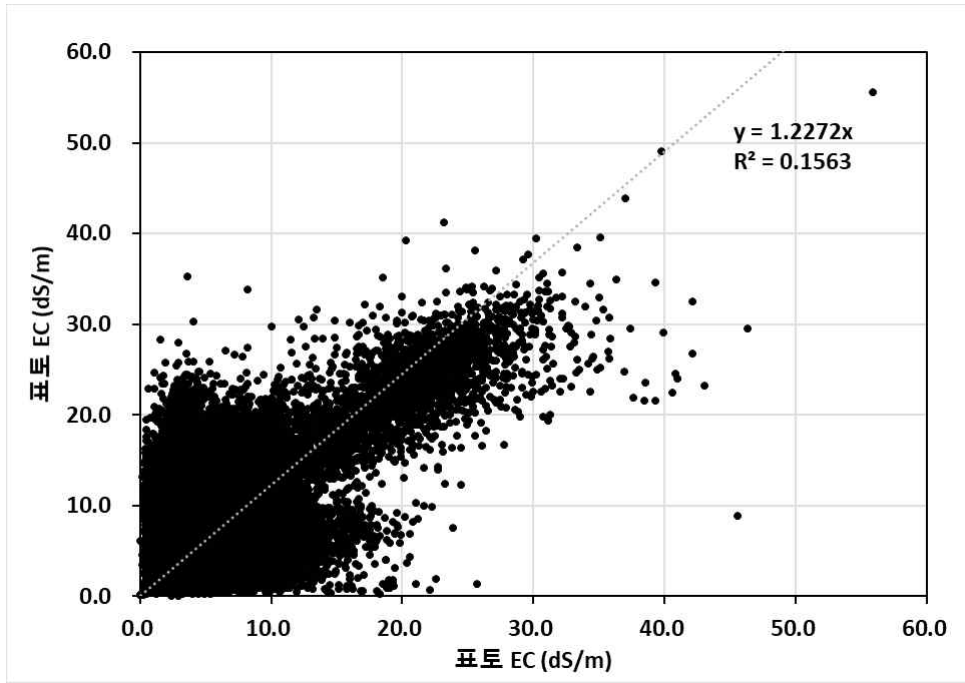


그림 17. 표토와 심토 EC 관계

- 이에 전체 시료를 담수기와 비담수기로 구분하여 정리한 결과 담수기에서 표토와 심토의 관계에서 상관계수(R^2)가 0.6709로 높은 선형의 관계를 가지고 있었으며, EC 10 dS/m 이상과 이하에서 표토와 심토 간의 관계가 다르게 나타났음

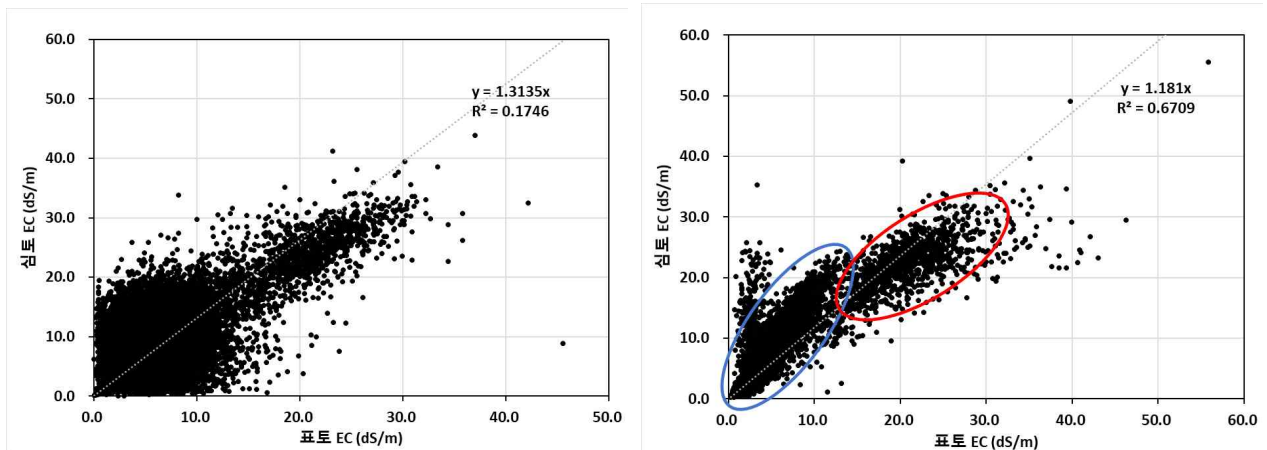


그림 18. 담수여부에 따른 표토와 심토 EC 관계 (좌: 비담수기; 우: 담수기)

- 관정기준이 포함되는 EC 10 dS/m 이하만을 이용해 추세선을 다시 그려봤을 때 표토 대비 심토가 1.67배 높다는 관계식을 찾아낼 수 있었으며, 이를 이용해 표토 기준을 이용한 심토 기준 설정에 이 관계식을 이용할 수 있을 것으로 판단됨

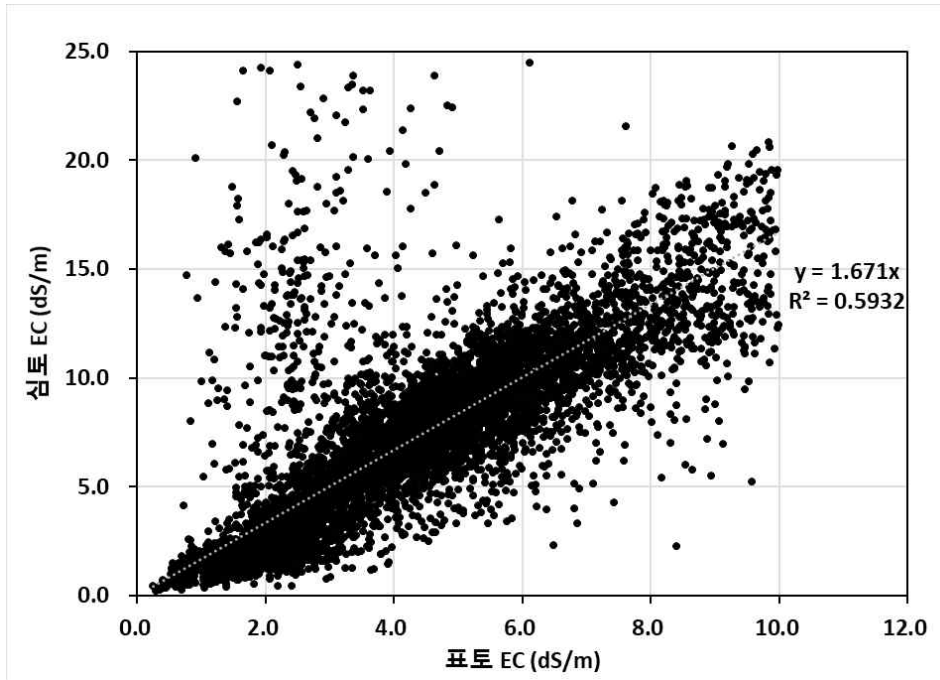


그림 19. 담수기 EC 10 dS/m 이하에서의 표토와 심토 EC 관계

6. 시기별 토양염도 변화

가. 토심별 EC_e 경시적 변화

- 한국농어촌공사의 영산강 3-1 지구 간척농지 토심별 염농도 자동계측기 결과 분석에 의하면, 40-80 cm 깊이의 EC_e는 2-3년간 큰 변화가 없음
- 반면, 0-20 cm의 EC_e는 연간 변화가 뚜렷하며, 특히 영농기에는 EC_e가 감소하고 수확기 이후에는 다시 증가하는 경향을 보임
- 한편, 20-40 cm의 EC_e는 영농기/비영농기에 따른 변동이 크지 않지만, 점진적인 감소 추세를 보임

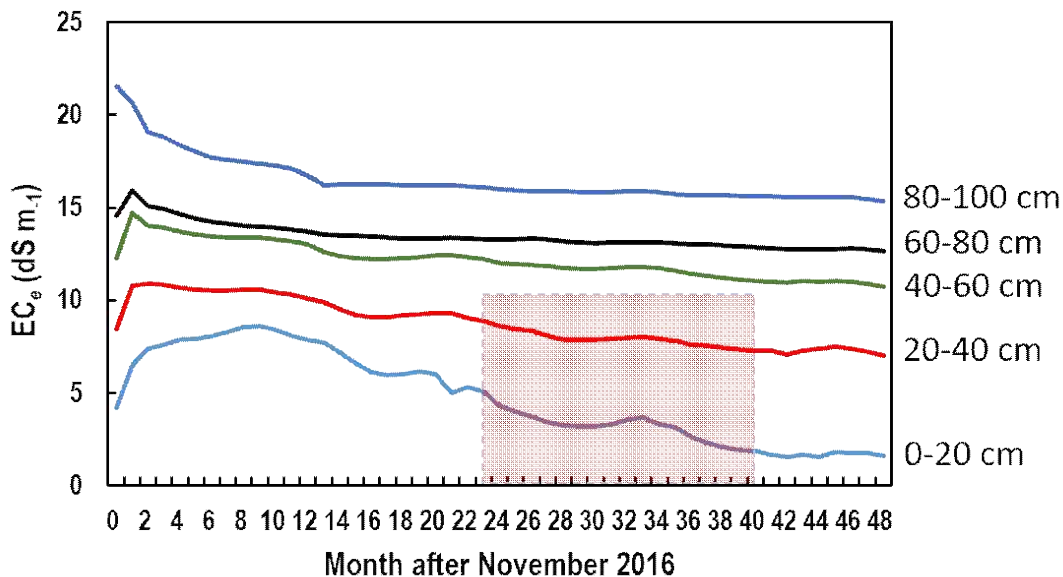


그림 20. 영산강 III-1 지구 농경지 필지의 토심별 EC_e 장기 변화

- 이에 간척농지 관정을 위한 시료 채취는 표토를 기준을 할 경우 시기별 편차가 클 것으로 판단되며, 이럴 경우 생육시기로 한정을 지어야 할 것으로 판단됨
- 또한, 현재 기준인 심토(30-60 cm)는 경시적 변화가 적은 토양 층인 것으로 보여지며, 이에 심토를 채취할 경우에는 연중 언제나 시료를 채취하여 분석을 하더라도 편차가 적을 것으로 판단되며, 사업의 진행에 용이할 것으로 판단됨

7. 간척지 토양 경작 적합도 분류 기준 설정

가. 간척농지의 농업생산성 손익분기점 기준 설정

- 2021년 농촌진흥청이 발행한 농업경영자료 (2020-03) 2020 농업과학기술 경제성 분석 기준 자료집에 따르면 2016-2020년까지 10a당 평균 쌀 수확량은 517kg 이었으며 2020년의 경우 10a당 쌀 수확량은 483kg로 조사 기간 중 가장 낮은 수량생산성을 보였음. 그리고 10a당 총소득을 살펴보면 5년 평균 약 107만원 정도였으나 2020년은 약 114만원 정도였음 (표 31)

표 31. 10a당 쌀생산량 및 총소득 (2016-2020)

구분	2016	2017	2018	2019	2020	5년평균
생산량 (kg 10a ⁻¹)	539	527	527	513	483	517
가격(원/20kg)	36,200	31,847	42,891	49,323	47,047	41,462
총소득(원)	975,590	839,168	1,130,178	1,265,135	1,136,185	1,069,251

- 농촌진흥청이 발표한 2020년 쌀재배농가 소득 평가 결과를 살펴보면 10a 당 수확량 483kg에 대한 총 수입은 약 114만원이고 이중 경영비가 48.4만원 소요되어 실소득은 약 65.1만원 정도로 추정된다 (표 32)

표 32. 쌀재배농가 소득 평가 (2016-2020)

작목	수량(kg)	총수입 (원)	경영비(원)	소득(원)	소득율(%)
쌀	483	1,136,185	484,522	651,663	57.4

- 표 32를 기준하여 쌀 생산량에 대한 가격을 산정한 결과 손익분기점 (Break even point, BEP)은 경영비 484,522원이 도달하는 10a 당 206 kg이며 10a당 평균생산량 438 kg에 대한 70% 쌀 수확량은 약 306 kg으로 가격은 약 79.5만원으로 손익분기점 대비 약 36.9만원 수익이 발생함. 한편 손익분기점에서의 토양의 염도(EC_e)는 표 29에서 얻은 $Y(\text{수량생산성, \%}) = -9.1X + 117.84$ 공식으로 환산한 결과 약 8.27 dS/m정도로 추정됨

