

발 간 등 록 번 호

11-1543000-002007-01

기후변화에 대응한 원예단지의 농업용수를 위한 기수담수화 시스템의 상용화 기술개발 및 적용 최종보고서

2017. 9. 24.

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단
협동연구기관 / (주)블루비에스

농림축산식품부
농림식품기술기획평가원

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “기후변화에 대응한 원예단지의 농업용수를 위한 기수담수화 시스템의 상용화 기술개발 및 적용”(개발기간 : 2014.09.25. ~ 2017.09.24.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017.09.24.

주관연구기관명 : 서울대학교산학협력단 (대표자) 김 성 철 (인)



참 여 기 관 명 : (주)블루비에스 (대표자) 홍 민 (인)



주관연구책임자 : 박 승 우

참여기관책임자 : 홍 민

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라
보고서 열람에 동의합니다.

〈 보고서 요약서 〉

과제고유번호	114060-3	해당단계 연구기간	3	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	농생명산업기술개발사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	기후변화에 대응한 원예단지의 농업용수를 위한 기수담수화 시스템의 상용화 기술개발 및 적용			
	세부과제명	기후변화에 대응한 원예단지의 농업용수를 위한 기수담수화 시스템의 상용화 기술개발 및 적용			
연구책임자	박승우	해당단계 참여 연구원 수	총: 17명 내부: 17명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부: 290,000천원 민간: 97,000천원 계: 387,000천원
		총연구기간 참여 연구원 수	총: 48명 내부: 48명 외부: 0명	총연구개발비	정부: 870,000천원 민간: 291,000천원 계: 1,161,000천원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 산학협력단			참여기업명: (주)블루비에스	
위탁연구					
요약	<ul style="list-style-type: none"> - 간척농지 및 염해우심지역의 원예단지에 안전하고 경제적인 농업용수를 공급하기 위한 저비용, 고효율 기수담수화 시스템 공정을 개발하고, 그 시작품을 제작하며, 현장 적용을 통하여 적용성을 평가함으로써 기수담수화 시스템 개발과 그 실용화를 도모하는데 있음 - 대상작물과 관개용수, 관개방법에 따른 원예단지의 유형을 36가지로 구분하고, 시설재배지의 수질기준(안)을 제시함 - 기후변화 시나리오를 활용하여 10개 시설재배작물을 대상으로 기후변화에 따른 시설재배작물의 관개용수량을 산정함 - 시설채소작물 7가지를 대상으로 염도수준에 따른 작물생육실험을 수행하였으며, 기수담수화 시스템의 현장적용성 평가를 위한 작물생육·수질·토양환경 평가를 수행함 - 관개용수의 높은 염분농도로 인한 농작물 피해를 최소화하고 간척농지의 활용성을 제고하기 위해 저비용·고효율의 기수담수화 시스템을 개발하여 제작·운영함 - 기수담수화 시스템의 현장운동을 통한 운영성능 평가 및 개선 방안을 도출하여 현장 맞춤형 기수담수화 시스템 스마트 운영 기술 및 관리전략을 마련함 				보고서 면수: 420면