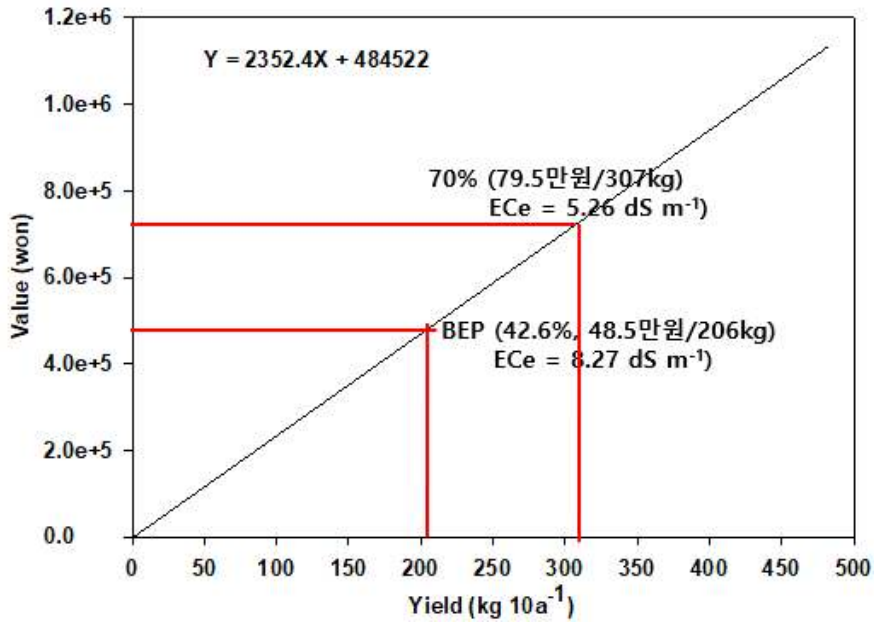


그림 21. 쌀생산량에 대한 가격

나. 간척농지의 작물생산성 제한 요인 기준 설정

- 자연 상태의 토양은 각각의 입자크기(입경)에 따라 모래, 미사, 점토 등 다양한 크기의 토양입자로 구분되며 수분침투, 통기성, 토양 내 수분저장 능력, 경운, 토양비옥도에 영향을 미치는 중요한 토양 구성요소인 토성은 모래, 미사, 점토입자의 상대분포비율에 따라 결정됨
- 미국 농무성에서 제시한 기준에 따르면 직경이 2 mm 이하인 입자를 토양으로 구분하며 0.05-2 mm를 모래(sand), 0.002-0.05 mm를 미사(silt), 0.002 mm 이하를 점토(clay)로 분류함. 한편 입경이 2 mm 이상의 입자를 크기별로 잔자갈(fine gravel, 2-5 mm), 중자갈(medium gravel, 5-20 mm), 조자갈(coarse gravel, 20-76 mm), 잔돌(cobble, 76-250 mm), 돌(stone, 250-600 mm)로 구분함. 그러나 자갈의 크기와 함량은 경운작업에 문제점을 야기할 뿐만 아니라 뿌리 생육, 토양 내 수분보유력과 수분이동성에 영향을 미쳐 상대적 농업 생산성과 품질에 제한요인으로 작용함

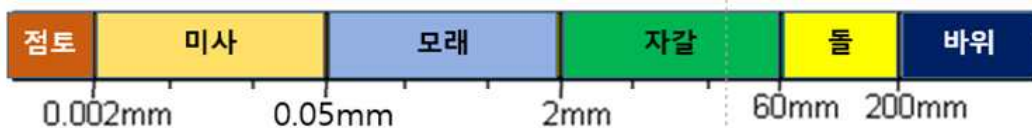
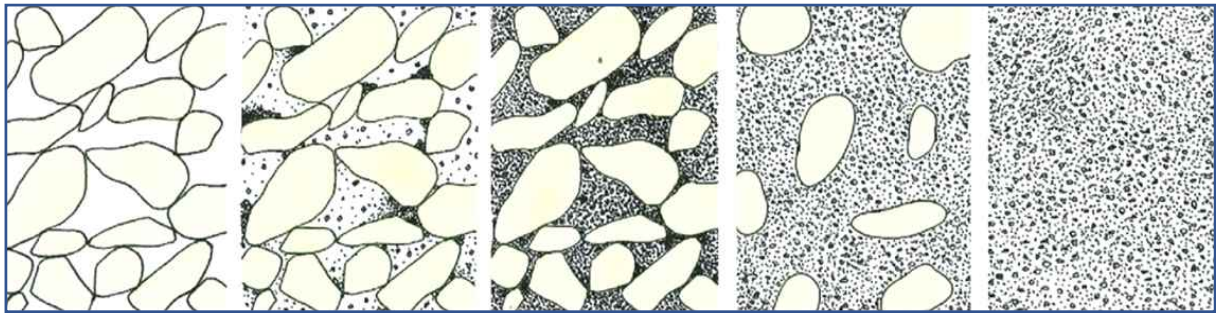


그림 22. 입경크기에 따른 토양 입자 분류표



그림 23. 간척지 지표면에 노출된 석력과 석력크기별 분류

- 토양공극은 토양입자 배열에 따른 입자간 공간을 의미하며 입자의 크기와 배열에 따라 토양공극의 크기와 부피가 결정되며 토양공극은 공기와 수분의 통로로 이용된다 (그림 24)



자갈로 구성된 토양 부분 자갈-토양입자로 구성된 토양 자갈-토양입자로 구성된 토양 분산된 자갈로 충전된 토양 토양입자로 충전된 토양

그림 24. 토양입자 입경크기에 따른 토양 내 입자분포 배열과 구조

- 한편 이러한 토양입자 크기와 분포는 토양 내 수분함량에 영향을 미쳐 재배작물의 유형을 결정하게 되며, 수도재배는 그림 25에서 보는 바와 같이 5월 10일경 모내기시기부터 본답에 물을 대기 시작하여 담수상태로 유지하며 중간에 헛새끼칠대 약 15일 정도 물배기를 하고 10월 5일 이후는 완전 물빼기를 하고, 담수기의 논물 담수깊이는 최소 2 cm에서 최대 7 cm 정도를 유지하여야 함 (그림 25). 따라서 적정 수량생산을 확보하기 위해서는 수도재배 시기별 담수깊이를 유지하여야 함
- 담수 깊이는 재배시기별 증발산량 뿐만 아니라 토양이 가지고 있는 수분의 하향 이동성에 영향을 받음

생육 과정	싹 날때	못 자리 때	모 내기 때	새끼 칠때			마디사 이 자랄때		출 수 기	여 물 때				
				뿌리 내릴 때	참새끼 칠때	헛새끼 칠때	배동 받이 때	이삭 벌때		젖 익을 때	풀 익을 때	누렇게 익을 때	다 익을 때	고 친 때
논물 깊이(cm)				2~3	5~7	2~3	0	2~4	3~4	← 2~3 →	← 0			
물 대기	상 자 육 요	모 년 직 후 깊 게	알 게 대 기		중 간 물 때 기	보 통	걸 러 대 기	보 통	알 게 걸 러 대 기		완 전 물 때 기			
Date	04.10	05.10	05.25	07.01		07.15	07.30	08.25		10.05				

그림 25. 수도재배시기별 물관리 기준

- 토양 내에서의 수분이동은 수분이 토양의 공극 속으로 들어가서 토양수가 되는 과정인 침투와 토양 내로 유입된 수분이 토양 매질을 통하여 수직 또는 수평적으로 이동하는 투수로 구분되며 논에서 담수깊이는 침투와 투수성에 따라 논물의 담수 깊이는 결정됨
- 투수성은 토양이 가지고 있는 토양입경분포와 배열 특성에 따른 공극의 크기, 유기물함량 등에 영향을 받으며 단위면적당 흐르는 물의 속도를 유속(flux, q)라고 하며, 유속은 수두편차 ($\Delta H/\Delta X$)에 비례하며 이들 사이의 비례상수를 수리전도도계수(hydraulic conductivity coefficient)라고 함. 담수상태하의 논은 포화상태로 수리전도도는 토양 전체에서 동일하므로 유속은 다음 식으로 나타낼 수 있음

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta H}{\Delta L} = -K \frac{H_1 - H_2}{L}$$

- 여기서 Q(cm³)는 단위시간당 일정면적을 통과하는 물의 양이며 이를 배출율(discharge rate)라고 한다. H는 수두(hydraulic head)이며 L은 수분이 통과한 토양의 깊이를 나타낸다. $\Delta H/\Delta X$ 는 수두구배(total head gradient)이다. 표 33은 토성별 일반적인 포화수리전도도계수(Ks)를 나타낸 것으로 직경이 2 mm 이상인 자갈의 포화수리전도도(Ks)는 초당 1.5 x 10⁻¹ - 2.0 x 10⁻² cm, 시간당 72~570 cm, 그리고 1일당 1.30E+04~1.73E+03 cm 정도이며 자갈과 모래함량이 증가하고 점토함량이 감소하면 중점토 토성의 Ks는 1.16E-06 cm s⁻¹에서 자갈이 포함된 사질양토의 Ks는 9.26E-03 cm s⁻¹로 급격이 증가한다. 한편 용적밀도가 증가하면 공극율이 감소하여 (그림 26) 동일 토성일지라도 용적밀도가 증가하면 공극율이 감소하여 Ks는 감소한다 (그림 27, 28). 그리고 그림 9에서 보

는 바와 같이 토양 내 자갈함량이 증가하면 용적밀도도 증가하나 Ks는 감소함

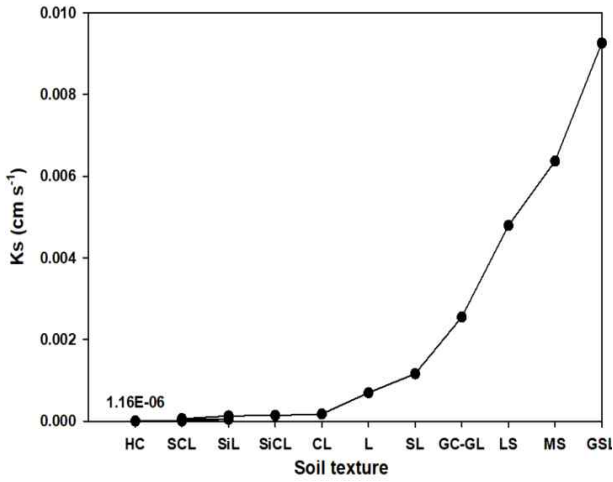


그림 26. 토성별 포화수리전도도 변화 특성

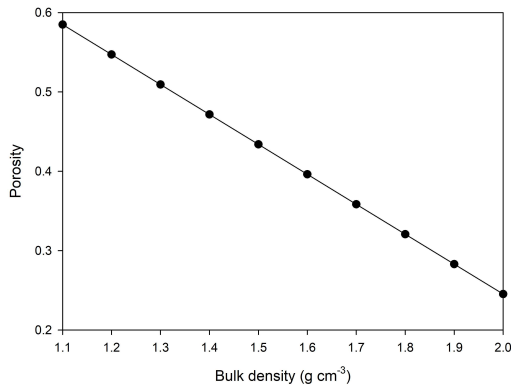


그림 27. 용적밀도별 공극율 상관관계

표 33. 토성별 포화수리전도도

토성	Ks (cm s ⁻¹)
Heavy clay (HC)	1.16E-05
Sandy clay loam (SCL)	2.31E-05
Silty loam (SiL)	4.63E-05
Sandy clay (SC)	5.79E-05
Silty (Si)	1.16E-04
Silty clay loam (SiCL)	1.39E-04
Clay loam (CL)	1.39E-04
Loam (L)	6.94E-04
Sandy loam (SL)	1.16E-03
Cravel clay (GC)	1.16E-03
-gravel loam (GL)	1.16E-03
Loamy sand (LS)	2.89E-03
Medium sand (MS)	4.63E-03
Gravel sandy loam (GSL)	5.79E-03

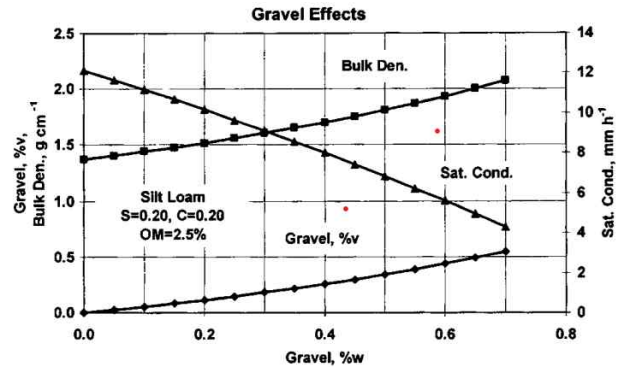


그림 28. 자갈함량에 따른 용적밀도와 Ks 변화

○ 한편 토성별 용적밀도와 유기물함량 변화에 따른 포화수리전도도는 다음과 같은 3가지 공식을 이용하여 추정이 가능함

- 일반토양

$$\log(K_s) = 9.56 - 0.81\log_{10}(\% \text{ silt}) - 1.09 \log_{10}(\% \text{ clay}) - 4.64(B_d)$$

- 사질토양

$$\ln(K_s) = 45.8 - 14.34 \cdot D_b + 0.001481 \cdot SI_2 - 27.5 \cdot D_b - 1 - 0.891 \cdot \ln(SI) - 0.34 \cdot \ln(OM)$$

- 양토 및 식토

$$\ln(K_s) = 42.6 + 8.71 \cdot OM + 61.9 \cdot D_b - 20.79 \cdot D_b^2 - 0.2107 \cdot OM^2 - 0.01622 \cdot C \cdot OM - 5.382 \cdot D_b \cdot OM$$

(D_b : 용적밀도, OM : 유기물함량, C : 점토, SI : 미사)

- 상기 공식을 적용하여 환산한 포화수리전도도와 실측치 간의 r 값은 0.85(미사질양토)와 0.89(전토성)으로 간척지토양에서 K_s 값을 구하는데 적용하여도 문제가 없을 것으로 판단한다 (그림 29)

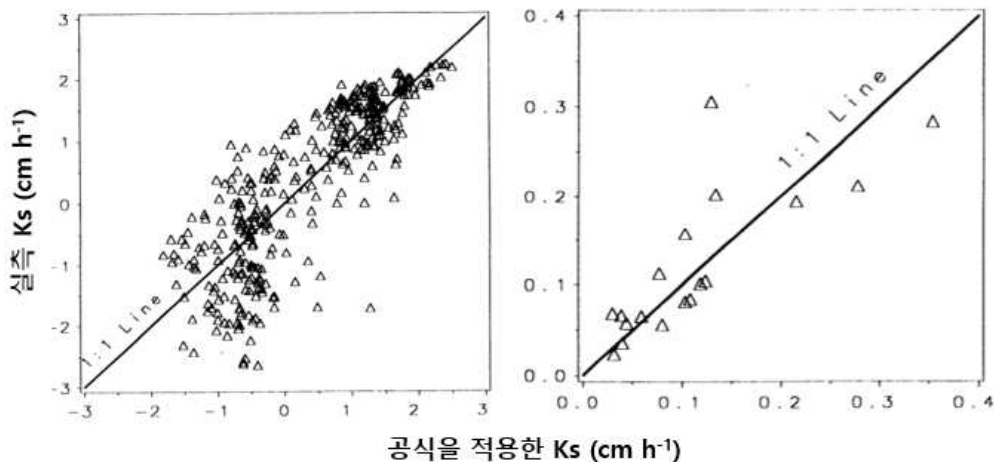


그림 29. 공식을 적용한 미사질양토(좌)와 다양한 토성의 K_s

- 따라서 이와 같은 토성별 수리전도특성을 고려할 때 뿌리내리는 시기의 최대 담수심은 7 cm 정도를 20일 이상 유지하여야 함
- 이를 기준하여 물의 깊이 (담수심 깊이 7 cm), 표층과 지표면으로부터 20 cm 깊이 사이의 포텐셜 차이, 토양의 길이 20 cm로 가정하고 공식 1에 각각의 토성의 포화수리전도도 (표 34)를 적용하여 유속을 구하면 중점토 (최소 점토함량 60%, 최대 모래함량 40%)의 경우 7 cm 깊이의 담수가 토양지표면을 통하여 토양 내로 유입된 후 논표면으로부터 물이 완전히 없어지기까지의 기간은 약 51.7일 정도 소요되나 미사질양토는 약

0.47일, 양질사토는 0.013일, 사토는 담수 후 약 0.0065일 (약 0.15시간)만에 담수한 물이 용탈되어 지속적인 관개를 실시하지 않을 경우 수도재배에 필요한 담수심을 유지할 수 없으므로 용출속도에 준하여 관개일정을 조정하여야 함

- 이 경우 논물 담수에 이용하는 관개수의 수질 등을 고려하여야 하며 담수한 논물의 침투와 투수성을 이용하여 토양 내 염을 제거하거나 염류농도를 개선하고자 한다면 용탈 요구도를 환산하여 이를 적용하는 것이 바람직함

표 34. 토성별 포화수리전도도 (Ks)에 따른 유속 및 유속에 따른 담수심 (7cm) 보수일 수

토성	Ks (cm s ⁻¹)	수두편차 (ΔH/L)	유속 (q)			보수 일수
			(cm s ⁻¹)	(cm hr ⁻¹)	(cm d ⁻¹)	
Heavy clay (HC)	1.16E-06	1.35	1.57E-06	5.64E-03	1.35E-01	51.736
Sandy clay loam (SCL)	3.47E-06	1.35	4.68E-06	1.69E-02	4.05E-01	17.295
Silty loam (SiL)	4.63E-05	1.35	6.25E-05	2.25E-01	5.40E+00	1.296
Silty loam (SiL)	1.27E-04	1.35	1.71E-04	6.17E-01	1.48E+01	0.473
Silty clay loam (SiCL)	1.39E-04	1.35	1.88E-04	6.76E-01	1.62E+01	0.432
Clay loam (CL)	1.74E-04	1.35	2.35E-04	8.46E-01	2.03E+01	0.345
Loam (L)	6.94E-04	1.35	9.37E-04	3.37E+00	8.09E+01	0.086
Sandy loam (SL)	1.16E-03	1.35	1.57E-03	5.64E+00	1.35E+02	0.052
Gravel clay (GC) -gravel loam (GL)	2.55E-03	1.35	3.44E-03	1.24E+01	2.97E+02	0.024
Loamy sand (LS)	4.79E-03	1.35	6.47E-03	2.33E+01	5.59E+02	0.013
Medium sand (MS)	6.37E-03	1.35	8.60E-03	3.10E+01	7.43E+02	0.009
Gravel sandy loam (GSL)	9.26E-03	1.35	1.25E-02	4.50E+01	1.08E+03	0.006

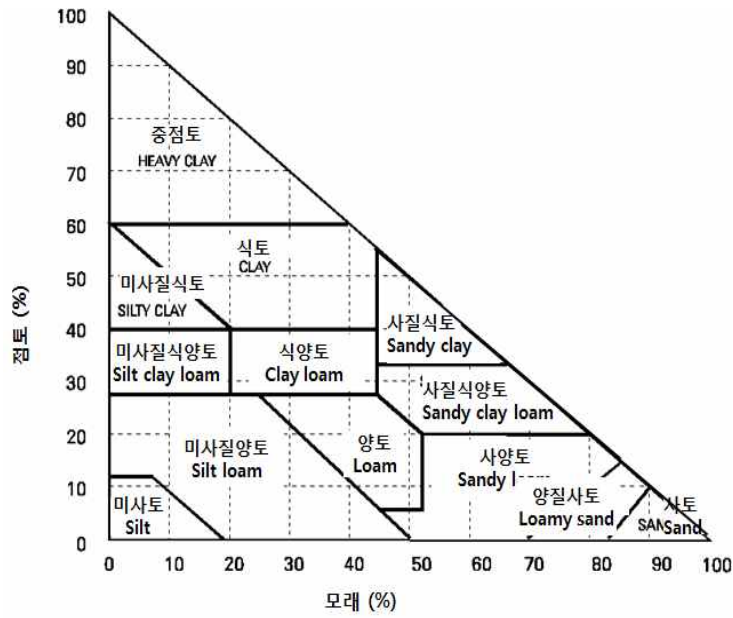


그림 30. 토양 3각 도표

○ 상기 그림 30과 표 35에서 살펴본 바와 같이 간척지 토양단면을 살펴보면 표층부터 C 층에 이르기까지 다양한 토층으로 구성되어 있으며 총 4개의 토양통으로 구성된 전남 해남 산이면 영산강 III-2 단지의 경우 조사된 토양통은 총 5개로 토성, 토색 등의 차이로 인하여 토양통은 각 층의 두께가 다른 A, B, C층이 존재함 (표 35). 따라서 토양 내 수분이동성은 인접하는 하부의 토성에 의해 수분의 이동성이 결정됨

표 35. 해남 산이면 영산강 III-2 단지 토양통 및 통별 토층분화 특성

토양통	토층깊이 (cm)	토성	토양통	토층깊이 (cm)	토성
TH	Ap1 (0-8)	Sandy loam	BC	Ap (0-15)	Silt loam
	Ap (8-27)	Sandy loam		Bg1 (15-30)	Silt loam
	Cg (27-120)	Loamy fine sand		Bg2 (30-65)	Silt loam
GP	Ap (0-12)	Sandy loam		Cg (65-110)	Silt loam
	Bg (12-60)	Sandy loam	JB	Ap1 (0-10)	Silt loam
	Cg (60-120)	Sandy loam		Ap2 (10-19)	Silt loam
PS	Ap (0-12)	Silt loam		Bg1 (19-27)	Silt loam
	B1g (12-20)	silty clay loam		Bg2 (27-85)	Silt clay loam
	B21g (12-91)	Silt clay loam		Bg3 (85-120)	Silt loam
	B22g(32-56)	Silt loam		Cg (120-160)	Silt loam
	B23g(56-91)	Silt loam			
	Cg (91-140)	Silt loam			

- 이와 같이 특성이 상이한 다층토양구조로 구성된 간척지 토양의 수분이동은 인접하고 있는 토층 간의 물리적 특성 차이에 따라 수리전도도 특성이 달라지기도 함
- 따라서 다층토양구조로 구성된 논토양은 상기 표에서 살펴봤던 단일 토층을 기준한 수리전도도계수에 근거한 논토양 적합 판정을 내리기는 어려운 실정임

2) 토양 내 석력함량과 벼재배 적정 토양 기준

- 논토양과 관련한 토양관리 및 생산성 측면에서 석력함량이 연구된 사례는 매우 미미함. 그러나 전남 해남 산이면 영산강 III-2 간척지에서 지표면으로부터 60 cm 깊이까지 토양을 조사한 결과 석력함량이 40% 이상으로 기계적 경운작업이 불가하여 논이나 밭으로 이용되지 못하고 있으며 이와 같은 유사한 사례는 서산 간척지, 남양만 간척지 등에서도 발견되고 있음 (그림 31)



그림 31. 전남 해남 영산강 간척지 지표면 암석 노출 현장(좌)과 지하수 개발 현장(우)

- 국립농업과학원이 제시한 지목별 토지이용도 중 논에 대한 추천기준과 적성등급에 대한 기준에 따르면 논토양 적성등급 기준 중 수량생산성이 보통 이상의 경우 표토에 석력이 없어야 하는 것으로 제시되어 있음 (표 36)

표 36. 수도재배 토지이용 적성등급기준

구분	1급지	2급지	3급지	4급지
생산 경영 관리	1)생산력 고. 2)집약적 경영 3)토양관리 제한 없음.	1) 생산력 보통. 2) 집약적 경영 3) 토양관리 제한	1) 생산력 낮음. 2) 수도재배 심한 제한 3) 특수관리/재배기술 필요	1) 생산력 매우 낮음. 2) 수도재배 매우 심한 제한 3) 경제적 이용 불가
2.토양조건				
토양배수	약간 불량~약간 양호(단, 지표로 부터 25 cm 이상 회색화 토양)	약간양호, 약간불량, 불량	양호, 약간양호, 약간불량, 불량	양호, 약간양호, 약간불량, 불량
토성	식질, 식양질, 미사식양질	식질, 식양질, 미사식양질	식질, 사양질, 식양질, 미사식양질, 미사사양질	모든 토성 (단 사질은 제외됨)
유효토심 (cm)	> 100	100 ~ 50	50 ~ 25	50 ~ 25
암석/경반층(Bx 층) 깊이 (cm)	> 100	100 ~ 50	50 ~ 20	20 ~ 10
석력층, 모래층	없음 - 약간 있음	없음 - 약간 있음	있음	많음
표토 석력 함량	없음	없음	없음	없음
표층 암석 노출	없음	없음	없음	없음
염농도 (dS/m)	< 4	4 ~ 8	8 ~ 16	16 <

- 영국의 The Macaulay Institute for Soil Research가 1991년도 발표한 자료에 따르면 석
력의 분류단위를 0.2-2.0, 2.0-20, 그리고 20 mm 이상으로 구분하여 함량 비율에 따라
무석력 (Stoneless)부터 극 (Extremely stony)까지 6단계로 분류하였고 (표 37)이 분류단
계를 기준하여 석력함량 등급별 재배 가능 작물을 설정하였다 (표 38), 이 기준에 근거
하여 논농사가 가능한 토양등급은 매우 미약단계로 전체 석력함량은 5% 이하로 2.0-20
과 20 cm 이상의 석력비율은 2% 이하를 충족하여야 함

표 37. 석력크기별 함량에 따른 등급 기준

구분	부피 (Volume) (%)	돌의 크기 (Stone size, cm)		
		0.2-2.0	2.0-20	> 20
무석력 (Stoneless)	< 1	1.0	1.0	1.0
매우 미약 (Very slightly stony)	1-5	1.0	2-3	2-3
미약 (Slightly stony)	6-15	1-2	3-4	4
중간 (Moderately stony)	15-35	3	4-5	4-5
고 (Very stony)	36-70	4	5	5
극 (Extremely stony)	> 70	5	5	5

표 38. 석력함량 등급별 재배 작물

구분	석력함량	비고
1	매우 미약 (Very slightly stony)	모든 작물 재배 가능
2	미약 (Slightly stony)	뿌리/동계 작물 재배 불가, 근권 > 45 cm
3	중간 (Moderately stony). 단 석력의 크기가 50 mm 이하일 경우 최대 35% 정도	곡물(cereals), 목초, 일부 서류 재배
4	중간 (Moderately stony). 단 석력의 크기가 50 mm 이상일 경우 15% 이하	귀리, 보리, 감자, 사료작물만 재배 가능 근권 > 20 cm
5	고 (Very stony). 단 석력의 크기가 50 mm 이하일 경우 최대 70% 정도	목초지로만 가능

○ 토양 중에 석력함량이 증가하면 토양의 가지는 포화수리전도도 (saturated hydraulic conductivity, K_s)는 석력함량이 0%일 때보다 15% 일 경우 K_s 는 시간당 31.5 cm hr^{-1} ($8.75 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$)로 증가하고 석력함량이 30% 석력함량이 60% 정도에 이르면 K_s 는 초당 $4.13 \times 10^{-2} \text{ cm}$ (148.8 cm hr^{-1})로 증가한다. 특히 표토 하부에 석력이 존재할 시 석력함량이 증가하면 할수록 K_s 값은 증가하여 물빠짐이 가속화되어 보수일수가 감소되어 잦은 관개가 필요하게 된다 (그림 32). 특히 2 mm 이상의 입자비율이 증가함에 따라 K_s 값도 급격히 증가한다 (그림 33). 이는 그림 33-35에서 보여주는 바와 같이 석력함량이 증가하면 상대적으로 공극율은 다소 감소하나 공극의 크기는 증가하며 석력의 크기가 증가할수록 공극율도 증가되어 K_s 가 증가함