〈 요약 문 〉

		코드번호	D-01			
연구의 목적 및 내용	본 연구개발의 최종 목표는 간척농지 및 염해우심지역의 원예단지에 안전하고 경제적인 농업용수를 공급하기 위한 저비용, 고효율 기수담수화 시스템 공정을 개발하고, 그 시작품을 제작하며, 현장 적용을 통하여 적용성을 평가함으로써 기수담수화 시스템 개발과 그 실용화를 도모하는데 있음					
연구개발성과	<ol style="list-style-type: none"> 1) 시설재배지의 염해 피해사례를 고찰하고, 대상작물과 관개용수, 관개방법을 고려하여 원예단지의 유형을 36가지로 구분하였으며, 모든 시설재배지 관개용수에 일반적으로 적용될 수 있는 수준의 수질기준(안)을 마련함 2) 국내외 문헌조사를 통해 시설재배지의 관개용수량 산정방법을 제안하고, RCP 기후변화 시나리오를 활용하여 대표 10개 시설재배작물(수박, 딸기, 참외, 토마토, 오이, 상추, 고추, 시금치, 방울토마토, 열갈이배추)을 대상으로 2045년까지의 작물 증발산량 및 필요수량을 산정함 3) 시설원예 채소작물 7가지(상추, 당근, 20일무, 열갈이배추, 아스파라거스, 딸기, 시금치)를 대상으로 염도수준에 따른 작물생육 실험을 통해 생육 및 수질·토양 환경 등을 분석함. 작물별로 차이는 있으나 대부분 관개용수의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타남. 기수담수화 시스템의 현장적용을 위한 작물생육실험도 수행하였으며, 염도 처리능력을 테스트한 결과, 97 % 이상의 처리효율이 나타남 4) 관개용수의 높은 염분농도로 인한 농작물 피해를 최소화하고 간척농지의 활용성을 제고하기 위해 저비용·고효율의 기수담수화 시스템을 개발하여 제작하고, 현장지구 2개소에 설치·운영함 5) 기수담수화 시스템을 운영한 결과, 광양 현장지구의 경우 애호박의 정상생육이 가능해졌으며, 평균 과실수가 기존 4.7 개에서 6.3개로 증가하고 중량도 평균 277.2 g에서 295.1 g으로 증가하였음. 고흥 현장지구는 토마토의 병충해 감소, 수정불량(화방당 2개 열매) 감소, 기형과의 감소 등의 효과가 나타남. 2개 현장지구의 시스템 염도 처리능력은 평균 90 % 이상으로 나타남 6) 기수담수화 시스템의 현장운영을 통해 운영성능을 평가하고 시스템의 설계용량별 전력비 및 유지비용 산출을 통해 경제성을 분석함. 또한, 사용자(농민) 중심의 운영매뉴얼을 작성하고 저비용·저에너지 운영 관리 전략을 마련함 					
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ol style="list-style-type: none"> 1) 본 연구개발 성과는 농업용수 수요량이 연간 8천만 m³에 이르는 새만금 간척지의 농업용수 공급에 적용 가능할 것으로 예상되며, 이는 평균 사업 단가를 적용할 경우 8,000억 원 이상의 사업효과가 예상됨 2) 가뭄 등 비상급수가 필요할 때, 기수담수화 시스템을 통해 처리된 수자원은 가용수자원으로 가치가 높으며 신규 수자원개발에 대체할 수 있는 대체수자원으로써 가치도 매우 높음 3) 사계절 풍부한 청정 농업용수 공급이 가능함에 따라 고품질 수익형 수출주도형 농작물 재배시스템 구축이 가능하여 고부가가치 수익형 농작물 재배에 따른 농촌지역 소득 창출 및 지역 발전에 기여할 수 있을 것으로 예상됨 4) 양질의 농업용수 공급에 따라 생산된 농산물에 대한 대국민 안전인식 제고에 기여할 것으로 예상됨 5) 기수담수화 시스템 개발을 통하여 수질개선효과, 간척농지 활용성 증가, 농산물 안정성 제고, 농가소득 증가 등 간접효과를 고려할 경우 사업화로 인한 효과는 직접 효과의 상응하는 정도로 나타날 것으로 예상됨 					
중심어 (5개 이내)	담수화	기수	원예단지	농업용수	기후변화	