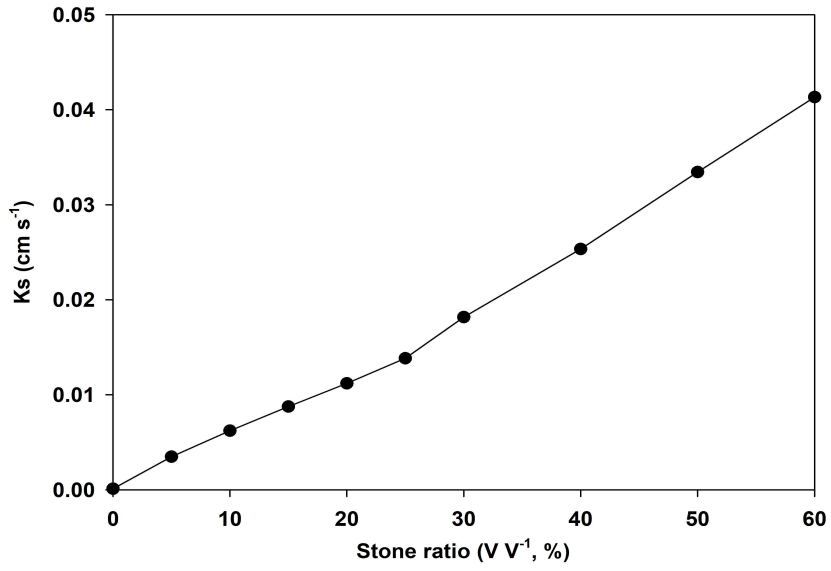


그림 32. 석력함량별 포화수리전도도 (Ks) 변화

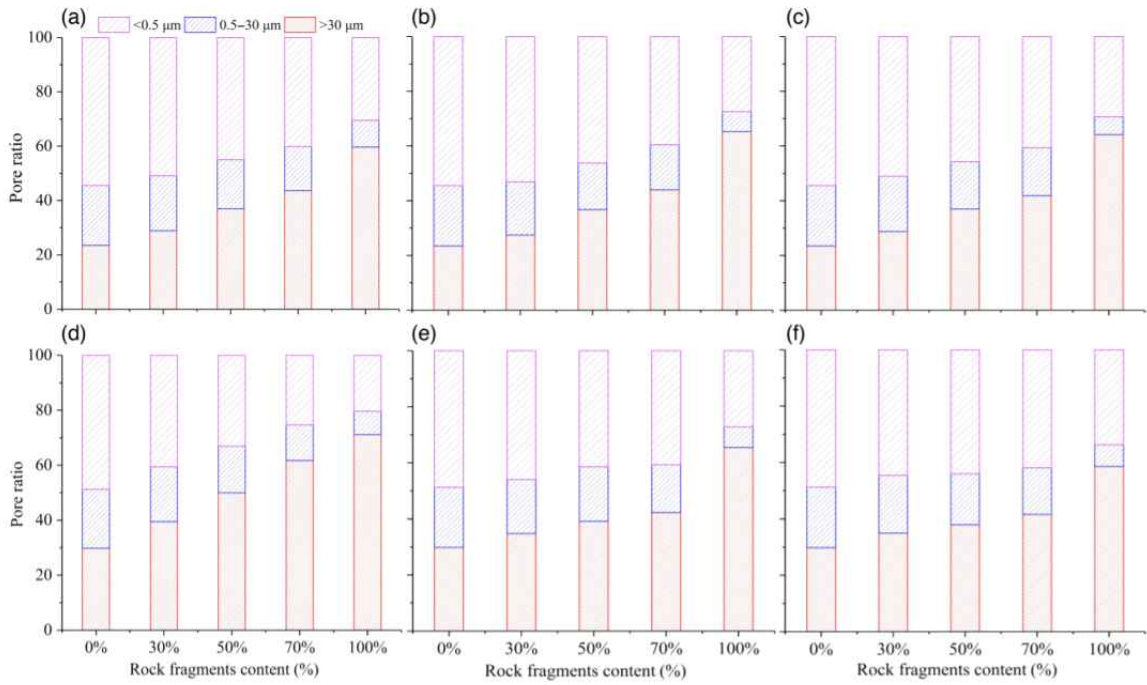


그림 33. 석력함량별 상대적 공극크기별 분포 비율 (Jiangwen Li, 2020)

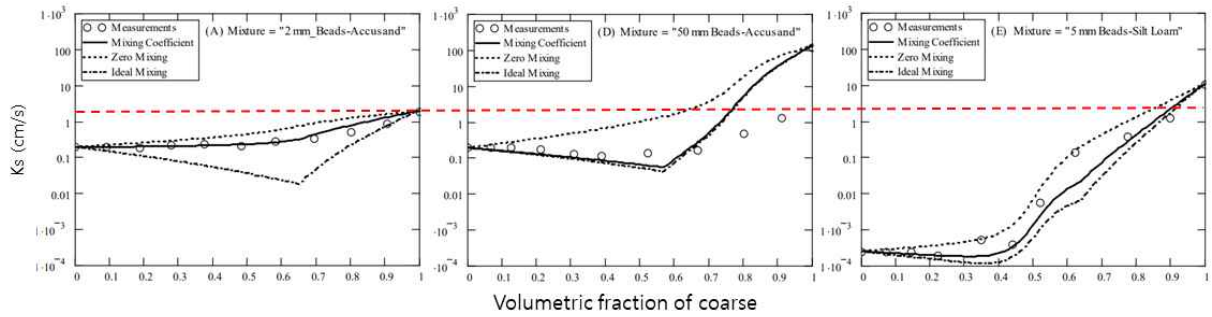


그림 34. 석력함량과 혼합정도에 따른 포화수리전도도 변화 (Zhang et al., 2009)

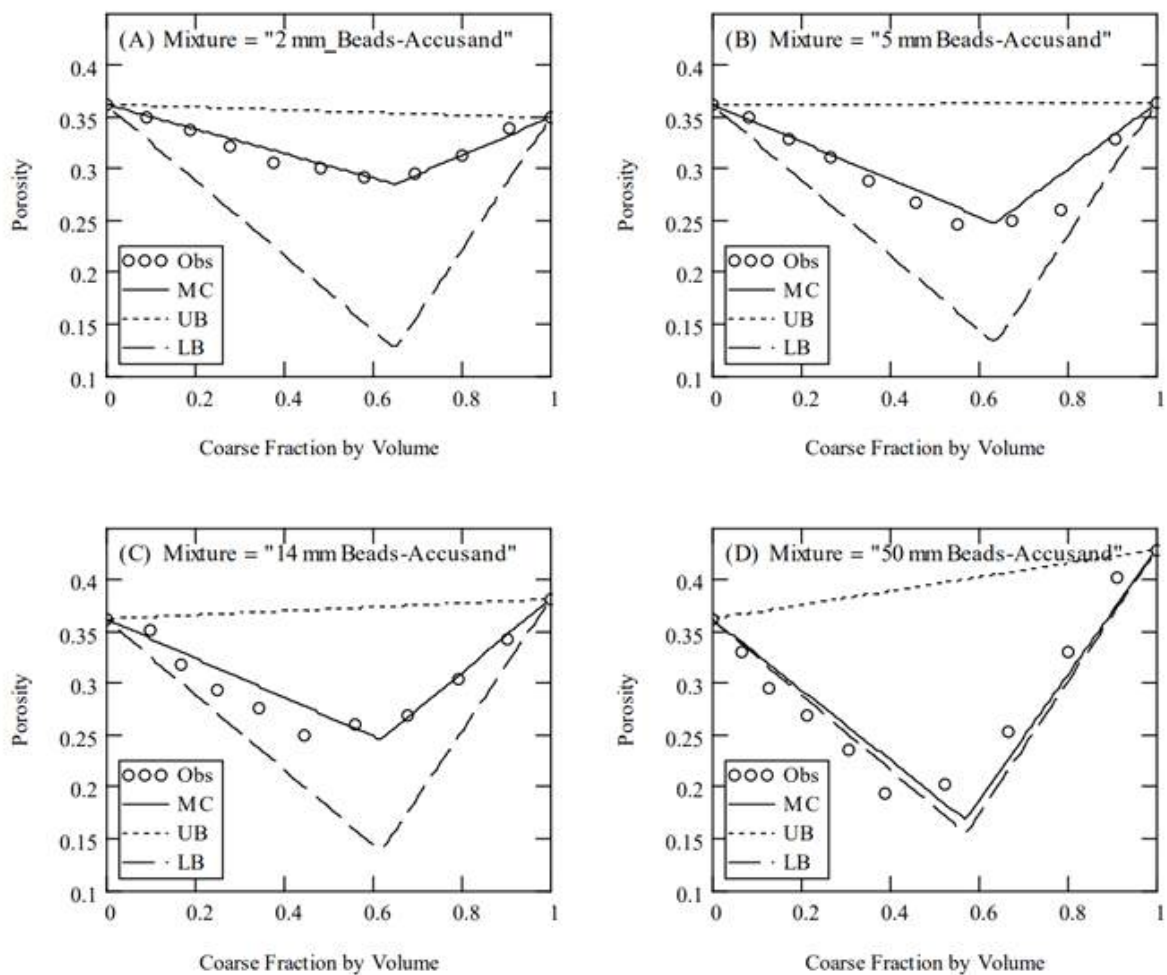
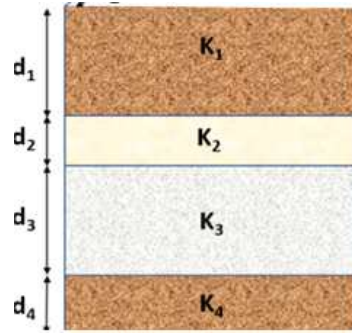


그림 35. 석력크기와 분포함량별 공극율 변화 특성 (Zhang et al., 2009)

○ 토성이 상이한 층이 연계되어 있을 때 포화수리전도도는 연계층이 가지는 K_s 값에 영향을 받음. 이와 같이 서로 상이한 토층으로 구성된 토양의 K_s 는 그림 36에서 보는 질포화수리전도도(K_{eff}) 공식을 이용하여 K_{eff} 를 구할 수 있음



실질 포화수리전도도
(effective hydraulic conductivity)

$$K_{xe} = \frac{\sum K_{xi} d_i}{\sum d_i}$$

K_{xi} : 각 토양층의 고유 포화수리전도도
 d_i : 각각의 해당층의 토양 두께

그림 36. 다층구조 토양의 실질포화수리전도도 환산 공식

- 또한 토양 내 모래에 가까운 크기의 입자를 포함하는 조력질 크기의 입자가 증가하면 상대적으로 공극율은 감소하다 증가하는 경향을 보이며 이는 아래 공식 Kozeny-Carman 공식을 이용하여 K_s 값을 예측할 수 있음

$$K_{sm} = \left[\frac{\rho g}{\mu} \right] \left[\frac{d_m^2 \phi_m^3}{180(1-\phi)^2} \right]$$

K_{sm} = the saturated hydraulic conductivity of a mixture

d_m = the representative particle diameter of the mixture

ρ = fluid density

g = gravitational acceleration

μ = dynamic viscosity.

- 일반적으로 논토양을 대상으로 조립질 입자를 포함한 이중 입자토양의 포화수리전도도를 표 39에서 조사한 평균 K_s 를 기준하여 K_{eff} 를 환산한 결과 7cm 깊이의 담수가 토양 지표면을 통하여 토양 내로 유입된 후 논표면으로부터 물이 완전히 없어지기까지의 보수기간은 미사질양토(표층 20 cm)-사질양토(심토 20 cm)와 사질양토(표층 20 cm)-미사질양토(심토 20 cm)의 경우 약 0.07일, 그리고 사질양토(표층 20 cm)-미사질식양토(심토 20 cm)와 사질양토(표층 20 cm)-미사질식양토(심토 20 cm)의 경우 약 0.12일 정도 소요되어 최소 담수심 7 cm를 유지하기 위한 관개관리가 필요함

표 39. 연계 토성 조건에 따른 포화수리전도도

구분	연계 토성 조건 (표층-심층, 각 20cm)			
	SiL-SL	SL-SiCL	SL-SiL	SL-SiCL
Ks (cm s ⁻¹)	1.16E-03	6.51E-04	1.16E-03	6.52E-04
Ks (cm hr ⁻¹)	4.18	2.34	4.18	2.34
Ks (cm day ⁻¹)	100.2	56.1	100.2	56.1
감수일수	0.07	0.12	0.07	0.12

SiL:미사질 양토(Silty loam), SL:사질양토(Sandy loam), SiCL:미사질식양토 (Silty clay loam).

- 한편 Bicocchi 등이 2015년도에 발표한 자료에 따르면 (그림 37) 점토와 석력함량비율이 증가하면 Ks 값이 서서히 증가하다 비율이 5 이상으로 증가하면 Ks 값이 논토양의 적정 Ks 값인 $1 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ 이상으로 증가하기 때문에 석력함량 비율을 간척지 토양의 적정성을 점토함량과 석력함량을 기준하여 기준을 설정하는 방안도 고려하여야 할 것으로 판단함..
- 또한 국립농업과학원 (2012)이 제시한 연구결과에 따르면 새로운 농경지 조성이나 기존 농경지 정비시 표토에 7.6 cm 이상의 자갈이 15% 이상 혼입되지 않도록 작업 전에 농업 전문기관에서 대상 토양 분석을 실시하도록 하는 영농개선 방안이 제시되었고 기존 농경지의 경우 7.6 cm 이상의 자갈이 15% 이상 혼입된 필지는 석력을 제거하고 또한 토양표면에서 20 cm 이내에 석력이 없더라도 물지균 작업시 하부 (20-50 cm)의 석력이 계속 상부로 드러날 수 있으므로 석력을 제거할 것을 권고하고 있음

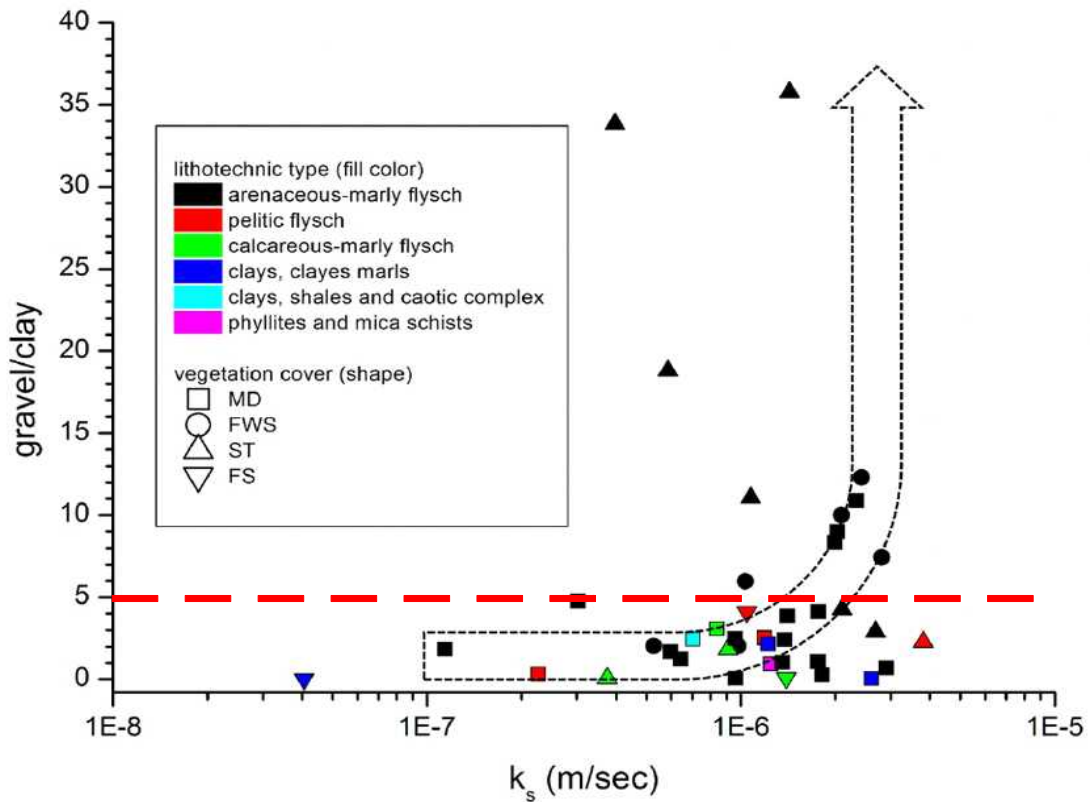


그림 37. 점토와 석력 비율에 따른 Ks 변화

1) 태양광 설치 기준

- 석력함량 : 논농사가 가능한 토양등급은 작물의 뿌리 발달, 양분용탈, 수분보유력과 더불어 기계적 경운 난이도 등을 감안할 때 매우 미약단계 이하로 전체 석력함량은 5% 이하이며 2.0-20 cm와 20 cm 이상의 석력비율은 2% 이하를 충족하여야 함

표 40. 석력크기별 함량에 따른 등급 기준

구분	부피 (Volume) (%)	돌의 크기 (Stone size, cm)			논농사 가능 여부
		0.2-2.0	2.0-20	> 20	
무석력 (Stoneless)	< 1	1.0	1.0	1.0	가능
매우 미약 석력 (Very slightly stony)	1-5	1.0	2-3	2-3	가능
미약 석력 (Slightly stony)	6-15	1-2	3-4	4	불가
중간 석력 (Moderately stony)	15-35	3	4-5	4-5	불가
고석력 (Very stony)	36-70	4	5	5	불가
극석력 (Extremely stony)	> 70	5	5	5	불가

자료근거 : Land Capability Classification for Agriculture, Macaulay Land Use Research Institute 1991)

표 41. 논토양의 적성등급 기준(제주도 비화산회 토양 제외)

구분	1급지	2급지	3급지	4급지
생산력	고	보통	낮음	매우 낮음
석력층/모래층	없음 - 약간	없음 - 약간	있음	많음
표토 석력 함량	없음	없음	없음	없음

- 석력함량 조사방법: 가로 (30 cm) x 세로 (30 cm) x 높이 (20 cm) 크기의 나무판자통 (부피, 18,000 cm³)을 시료를 채취하고자 하는 토양표면에 설치하고 나무판자통 안에 토양을 채취하면서 최종 깊이 20 cm까지 채취하여 PE (polythene)봉지에 담아 실험실에서 105℃에서 24시간 건조 후 건조한 토양의 무게를 측정 한 다음 석력과 2 mm 이하의 토양입자를 분리함 (그림 29). 단 습윤한 토양이나 점토가 많은 토양은 실험실에서 풍건 후 석력과 2 mm 이하의 토양을 분리하여 무게비로 석력함량을 구하여 토양 전체의 무게에 대한 석력의 무게비로 석력의 함량비율을 %로 구함



그림 38. 석력함량비율을 구하기 위한 토양시료 채취 방법

방법 2) 세척법 - 채취한 시료를 실험실에서 그림 30에서 보는 바와 같은 시료 입자 분리기를 이용하여 2 mm 이하, 2 ~ 20 mm, 그리고 20 mm 이상의 크기 입자로 분리함. 석력분리방법은 현탁액 포집통, 2 mm 체, 20 mm 체, 세척수 통으로 구성된 분리기에 20 mm 체에 채취한 시료를 채운 후 세척수 통에 채취한 시료부피의 3배 정도의 수돗물을 천천히 가하면서 석력에 부착된 토양 입자를 분리시켜 하부로 이동시켜 입경이 2 mm 이하, 2 mm ~ 20 mm, 그리고 20 mm 이상인 크기로 분리한 다음 분리된 각각의 시료를 전기건조기에 105℃에서 24~48시간 건조한 후 무게를 측정한다. 측정된 무게를 기준하여 무게비로 각각의 입자비를 구함. 그리고 이를 기준하여 토양입자의 입자밀도(2.65 g cm⁻³)를 적용하여 입자별 부피비를 구하여 이를 석력함량비(%)로 환산함

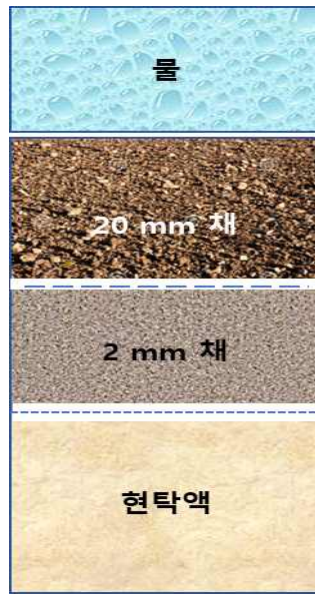


그림 39. 세척법에 의한 석력분리 방법

3) 토양오염도

- 토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고, 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하게 관리·보전함으로써 토양생태계를 보전하고, 자원으로로서의 토양가치를 높이며, 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 하는 토양환경보전법은 토양오염물질 중금속 8종류 (동·식물성 제외), 유기인화합물, TCE, PCE, PCB, 페놀류, 시안화합물, 불소화합물 등 23 항목을 토양오염물질로 지정하여 관리하고 있음 (표 36)
- 토양오염기준은 오염의 정도가 사람의 건강과 동·식물의 생육에 지장을 초래할 우려가 있어 토지의 이용 중지, 시설의 설치금지 등 규제조치가 필요한 정도의 오염상태를 토양오염 대책기준으로 설정하고, 대책기준의 약 40% 정도로 더 이상의 오염이 심화되는 것을 예방하여야 하는 오염수준을 토양오염 우려기준으로 구분하여 설정하고 대통령령으로 정하는 바에 따라 토양관련전문기관으로부터 그 시설의 부지와 그 주변 지역에 대하여 토양오염검사 (이하 “토양오염검사” 라 한다)를 받아야 함
- 그러나 간척지에 대한 토양오염조사가 실시된 사례는 거의 없음. 간척지를 농경지로 인정 시 토양환경보전법 우려기준 1지역에 해당하고, 새만금사업단이 관리하는 새만금호 2008년도 반기별 수질측정망 자료 중 토양(퇴적물) 조사 결과를 살펴보면 퇴적물의 중금속 평균농도 범위는 망간 135.0 ~ 483.0 mg/kg, 아연 20.3 ~ 79.6 mg/kg, 구리 2.3 ~ 30.0 mg/kg, 카드뮴은 ND ~ 0.8 mg/kg, 크롬 14.0 ~ 46.3mg/kg, 납 8.2 ~ 24.7mg/kg 정도로

조사되었으며, 토양환경보전법의 토양오염우려기준(1지역)을 모두 만족시키고 있어 중금속에 의한 토양오염은 없을 것으로 판단됨

- 그러나 간척지 주변환경이 지속적으로 변화되고 있어, 각종 오염물질이 토양에 유입되어 토양오염물질이 토양 속에 축적되었을 경우 여기서 생산된 농산물은 사람과 가축 등에 직간접적으로 건강에 영향을 미치므로 주기적으로 간척농지에 대해 환경부 토양오염공정시험기준 (환경부고시 제2015-261호)에 준하여 토양오염도 검사를 실시한 후 우려 및 대책기준 초과 여부를 조사하여 토양정화 시 경제성, 효율성, 지속적 위해성 등을 평가하여 간척지 태양광 설치 여부를 결정하는 방안도 검토해 볼 필요가 있음

표 42. 토양환경보전법 제1조의5 시행규칙 토양오염우려기준 (개정 2022. 1. 21.) (단위: mg/kg)

물질	1지역	2지역	3지역
카드뮴	4	10	60
구리	150	500	2,000
비소	25	50	200
수은	4	10	20
납	200	400	700
6가크롬	5	15	40
아연	300	600	2,000
니켈	100	200	500
불소	400	400	800
유기인화합물	10	10	30
폴리클로리네이티드비페닐	1	4	12
시안	2	2	120
페놀	4	4	20
벤젠	1	1	3
톨루엔	20	20	60
에틸벤젠	50	50	340
크실렌	15	15	45
석유계총탄화수소(TPH)	500	800	2,000
트리클로로에틸렌(TCE)	8	8	40
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	4	25
벤조(a)피렌	0.7	2	7
1,2-디클로로에탄	5	7	70
다이옥신 (퓨란을 포함한다) (단위: pg-TEQ/g)	160	340	1,000

1지역: 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률」에 따른 지목이 전·답·과수원·목장용지·광천지·대(「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령」 제58조제8호가목 중 주거의 용도로 사용되는 부지만 해당한다).

다. 간척농지 관개용수 수질 기준

1) 관개용수 수질 기준

- 국내의 관개용수 수질 기준은 농업·농촌기본법시행령 제2조에 의한 농업 및 농어촌발전특별조치법 시행령 제2조 제3호의 규정에 정한 환경위해성과 독성에 근거한 농업과 어업에 이용되는 수원을 의미하는 것으로 농작물 생산성이나 생육에 미치는 영향요인에 대해서는 기준이 없으며 독성수원에 따라 그 기준을 달리하고 있음 (표 43). 따라서 환경부가 정한 농업용수 수질 기준은 농업생산성에 연계할 수가 없음

표 43. 농업용수 수질환경기준

수질 항목	하천	호소	지하수
수소이온농도 (pH)	6.0-8.5	6.0-8.5	6.0-8.5
생물학적 산소 요구량(BOD), mg/L	8이하	-	-
화학적 산소요구량(COD), mg/L	-	8이하	8이하
총유기탄소량(TOC), mg/L	6이하	6이하	-
부유물질(SS), mg/L	100이하	15이하	-
용존산소량(DO), mg/L	2이상	2이상	-
염소이온(Cl ⁻)	-	-	250이하
대장균군수(T-Coli), MPN/100ml	-	-	-
질산성질소(NO ₃ -N), mg/L	-	-	20이하
총질소 (T-N), mg/L	-	1.0 이하	-
총인(T-P),mg/ l	0.3이하	0.1이하	-
카드뮴 (Cd), mg/L	0.005 이하	좌동	0.01이하
비소(As), mg/L	0.05이하		0.05이하
시안(CN), 수은(Hg), 유기인	검출 안됨		검출 안됨
폴리크로리네이티드페닐(PCB)	검출 안됨		-
납(Pb), mg/L	0.05이하		0.1이하
6가크롬(Cr ⁶⁺), mg/L	0.05이하		0.05이하
음이온계면활성제(ABS), mg/L	0.5이하		-
사염화탄소, mg/L	0.004이하		-
1,2-디클로로에탄	0.03이하		-
테트라클로로에틸렌(PCE), mg/L	0.04이하		0.01이하
디클로로메탄, mg/L	0.02이하		-
벤젠, mg/L	0.01이하		-
클로로포름, mg/L	0.08이하		-
디에틸헥실프탈레이트(DEHP), mg/L	0.008이하		-
안티몬, mg/L	0.02이하		-
1,4-다이옥세인, mg/L	0.05이하		-
페놀, mg/L	-		-
트리클로로에틸렌, mg/L	-	-	0.03이하
1,1,1-트리클로로에틸렌, mg/L	-	-	0.3이하

- FAO는 농업용수 수질 기준을 설정하였으며 (Ayers and Westcot, 1985), 작물생육에 지장을 주지 않는 관개용수의 EC_w 는 0.7 dS/m 이하로 사용 가능한 범위는 0.7-3.0 dS/m로 정하였음 (표 44)

표 44. 관개용수 수질 지침

Potential Irrigation Problem				Units	Degree of Restriction on Use		
					None	Slight to Moderate	Severe
Salinity(affects crop water availability)							
	EC_w		dS/m	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0	
	TDS		mg/l	< 450	450 - 2000	> 2000	
Infiltration(affects infiltration rate of water into the soil. Evaluate using EC_w and SAR together)							
SAR	= 0 - 3		EC_w	dS/m	> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
	= 3 - 6			dS/m	> 1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
	= 6 - 12			dS/m	> 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
	= 12 - 20			dS/m	> 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
	= 20 - 40			dS/m	> 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
Specific Ion Toxicity(affects sensitive crops)							
	Sodium (Na)		SAR	< 3	3 - 9	> 9	
	Chloride (Cl)		me/l	< 4	4 - 10	> 10	
	Boron (B)		mg/l	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0	
Miscellaneous Effects(affects susceptible crops)							
	Nitrogen (NO_3^- -N)		mg/l	< 5	5 - 30	> 30	
	pH			Normal Range 6.5 - 8.4			

- 한국농어촌공사가 2017년 조사한 관개수 수질 조사 결과는 환경부 농업용수 수질환경 기준 (IV등급, TOC 6 mg/L 이하)에 근거하여 평가하였고, 그 결과를 살펴보면 고흡 및 군내지구는 만족하였으나 석문, 이원, 남포, 삼산, 보전지구는 농업용수 수질기준을 초과하였음
- 담수호 수질자료를 검토한 결과, 영산강Ⅲ-1(영암호), 영산강Ⅲ-2(금호호) 지구는 TOC 농도가 각각 3.6 mg/L(II등급), 4.8 mg/L(III등급)로 농업용수 수질기준 (IV등급)을 만족하였으나 이원, 시화, 보전, 남포지구의 경우 EC 가 3 dS/m 이상으로 FAO 수질 권장기준 상 농업용수로 이용 시 작물재배에 영향을 미칠 수 있는 것으로 조사되었음