〈 SUMMARY 〉

	코드번호	D-02
Purpose& Contents	<p>The objectives of the research are 1) to develop low-cost and high efficient desalination systems to treat brackish water or water sources having high salt contents for irrigation at tidal reclaimed farmlands and greenhouses near coast, and 2) to develop pilot systems and to assess their feasibility of the field applications. Guidelines for the tolerable salt contents of irrigation water for various vegetable crops are to be proposed. Pot and plot experiments for selected vegetable crops under the different levels of salt contents of irrigated water are to be conducted to investigate the effects of salt contents on vegetable growth and yields, and also on chemical properties of plant and soil. And irrigation water requirements for greenhouse farming and the effects of climate change on the water requirements are to be estimated. And test-bed desalination systems are to be developed and applied to commercial greenhouse farming and the economic feasibility for the field applications is to be evaluated.</p>	
Results	<p>1) Case studies for the extent and causes of salt damage to crops revealed that greenhouse vegetable farming at tidal land reclamation projects was found to be vulnerable to salt damage. Greenhouse vegetable farming was grouped to thirty-six categories based on crop varieties, irrigation water sources, and irrigation methods. And guidelines on tolerable salt contents of irrigation water for greenhouse vegetable crops were proposed.</p> <p>2) A procedure to determine irrigation water requirements for greenhouse vegetable farming was proposed and compared to previous methods. It was applied to estimate the water requirements for ten vegetable cropping systems from the climate outlook data for two representative concentration pathway (RCP) scenarios. The vegetable crops were water melon, strawberry, melon, tomato, cucumber, lattice, pepper, spinach, cherry tomato, winter chinese cabbage.</p> <p>3) Pot and plot experiments for seven popular vegetable crops in greenhouses (lettuce, carrot, radish, napa cabbage, asparagus, strawberry, and spinach) under three different salt contents of irrigation water. The salt contents were regulated according to salt tolerance levels for each of the test vegetable crops using the desalination systems. The vegetable growth and yields, and the sodium ion contents in vegetables and soils were investigated for all treatments. The results showed that the treatments using irrigation water of high salt contents reduced vegetable crop yields significantly. Sodium ion contents in plant tissues increased with the salt contents of the irrigation water. The desalination system was operated well showing over 97 percent of the salt removal efficiencies.</p> <p>4) Two test-bed desalination systems were built and applied to commercial greenhouse farms in Gwangyang and Goheung. At Gwangyang greenhouse farm in which the irrigation water source was groundwater, the system made possible to increase the green pumpkin yield from 4.7 to 6.3 from each plant individual, and the average weight of the harvested pumpkin was increased from 277.2 to 295.1 gram. Tomato yields at Goheung greenhouse farm which applied the system were also increased and the pollination rates were significantly increased.</p>	

		코드번호		D-02	
Results	<p>5) The operational performance at the field application of two desalination systems in commercial greenhouse farms was over 90 per cent in average. The costs for electricity and maintenance of the pilot systems were surveyed and the economical analyses were made. A user manual for the pilot system operation was published that may be easily used by farmers. And the operation and maintenance guidelines for the desalination system were established and incorporated to ensure the low cost and high efficiency performance.</p>				
Expected Contribution	<p>1) The desalination systems developed in this research may be applied to tidal reclamation projects like the Saemangeum Project where irrigation water resources contain high salt contents that may not be directly applied to greenhouse farming. The total water requirements for the Project are estimated to be over 80 million m³ a year. The systems could reduce the project costs as much as 800 trillion Won.</p> <p>2) The desalination systems may be applied to reclaim sea or brackish water for irrigation during severe drought period or any other emergency cases. This may be used as alternative water resources to reduce water resources development projects that are often too costly and take long time.</p> <p>3) The systems may help establish high quality, and high profitable greenhouse farming systems since they can provide the irrigation water of high quality. This may help increase farm income.</p> <p>4) The systems may ensure the safety and quality of greenhouse vegetable products, which increases consumers' recognition of the products.</p> <p>5) The indirect benefit from the desalination systems includes the improvement of water quality, the high land use of tidal land reclamation projects, and the improvement of the food safety of vegetable products. The indirect benefit may be greater than direct income.</p>				
Keywords	Desalination	Brackish Water	Horticulture Complex	Agricultural Water	Climate Change