표 45. 환경부 농업용수 수질환경기준

등 급	기				준			
	pH	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
약간 나쁨 (IV)	6.0~8.5	8 이하	6 이하	15 이하	2.0 이상	0.10 이하	1.0 이하	35 이하
항 목		기준값(mg/L)						
카드뮴(Cd)		0.005 이하						
비소(As)		0.05 이하						
수은(Hg)		검출되어서는 안 됨(검출한계 0.001)						
납(Pb)		0.05 이하						
구리(Cu)		0.2 이하						

2) 관개용수 수질과 토양염도와의 상관성

○ Arjen de Vos 등이 2016년 네덜란드 Den Burg Salt Farm Texel에서 연구한 관개수 수질과 토양 염도와의 상관성 연구결과를 보면 (그림 40), 수질 EC(1:2)와 토양의 EC_e는 그림 40(좌)에서 보는 바와 같이 $Y(EC_e) = 5.30016 \times EC_{1:2}$ 로 나타내며 세라믹판을 이용하여 추출한 공극수(EC_{pore})의 EC와 토양염도 (EC_e)는 $Y(EC_e) = 0.691 \times EC_{pore}$ 로 표기함

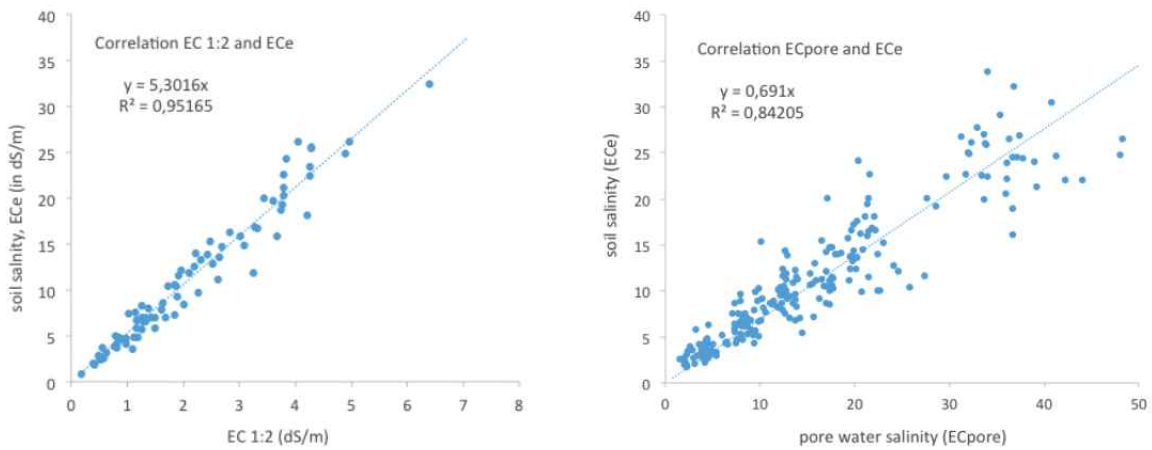


그림 40. 관개용수 염도에 따른 토양 염도 변화 (Arjen de Vos et al., 2016)

○ 그리고 공급하는 관개용수 수질에 따른 세라믹필터를 이용하여 포집한 토양공극수의 EC와의 상관관계를 살펴보면 4년간 평균은 $Y(\text{토양공극수의 EC}) = 1.0288 \text{ EC}_{\text{irr}} + 1.7242$ 로 나타낼 수 있음

- 이 식을 논토양에 적용할 경우 공급하는 관개수질보다 토양공극수의 EC가 다소 높으므로 수도재배에 영향을 주지 않는 범위 내의 관개수를 공급하여야 함. 예로 상대작물수확량 공식을 이용한 약 70% 비 수확량을 확보하기 위한 토양의 EC_e 는 5.36 dS/m 정도이므로 이 조건을 충족하기 위한 관개수의 수질(EC)은 약 3.53 dS/m 이하여야 함

적정 관개용수 수질 (dS/m) = $[EC_e$ (추정 수량감소에 해당하는 전기전도도) - 1.7242]/1.0288

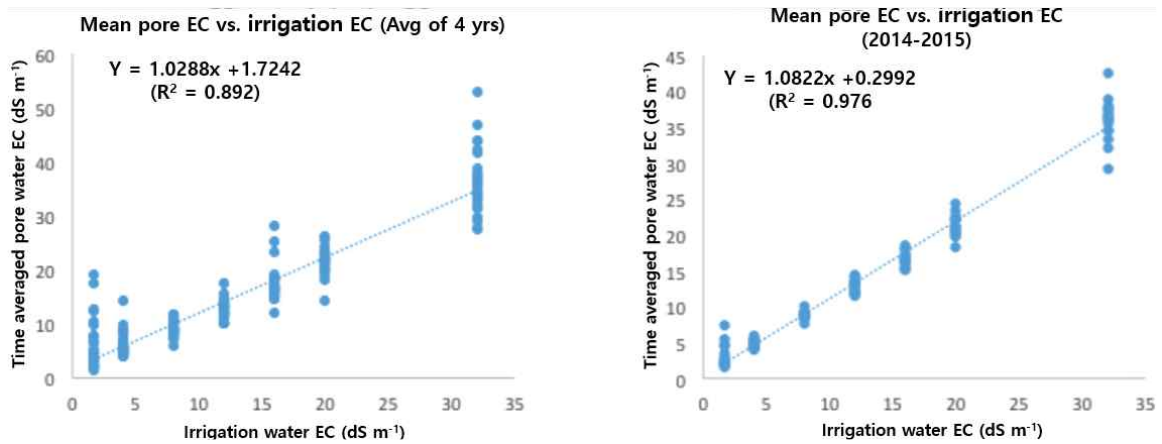


그림 41. 관개용수 염도에 따른 토양 공극수 염도 변화 (Arjen de Vos et al., 2016)

- 2021년도 중서부 간척지구 농업용수 수질환경 조사 결과를 살펴보면 (표 46) 조사된 수질시료의 pH는 대부분 6.48~7.64로 조사되었고, pH와 전기전도도(EC_w) 모두 하천수보다 담수호에서 높은 것으로 조사됨
- 그러나 충남 태안에 위치한 중장지구 담수호의 EC값이 12.6~28.9 dS/m로 비 상대작물수확량에 근거한 토양의 최대 EC_e 는 5.36 dS/m을 충족하는 관개수의 수질(EC_w)기준인 약 3.53 dS/m를 초과함

표 46. 중서부 간척지구 농업용수 수질 특성

조사지점		pH	EC (dS/m)	조사지점		pH	EC (dS/m)	조사지점		pH	EC (dS/m)
홍왕 하천수	4월	7.13	0.34	고천암	3월	7.8	1.2	계화	3월	8.4	45.8
	6월	7.05	0.39		6월	7.5	1.01		6월	8.6	16.4
	8월	6.88	0.41		8월	6.9	0.41		8월	9.1	3.5
	10월	6.55	0.45		10월	8.2	0.63		10월	8.0	4.8
홍왕 담수호	4월	7.15	0.71	복길	3월	7.6	1.34	동진 대교	3월	8.6	0.4
	6월	7.22	0.69		6월	7.8	1.57		6월	7.8	0.3
	8월	7.11	0.74		8월	7.2	0.94		8월	8.1	0.4
	10월	6.95	0.75		10월	7.5	0.86		10월	8.6	0.3
사기 하천수	4월	7.20	0.41	백수	3월	8.2	0.76	군포교	3월	8.9	0.3
	6월	7.18	0.42		6월	7.3	1.12		6월	7.9	0.2
	8월	7.13	0.44		8월	7.5	0.83		8월	9.4	0.5
	10월	6.84	0.46		10월	8.1	0.69		10월	8.1	0.3
사기 담수호	4월	7.22	1.55	소포	3월	8.1	3.32	심포	3월	8.8	29.0
	6월	7.62	1.35		6월	7.8	1.48		6월	9.0	3.5
	8월	7.24	1.39		8월	6.6	0.41		8월	7.9	19.3
	10월	6.48	1.48		10월	7.8	0.47		10월	8.2	5.0
독개 하천수	4월	7.24	0.47	염산	3월	8	0.17	청하 대교	3월	8.1	5.0
	6월	7.20	0.46		6월	7.9	0.91		6월	8.3	0.5
	8월	7.09	0.41		8월	7.2	0.41		8월	8.1	0.2
	10월	6.87	0.39		10월	7	0.23		10월	8.5	0.8
독개 담수호	4월	6.76	1.66	툽머리	3월	7.9	3.69	만경제 수문	3월	7.9	0.7
	6월	6.71	1.29		6월	8	1.88		6월	9.1	0.5
	8월	6.94	2.58		8월	7.6	0.91		8월	8.0	0.2
	10월	6.93	2.69		10월	8.3	2.26		10월	8.2	0.7
삼교천 하천수	4월	7.07	0.29	홍성 하천수	4월	7.62	0.41	중장 하천수	4월	7.18	1.62
	6월	7.12	0.30		6월	7.49	0.56		6월	7.21	1.68
	8월	6.90	0.31		8월	7.28	0.75		8월	7.39	1.50
	10월	6.88	0.35		10월	7.18	0.92		10월	7.48	1.43
삼교천 담수호	4월	7.26	0.74	홍성 담수호	4월	7.64	1.43	중장 담수호	4월	7.17	12.58
	6월	7.58	0.65		6월	7.58	1.48		6월	7.22	15.25
	8월	7.41	0.55		8월	7.08	1.52		8월	7.60	19.62
	10월	7.20	0.49		10월	6.95	1.57		10월	7.62	48.90

- 다량의 물을 이용하여 근권 토양 내 염분을 근권 하부 또는 토양의 깊은 곳으로 용출시키는 것이 염류토양에서 염분을 제거하는 가장 우선적인 방법임
- 용탈요구도 (LR)는 건조지역의 알칼리 토양이나 간척지 토양처럼 염류가 작물재배의 허용 수준보다 많이 집적되어 있는 토양의 염농도를 작물의 수확량 감소를 방지하기 위하여 염류를 근권 밖으로 용탈시키는 데에 필요한 최소 용수량
- 용탈요구도 (Leaching requirement, LR)와 용탈분획(leaching fraction, LF)은 같은 의미로 사용되며 LF는 단위가 없으나 LR은 단위가 없거나 %로 나타내기도 함. 그림 42는 용탈요구도 (LR)에 따른 관개용수 수질과 토양염도와의 상관성을 나타내었음
- 관개수가 토양에 유입된 후 용탈요구도 (leaching requirement)에 따라 토양염도에 미치는 영향이 상이하므로 관계 수질(EC_w)과 용탈요구도에 따른 관개를 실시하여야 함 (그림 42)
- 예로 EC_w 가 2 dS/m인 관개용수를 논토양에 관개할 시 LR 값이 0.8에서 0.05로 감소함에 따라 토양염도는 1.1 dS/m에서 약 6.3 dS/m로 증가하며 벼수량생산성을 70% 기준 시 관개수의 수질은 LR 0.80에서 8.7 dS/m 정도까지 가능함. 따라서 관개수의 수질에 따른 벼 수량성은 관개수의 수질 (EC_w)에 따른 LR 값에 의해 결정됨

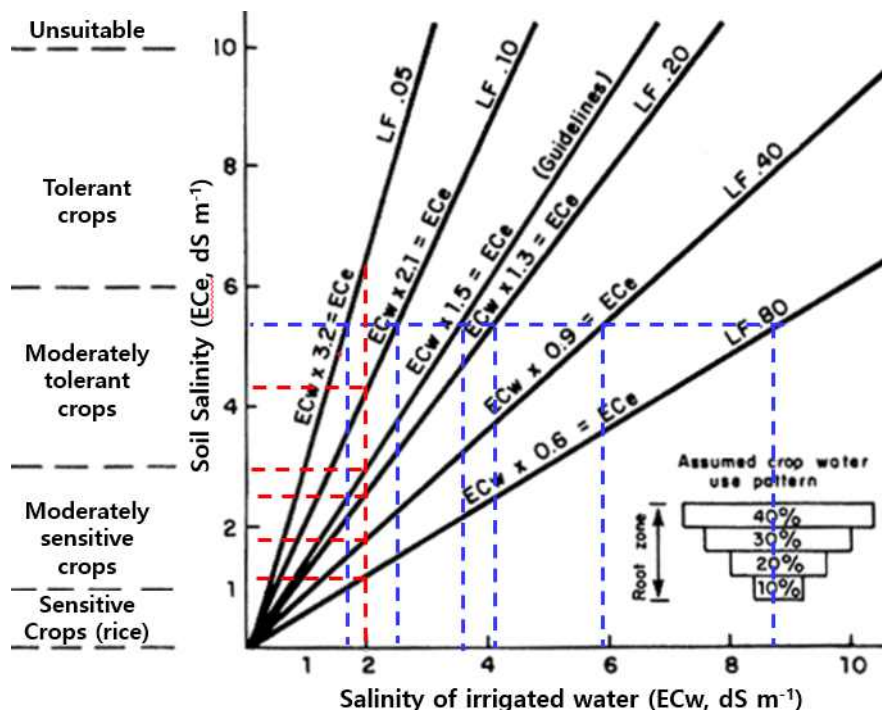


그림 42. 용탈분획을 (leaching fraction, LF)에 따른 관개용수 수질과 토양염도와의 상관성 (Ayers and Westcot, 1985)

- U.S. Salinity Laboratory가 제시한 용탈요구도 (Leaching requirement, LR)는 관개수량에 대한 배출수량의 비로 정의하고 있음. Rhoades (1974)와 Ayers와 Westcot (1985)는 작물 내염성과 관개수질을 근거하여 용탈요구도 공식을 다소 변형한 아래 공식을 제안함

$$LR(\text{또는 } LF) = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}} = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w}$$

EC_{iw} = 관개수의 전기전도도

EC_{dw} = 배출수의 전기전도도

EC_e = 포화침출법으로 측정된 토양염도, 대상 작물의 내염 정도에 따른 수량생산성에 근거한 평균 염도를 의미함.