< CONTENTS >

Chapter 1. Summaries of the research	7
Chapter 2. The present status of technology development	12
Chapter 3. The content and results of R&D	23
Section 1. Classification of types of horticulture complex and water quality standard	23
Section 2. Estimation of irrigation water requirements in horticulture complex by climate change ..	61
Section 3. Evaluation of crop growth by salinity level of major horticultural crops	103
Section 4. Evaluation of crop growth for application of brackish water desalination system	220
Section 5. Design and optimization of brackish water desalination system	269
Section 6. Selection of Test-bed site and target water quality	320
Section 7. Development of brackish water desalination system and field application assessment ..	343
Section 8. Standardization of smart operations technology in brackish water desalination system ..	379
Section 9. Summary and conclusion	403
Chapter 4. Achievement of objectives and contribution to related fields	407
Chapter 5. Outcomes and applications of research and development	410
Chapter 6. Foreign technology information collected in research process	412
Chapter 7. Security of development result	412
Chapter 8. Research facility and equipments	412
Chapter 9. Performance result of safety management at laboratory	412
Chapter 10. Typical performance	413
Chapter 11. Other detail	414
Chapter 12. Reference	415

〈 목 차 〉

제1장 연구개발과제의 개요	7
제2장 국내외 기술개발 현황	12
제3장 연구수행 내용 및 결과	23
제1절 원예단지 유형구분 및 수질기준(안)	23
제2절 기후변화에 따른 원예단지의 농업용수 수요량 산정	61
제3절 주요 시설원에 작물의 염도수준별 작물생육평가	103
제4절 기수담수화 시스템 현장적용을 위한 작물생육평가	220
제5절 기수담수화 시스템 공정설계 및 최적화	269
제6절 기수담수화 시스템 현장지구 선정 및 목표수질 설정	320
제7절 기수담수화 시스템 설계·제작 및 현장운영 평가	343
제8절 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화	379
제9절 요약 및 결론	403
제4장 목표달성도 및 관련분야 기여도	407
제5장 연구결과의 활용계획	410
제6장 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	412
제7장 연구개발 결과의 보안등급	412
제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황	412
제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적	412
제10장 연구개발과제의 대표적 연구실적	413
제11장 기타사항	414
제12장 참고문헌	415

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발의 필요성

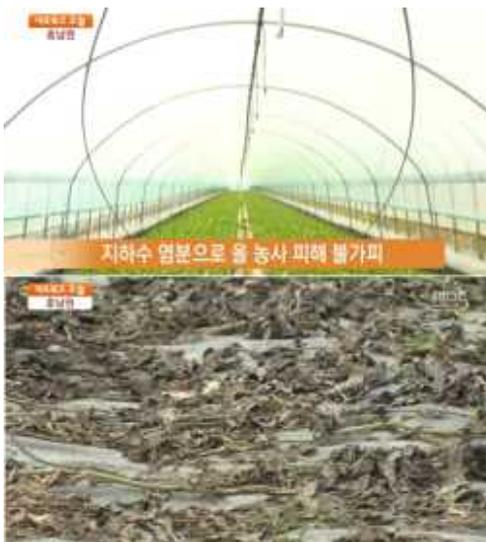
기후변화는 극한 가뭄과 같은 영농환경의 변화를 가져와 안전한 영농활동을 위협한다. 특히, 전체 수자원이용량 320 억 m³의 약 50 %에 달하는 159 억 m³이 농업용수로 소비되고 있는 현실을 고려할 때, 기후변화에 따른 집중호우 및 극한가뭄의 강도와 발생빈도의 증가로 농업용수 사용을 더욱 어렵게 할 것으로 예상된다. 따라서 안전한 농업용수 공급이 가능하게 하고, 양질의 농업용수를 농민에게 제공하기 위해서는 기후변화와 같은 변해가는 농업환경에 적절히 적응할 수 있는 농업용수 이용체계가 필요하다. 최근 기후변화로 인한 물 부족이 발생하고 가뭄이 장기화되어 농작물 피해가 빈번히 발생함에 따라 기후변화에 대응한 농업용수의 안정적인 공급 대책에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히, 간척지 및 염해우심지역과 같은 관행 농업용수의 공급이 어려운 지역을 대상으로 수처리 기술을 활용한 저염도의 기수를 이용한 수자원확보가 국가적 과제로 부상되고 있다.