- 한편 제염을 하는데 소요되는 물량은 다음과 같은 공식을 이용하여 구함

$$AW = \frac{ET}{1 - LR}$$

AW = 처리할 물의 깊이 (mm yr^{-1})

ET = 총연간 작물 물요구량 (mm yr^{-1})

LR = 용탈요구도 (또는 용탈분량)

- 우리나라에서 생산되는 벼의 평균 물생산성 (Water Productivity, WP)는 0.70 kg/m^3 로서 물 1톤을 투입해서 벼 0.7 kg을 생산한다는 의미임
 - 예로 10a 당 벼 수확량이 500 kg일 경우 총 물소요량은 약 714톤 정도이며 이를 10a 면적으로 기준하여 물의 깊이를 환산하면 0.714 m (71.4 cm) 정도의 물이 벼 재배기간 중 관개하는 것
- 토양염도에 따른 벼 상대작물수확량 공식 [Y (수량생산성) = $-9.1X + 117.84$]을 이용하여 벼의 수확량을 환산하여 보면 토양의 EC_e 값이 1.96 dS/m 이하에서는 100%, 3.06 dS/m (90%), 4.16 dS/m (80%), 5.36 dS/m (70%)임
- 이를 LR 공식 (US Salinity lab.)에 적용하여 환산한 결과 70% 벼 수확량을 올리기 위한 관개수의 수질의 EC_w 는 약 2.63 dS/m 이하이어야 한다. 그리고 이러한 수도 수확량을 달성하기 위한 제염을 하는데 소요되는 물량을 환산하여 보면 10a 당 약 2,380톤의 물이 소요됨. 따라서 관개수의 수질은 벼 재배 경제성 평가에 근거한 수량성을 기준한 수질을 환산하여 결정하여야 함

8. 태양광 발전시설을 위한 간척농지 판정기준 개정(안) 설정

가. 간척농지 판정기준 항목별 개정 방안 분류

1) 염농도 기준

- 벼 생산성 및 염류토양 분류기준을 이용하여 다양한 기준을 설정하였으며, 표토와 심토의 전환계수를 이용해 적용 토심을 표토와 심토로 명확히 구분함

	염농도	적용토심	산출근거	장단점
현행	5.5 dS/m	심토	<ul style="list-style-type: none"> FAO의 70% 생산성 기준 	<ul style="list-style-type: none"> 국제적 생산성 기준 이용 EC만으로 생산성 기준을 설정하는 것은 무리가 있음 심토에 적용하기 보다는 표토에 적용해야함
1	4.5 dS/m	표토	<ul style="list-style-type: none"> 농촌진흥청의 벼 재배 추천 염도 토양염도 4.7~6.3 dS/m 수준에서 벼 수량이 38% 감소(식량원) 	<ul style="list-style-type: none"> 국내의 벼 재배 적합 기준 사용 표토를 대상으로 한 기준임 심토 기준 적용시 표토의 예외기준으로 활용 가능
2	7.5 dS/m	심토	<ul style="list-style-type: none"> 농촌진흥청의 벼 재배 추천 염도 표토 기준을 이용하여 새로운 심토 기준(x1.67) 설정 	<ul style="list-style-type: none"> 국내의 벼 재배 적합 기준 사용 현재 대비 1.36배 강화한 기준
3	5.5 dS/m	표토	<ul style="list-style-type: none"> FAO의 70% 생산성 기준 	<ul style="list-style-type: none"> 현행 기준과 동일하나 표토에 적용
4	6.3 dS/m	표토	<ul style="list-style-type: none"> FAO의 60% 생산성 기준 	<ul style="list-style-type: none"> 국제적 기준 이용 표토로 기준 설정할 시 현재보다 기준 강화
5	9.2 dS/m	심토	<ul style="list-style-type: none"> FAO의 70% 생산성 기준 표토 기준을 이용하여 새로운 심토 기준(x1.67) 설정 	<ul style="list-style-type: none"> 국제적 기준 이용 현재 대비 1.67배 강화한 기준
6	5.5 dS/m ~ 7.5 dS/m (지역별 토양 특성 고려)	심토	<ul style="list-style-type: none"> 농촌진흥청의 벼 재배 추천 염도 표토 기준을 이용하여 새로운 심토 기준(x1.67) 설정 토양 특성을 고려하여 지역별 별도의 기준 설정 	<ul style="list-style-type: none"> 국내의 벼 재배 적합 기준 사용 일괄적인 기준 적용보다 지역적 토양 특성을 고려한 현실적인 기준 설정 앞으로 추가 연구를 통해 지역별 기준 설정 필요

2) 염농도 환산계수

- 여러 문헌을 조사한 결과 토성, 지역 등에 따라 5, 7.5, 8, 9 등 다양한 환산계수를 제시하고 있음.
- 하지만 기존 기준과의 연속성 및 공식화(명문화)된 다른 기준을 제시하기 어려워 기존 방법인 환산계수 5를 그대로 이용함

3) 측정 깊이

	토심	산출근거	장단점
현행	30-60 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 농촌진흥청의 연구조사 분석기준 참고 - 심토는 작토층 아래에서 30 cm 깊이로 함 ▪ 시기별 염농도 변화가 적음 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 연중 변화 적음 ▪ 일부 지역에서 석력 등으로 시료채취 불가
1	30-60 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 현행 동일 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 현행 동일
2	0-30 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 작물 생육을 고려시 근권층 (약 15 cm)을 고려한 표토 깊이 ▪ 토양비료 용어사전에 명시된 표토층 최대 깊이 (25 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 담수 여부, 시기별 변화, 강우 등 외부 요인에 따라 연중 변화가 큼
3	0-20 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 근권층 (약 15 cm)을 고려한 표토 깊이 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 담수 여부, 시기별 변화, 강우 등 외부 요인에 따라 연중 변화가 큼
4	20-40 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 선행연구에서 사용되는 토심 구분에 따른 깊이 ▪ 현재 심토 보다는 표토와 가까운 토심 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 연중 변화가 표토층 보다 적음 ▪ 표토 (0-20 cm)보다 염농도가 1.5배 높은 것으로 연구되어 표토 기준 환산 가능
5	40-60 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 선행연구에서 사용되는 토심 구분에 따른 깊이 ▪ 연중 변화가 현재보다 더 적음 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 연중 변화가 표토층 보다 적음 ▪ 표토 (0-20 cm)보다 염농도가 2.1배 높은 것으로 연구되어 표토 기준 환산 가능

4) 측정 시기

	측정 시기	산출근거	장단점
현행	제한 없음	<ul style="list-style-type: none"> 심토는 연중 큰 변화가 없다는 선행 연구결과 반영 	<ul style="list-style-type: none"> 사업 진행의 편리성 표토 적용시에는 담수/비담수에 대한 영향을 고려해야 함
1	제한 없음	<ul style="list-style-type: none"> 심토로의 기준 적용시만 	<ul style="list-style-type: none"> 사업 진행의 편리성
2	담수기 (모내기부터 2개월까지)	<ul style="list-style-type: none"> 표토 기준으로 개정할 경우 염농도가 생육에 크게 영향을 미치는 모내기 후 2개월까지의 시기로 한정 	<ul style="list-style-type: none"> 일정시기에 조사물량 집중 농어촌공사 단독 조사 업무 불가, 추가 시료채취 기관 확보 필요 일정시기로 사업시기가 한정되어 사업자의 민원 발생 가능
3	작물재배 전 또는 재배 후	<ul style="list-style-type: none"> 무기질비료, 액비, 담수 등의 영향이 없는 조건 <ul style="list-style-type: none"> - 농업자원과 농업환경 실태조사 및 평가 기준(농촌진흥청고시 제2021-24호) - 간척지 영농에 적합한 작물과 재배정보 고시(농촌진흥청고시 제2020-14호) 	<ul style="list-style-type: none"> 고시에 명시된 기준 활용 생육기(약 4개월)를 제외한 시기에 사업 실시 표토 기준으로 개정 시, 인위적인 행위(바닷물, 비료, 액비 처리 등)에 따른 염농도 향상 가능

5) 예외사항

	예외사항	산출근거	장단점
현행	시장·군수는 예외적으로 토양염도 측정결과서를 반영하여 표토 값 적용 가능	<ul style="list-style-type: none"> 심토 채취가 어려운 경우 지자체장 판단하에 표토 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 명확한 근거가 없어 지자체장이 표토/심토 적용에 대한 판단이 어려움
1	석력 등으로 심토 채취가 불가능한 농경지에 대해 예외적으로 표토/심토 환산계수를 적용하여 결정할 수 있음	<ul style="list-style-type: none"> 심토 채취가 불가능한 지역을 대상으로 한정함 	<ul style="list-style-type: none"> 일부 간척농지에서 심토 채취가 어려운 지역에 대한 보완책이 됨
2	<p>시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 예외적으로 표토 기준을 적용하여 결정할 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 논 토양 적성등급이 2급지 이상인 경우 ✓ 간척시기가 준공 후 20년이 경과하였으며, 염해 피해 이력이 없는 경우 ✓ 석력함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역 	<ul style="list-style-type: none"> 논 토양 적성등급이 2급지는 생산력이 보통임을 나타냄 3급지부터 생산력이 낮다고 분류되고 있음 준공 후 20년 경과시 재배가능 염도까지 제염됨 (농어촌공사 보고서, 2004) 	<ul style="list-style-type: none"> 지자체장 판단하에 우량농지 확보 가능
3	시장·군수는 표토 염도가 4.5 dS/m 이하일 경우 심토 기준을 초과여도 불허할 수 있음	<ul style="list-style-type: none"> 심토 기준 설정시 사용 4.5 dS/m인 농촌진흥청의 비 재배 추천 염도 적용 심토 기준에 해당하는 표토 기준 설정 	<ul style="list-style-type: none"> 심토의 염농도가 높더라도 표토가 낮아 식물생육에 영향이 없을 경우 농경지를 보존할 수 있음
4	시장·군수는 담수기 표토 염도가 4.5 dS/m 이상일 경우 심토 기준을 초과하지 않더라도 허가할 수 있음	<ul style="list-style-type: none"> 표토 기준을 이용하여 심토 기준을 설정시 사용 4.5 dS/m인 농촌진흥청의 비 재배 추천 염도 적용 담수기에 실시된 토양 조사에서 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 일부 간척농지에서 표토/심토 비율이 특이적으로 다른 경우 보완책이 됨
5	<p>시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 표토와 심토 중 하나만 기준을 초과하여도 허가할 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 논 토양 적성등급이 3급지 이하인 경우 ✓ 석력 함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역 	<ul style="list-style-type: none"> 표토와 심토 두 기준을 모두 설정시 사용 3급지부터 생산력이 낮다고 분류되고 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 일부 간척농지에서 심토 채취가 어려운 지역에 대한 보완책이 됨

6) 기타사항

장단점	
ESP/SAR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 염류 토양 분류 기준으로 활용되고 있는 지표 ▪ 양이온 및 CEC를 추가로 분석해야함 ▪ 기기, 인력, 시간, 비용(단가 높음) 등의 문제로 고려하지 않음
석력함량	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 염농도 외에 석력 함량이 생육 및 배수 등에 영향을 크게 미침 ▪ 명확한 분류 기준 및 분석법 등이 설정되어 있지 않음 ▪ 인력, 시간, 비용 등의 문제로 고려하지 않음
토성	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 간척지 토양의 염농도는 토성에 따라 환산계수($EC_{1:5} \rightarrow EC_e$)가 크게 달라짐 ▪ 토성 분석을 위해 기기, 인력, 시간, 비용 등의 문제로 고려하지 않음
Cl	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 간척지 논 토양에서 주요 생육저해 요인임 (500 ppm 이상시) ▪ Cl 분석을 위해 추가 기기, 인력, 시간, 비용(단가 높음) 등의 문제로 고려하지 않음

나. 간척농지 판정기준 개정(안)

○ 앞에서 분류한 판정기준 항목별 개정방안을 조합하여 현실적이며 현장에 적용하기 용이한 개정(안)을 아래와 같이 제시함

	현행	1안	2안
염농도	EC _e 5.5 dS/m	EC _e 7.5 dS/m	EC _e 9.2 dS/m
측정 방식	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ EC_{1.5} × 5 ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ EC_{1.5} × 5 ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ EC_{1.5} × 5 ▪ 1회 측정 (상시)
예외 사항	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 예외적으로 토양염도 측정결과서를 반영하여 표토값 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 표토와 심토 중 하나만 기준을 초과하여도 허가할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 논 토양 적성등급이 3급지 이하인 경우 - 석력 함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 표토 염도가 4.5 dS/m 이하일 경우 심토 기준을 초과여도 불허할 수 있음
현재 기준과 비교		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 현재 기준 대비 1.36배 상향 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 현행의 표토 기준에 표토/심토 환산계수 (1.67) 적용 값 ▪ 현재 기준 대비 1.67배 상향

	3안	4안
염농도	EC _e 5.5 dS/m	5.5 dS/m ~ 7.5 dS/m (지역별 토양특성 고려)
측정 방식	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60cm) ▪ EC_{1.5} × 5 ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ EC_{1.5} × 5 ▪ 1회 측정 (상시)
예외 사항	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 예외적으로 표토 염도를 적용하여 결정할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 논 토양 적성등급이 2급지 이상인 경우 - 간척시기가 준공 후 20년이 경과하였으며, 염해 피해 이력이 없는 경우 - 석력 함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 다만, 이를 위해 '22년 말까지 전남도/충남도 등 지역별 간척지 표토/심토 속성과 상관관계를 추가 분석하고, 해당 지자체 의견을 수렴하여 세부 개선 방안을 구체화할 필요 * 시·군·구 등 권역을 세분화할 경우 간척농지 판정기준이 너무 많아지게 되어 발전사업자 등에 혼선을 야기할 우려가 있어, 주요 간척지가 밀집한 전남·충남 등 '도' 단위로 기준을 구체화하는 것이 바람직
현재 기준과 비교	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 현재 기준과 동일하며, 예외사항에 표토 염도 적용 기준을 구체적으로 표기하였음 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 토양특성을 고려한 지역별 기준 설정 ▪ 현재 기준대비 최대 1.36배 상향

제4장 결론

- 현행 간척농지 판정기준은 벼 생산량 (일반 농경지 대비 70% 생산량)에 근거하여 토양 염도 기준 (5.5 dS/m)을 설정하였고, 토양 분석은 시기별 변화가 적은 심토 (30-60 cm)를 채취하여 EC 1:5법으로 토양염도를 분석한 결과값에 5를 곱하고 있음
- 이 기준은 FAO와 농촌진흥청 등 국내외에서 사용되고 있는 기준을 이용해 잘 만들어진 기준이었으며, 태양광 일시사용 관련하여 다수의 조사 물량을 소화하기에 적합한 기준임
- 다만, 토양 염도 기준으로 사용한 FAO의 벼 생산량 기준은 작물의 근권부인 표토를 대상으로 한 기준이지만 이를 심토 토양을 대상으로 적용한 것은 큰 차이가 있다고 볼 수 있음
- 일반적으로 간척지의 토양 염도는 심토에서 표토보다 토양염도가 1.5~2배 정도 높았으며, 태양광 일시사용 관련 사업수행 결과를 분석한 결과에서도 약 1.67배 심토의 토양 염도가 높은 것으로 나타났음
- 현행 간척농지 판정기준 개선을 위해 염농도, 채취시기, 토양 깊이, 분석법 등을 종합적으로 검토한 결과 각각의 항목별로 다양한 기준을 설정할 수 있었음
- 현재 기준으로 사용하고 있는 항목 외에도 관개용수, 용탈요구도, 석력함량 등에 대해서도 기준으로 도입하는 것을 고려하였으나 추가로 분석을 실시함에 따라 발생하는 시간과 비용, 인력 문제 등과 더불어 현재 해당 항목의 우리나라 database가 미흡한 점 등을 고려하였을 때 기준에 추가하는 것은 무리가 있다고 판단하였음
- 이에 아래와 같이 4개의 간척농지 판정기준 개정(안)을 제시하였음
- 각각의 개정(안)은 모두 간척농지 판정기준으로 사용해도 적절한 근거 및 적용 가능성을 고려하여 설정된 것이며, 현행 대비 모두 기준이 강화되지만 그 정도는 조금씩 다르게 설정되어 있음
- 이 중에서 4안은 간척지의 지역적 특성상 토양 특성에 따라 염농도 벼 생육에 미치는 영향과 표토/심토의 상관관계는 차이를 보이기 때문에 모든 지역에 일괄적인 기준을 설정하기보다는 후속 연구를 통해 지역별 표토/심토 관계와 토양 특성에 따른 영향 등을 종합적으로 고려하여 획일적인 기준보다는 과학적 근거를 바탕으로 기준이 설정될 수 있도록 제시하였음

	염농도	측정 방식	예외사항
현행	5.5 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 예외적으로 토양염도 측정결과서를 반영하여 표토값 적용 가능
1안	7.5 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 표토와 심토 중 하나만 기준을 초과하여도 허가할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 논 토양 적성등급이 3급지 이하인 경우 - 석력 함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역
2안	9.2 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 표토 염도가 4.5 dS/m 이하일 경우 심토 기준을 초과여도 불허할 수 있음
3안	5.5 dS/m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장·군수는 다음의 농경지에 대해서는 예외적으로 토양염도 기준을 초과하여도 불허할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 논 토양 적성등급이 2급지 이상인 경우 - 간척시기가 준공 후 20년이 경과하였으며, 염해 피해 이력이 없는 경우 - 석력 함량이 높아 심토 채취가 불가능한 지역
4안	5.5 dS/m ~ 7.5 dS/m (지역별 토양 특성 고려)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 심토 (30-60 cm) ▪ $EC_{1.5} \times 5$ ▪ 1회 측정 (상시) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 다만, 이를 위해 '22년 말까지 전남도/충남도 등 지역별 간척지 표토/심토 속성과 상관관계를 추가 분석하고, 해당 지자체 의견을 수렴하여 세부 개선 방안을 구체화할 필요 * 시·군·구 등 권역을 세분화할 경우 간척농지 판정기준이 너무 많아지게 되어 발전사업자 등에 혼선을 야기할 우려가 있어, 주요 간척지가 밀집한 전남·충남 등 '도' 단위로 기준을 구체화하는 것이 바람직

- 추가로 농업인 및 태양광 관련 사업자, 관계부처 등 관계자 모두의 의견을 종합하는 과정을 거쳐 협의된 최종안을 선정하는 과정이 매우 중요할 것으로 판단됨
- 마지막으로 간척농지의 태양광 일시사용 기간동안 토양 염도는 상승할 것으로 예상되며, 20년이 지난 뒤에 다시 농경지로의 재사용이 가능할지에 대한 선행 연구는 전무한 실정임. 따라서 주기적으로 태양광 일시사용에 따른 토양 염도는 모니터링하면서 관리할 필요가 있다고 보이며, 태양광 사업 종료 후 농지로의 전환에 있어 작물 생산에 문제가 되지 않도록 하는 방안 마련이 필요하다고 판단됨

참고문헌

- 구자웅, 최진규, 손재권. 1998. 우리나라 서해안 간척지 및 간척지 토양의 이화학적 특성. 한국토양비료학회지. 31(2) : 120-127
- 국립산림과학원, 2014. 토양 및 식물체분석법 II.
- 농업기반공사. 1999. 간척사업보고서
- 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법. 농업기술연구소. 450p
- 농촌진흥청. 1995. 농사시험연구 조사기준. 농촌진흥청. 603p
- 농촌진흥청, 2000. 토양 및 식물체 분석법.
- 어임수, 한규홍, 이종영, 장효상. 1982. 벼의 생육시기별 염분농도가 벼 생육에 미치는 영향. 호남작물시험장 시험연구보고서. 905-918
- 이승택. 1989. 수도 염해와 대책. 한국작물학회지. 34(별1) : 17
- 이장석, 오경석, 손상목. 1993. 수도의 분얼기에 염수처리 농도가 체내 무기성분 함량, 생육 및 수량에 미치는 영향. 국제농업개발학회지. 5(2) : 167-174
- 이충근, 윤영환, 신진철, 이변우, 김정근. 2002. 벼 생육시기별 염수처리 농도와 기간에 따른 생육 및 수량. 한국작물학회지 47(6) : 402-408
- 이한규, 박희철, 이돈길. 1984. 육해수의 혼합관계가 통일벼의 생육 및 수량에 미치는 영향. 농사시험연구보고서(작물). 16 : 117-125
- Aboukila E.F., and Abdelaty E.F. 2017. Assessment of saturated soil paste salinity from 1:2.5 and 1:5 soil-water extracts for coarse textured soils. Alex Sci Exch J. 38:722-732.
- Aboukila E.F., and Norton J.B. 2017. Estimation of saturated soil paste salinity from soil-water extracts. Soil Sci. 182:107-113.
- Al-Busaidi A, Yamamoto T, Bakheit C, and Cookson P. 2006. Soil salinity assessment by some destructive and non destructive methods in calcareous soils. J Jpn Sci Soil Phys 104: 27-40.
- Ayers R.S., and Westcot D.W. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage paper No 20 (rev. 1). FAO United Nations, Rome, Italy.
- Balasuburamanian, V. and Rac. 1977. Physiology basis of salt tolerance in rice. Ptant. Physiol. section, Tadu Nagada Agr. Univ. India 26(4): 291-294
- FAO. 2002. Agricultural drainage management in arid and semi-arid areas, FAO Irrigation

and Drainage Management Paper 61, Annex 1. Crop salt tolerance data. Food and Agriculture Organisation, Rome. ISSN 0254-5284

- FAO. 2008. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis (by Motsara MR and Roy Rn), FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 19.
- FAO. 2021. Standard operating procedure for soil electrical conductivity, soil/water, 1:5.
- Gibbs S. 2000. How to Texture Soils and Test for Salinity. Salinity Notes.
- Hanson B., and Grattan S.R., 1999. Fulton A. Agricultural salinity and drainage. UC DANR Pub 3375. 160p.
- He Y., DeSutter T., Hopkins D., Jia X., and Wysocki D.A. 2013. Predicting ECe of the saturated paste extract from value of EC1:5. Can J Soil Sci. 93: 585-594.
- Hogg T.J., and Henry J.L. 1984. Comparison of 1:1 and 1:2 suspensions and extracts with the saturation extract in estimating salinity in Saskatchewan soils. Can J Soil Sci. 64: 699-704.
- Kaddah M.T. 1963. Salinity effects on growth of rice on the seedling and inflorescence stages of development. Soil Sci. 96 : 105-111
- Khatun S., and Flowers T.J. 1995. Effects of salinity on seed set in rice. Plant Cell Environ. 18:61-7.
- Khatun S., and Rizzo C.A. 1995. Flowers TJ. Ge-notypic variation in the effect of salinity on fertility on rice. Plant Soil. 173:239-50.
- Khorsandi F., and Yazdi F.A. 2007. Gypsum and texture effects on the estimation of saturated paste electrical conductivity by two extraction methods. Commun Soil Sci Plant Anal. 38:1105-1117.
- Lee S.H., Hong B.D., An Y., and Ro H.M. 2003. Estimation of conversion factors for electrical conductivities measured by saturation-paste and 1:5 water extraction (in Korean). Korean J. Soil Sci. Fertil. 36: 193-199.
- Lim S.S., Yang H.I., Park H.J., Park S.I., Seo B.S., Lee K.S., Lee S.H., Lee S.M., Kim H.Y., Ryu J.H, Kwak J.H., and Choi W.J. 2020. Land-use management for sustainable rice production and carbon sequestration in reclaimed coastal tideland soils of South Korea: A review. Soil Sci Plant Nutr. 66: 60-75.
- Maas E.V. 1984. Salt tolerance of plants. In Handbook of plant science in agriculture, BR Christie (ed). CRC Press Inc. Boca Raton, FL

- Maas E.V., Grattan S.R., Skaggs R.W., and van Schilfgaarde J. 1999. Crop yields as affected by salinity. *Agricultural Drainage. Agron Monogr 38*. ASA, CSSA, SSA, Madison, WI. p. 55-108.
- Maas E.V., and Hoffman G.J. 1977. Crop salt tolerance - current assessment. *J Irrig Drain Div, ASCE*. 103(IR2):115-34.
- Munns, R, and Termaat A. 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13:143-160
- Park H.J., Yang H.I., Park S.I., Seo B.S., Lee D.H., Kim H.Y., and Choi W.J. 2019. Assessment of electrical conductivity of saturated soil paste from 1:5 soil-water extracts for reclaimed tideland soils in south-western coastal area of Korea. *Korean J Environ Agric* 38:69-75.
- Pearson G.A. 1959 Factors influencing salinity of submerged soils and growth of Caloro rice. *Soil Sci.* 87:198-206.
- Pearson, G.A. and Bernstein. L. 1959. Salinity effects at several growth stages of rice. *Agron. J.* 51:654-657
- Rashed A.A., Khelifa E. and Fahmy H.S. 2003. "Paddy Rice Cultivation in Irrigated Water Managed Saline Sodic Lands under Reclamation, Egypt." Paper no. 071, 9th International Drainage Workshop, Utrecht, The Netherlands, September 10-13.
- Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., and Alves W.J. 1989. Estimating soil salinity from saturated soil-paste electrical conductivity. *Soil Sci Soc Am J* 53: 428-433.
- Shannon M.C., Rhoades J.D., and Draper J.H. Assessment of salt tolerance in rice cultivars in response to salinity problems in California. *Crop Sci.* 1998. 38:394-8.
- Shirokova Y., Forkutsa I., and Sharafutdinova N. 2000. Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil salinity monitoring in Central Asia. *Irrig Drain Syst.* 14:199-205.
- Smith J.L. and Doran. J.W. 1996. Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. P. 169-185 In J.W. Doran and A.J. Jones (ed.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
- Sonmez S., Buyuktas D., Okturen F., and Citak S. 2008. Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. *Geoderma.* 144:361-369.
- Umali D.L. 1993. Irrigation-Induced Salinity a Growing Problem for Development and the

Environment; The Word Bank: Washington, DC, USA.

- University of Arizona Cooperative Extension publication, “Leaching for Maintenance – Factors to Consider for Determining the Leaching Requirements of Crops”
- University of Arizona Extension Publication. 1961. Salinity Handbook for Arizona Extension Workers.
- USDA, 1954. Agriculture Handbokk No. 60. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.
- USDA. 1974. USDA-NRCS Arizona Agronomy Tech Note 54, “Conversion Chart of Equivalent Units of Soil Amendments”
- USDA. 1975. USDA-NRCS Arizona Agronomy Tech Note 57, “Leaching Needs in Irrigation Water Management”
- van Genuchten M.Th., Hoffman G.J., Shainberg I., and Shalhevet J. 1984. Analysis of crop salt tolerance data. Soil Salinity under Irrigation. Ecological Studies (Vol 51). Berlin, Germany: Springer-Verlag. p. 258-71.
- Zeng L, Shannon M.C., and Lesch S.M. 2001. Timing of salinity stress affects rice growth and yield components. Agri Water Management. 2001.48:191-206.
- Zeng L, and Shannon M.C. 200b. Effects of salinity on grain yield and yield components of rice at different seedling densities. Agron J. 92:418-23.
- Zeng L, and Shannon M.C. 2000a, Salinity effects on seedling growth and yield components of rice. Crop Sci. 40:996-1003.
- Zhang H., Schroder J., Pittman J.J., Wang J.J., and Payton M.E. 2005. Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extracts. Soil Sci Soc Am J. 69:1146-1151.