우리나라의 농정정책은 식량작물인 논벼를 중심으로 이루어져왔다. 하지만 최근 농업의 경쟁력을 강화하고, 산업으로서의 역할을 증진하기 위해 농정정책이 변화되고 있다. 채소와 과일을 합한 원예부문의 생산액은 1990년 4.7조 원에서 2000년과 2010년에 각각 9.3조 원, 11.9조 원으로 크게 증가하였고, 생산액의 농업 비중은 동기간 26.6 %에서 28.6 %로 높아졌다. 농업 전체의 부가가치가 22.4조원으로 정체된 가운데 원예부문 부가가치는 2010년 기준 8.1조 원으로 전체 농업 부가가치의 36.0%를 차지하여 생산액 비중인 28.6 %보다 크다. 이는 원예부문이 부가가치 측면에서의 농업성장에 대한 기여도가 크다는 사실을 나타낸다. 최근 건강에 대한 소비자들의 관심이 높아지고 있으며, 고품질 안전 농산물에 대한 소비자 수요가 증대되어 고품질 농산물과 친환경 농산물이 주로 재배되는 시설원예농업은 국제 경쟁력이 있는 미래 농업의 주역으로 성장하고 있다. 2012년 농림수산식품부는 시설원예산업을 미래농업을 이끌어 갈 핵심 성장동력으로 집중 육성하기로 했으며, 5조원 수준인 생산액을 2020년까지 9조 원수준으로 끌어올리고, 수출규모도 현재 2억 달러에서 10억 달러까지 확대하는 시설원예산업 중장기 발전대책을 발표하였다.

농림축산식품부는 이와 같은 농정정책의 변화에 발맞추어 최근 준공이 완료되었거나 완료 예정인 간척지를 대상으로 원예단지 토지이용계획을 수립하고 있다. 1970년대 초 세계적인 식량과동 및 석유과동으로 인하여 식량의 안정적 공급과 자급을 위하여 1970년대부터 농경지 위주의 간척사업을 본격적으로 추진하였으며, 간척사업으로 조성된 농지는 대부분 벼농사 위주로 활용되고 있다. 하지만 최근 쌀 재고량 증가 등 농업환경의 변화로 간척농지의 개발방향이 논 농사 중심의 논 조성에서 부가가치가 높은 시설원예 및 밭작물 재배단지 조성 등으로 전환되고 있다. 다양한 간척지 수요에 부응하고 21세기 경쟁력 있는 고소득 대규모 농업단지로 활용하기 위하여 종합적인 간척지 활용방안이 계획되고 있으며, 수출시장 다변화시 수요증가가 예상되는 파프리카, 토마토 등 시설채소와 화훼작물 등 국제 경쟁력이 높은 수출주도형 첨단수출 원예단지 및 토양격리·수경·양액재배가 가능한 포도, 무화과, 참다래, 블루베리, 복분자 등의 고소득 작물 재배를 위한 원예단지 등이 대규모 간척농지에 입지할 계획이다.

간척지에 시설재배단지를 조성하기 위해서는 적합한 농업용수 공급 대책이 마련되어야 한다. 간척지는 조석현상에 의해 해수가 유입되고 하천으로부터 담수가 유입되어 만나는 기수역이 형성된다. 기수역에서의 염분농도는 내륙지방에 비해 비교적 높은 편이며, 높은 염분농도는 작물생육 및 수확량에 영향을 미치게 된다. 콩 및 당근, 상추, 양파와 같은 채소류는 염해에 취약한 작물로서 관개용수의 전기전도도가 700~800 $\mu S/cm$ 을 초과하면 작물생육에 피해가 발생한다. 높은 염분농도에서는 뿌리 장애와 함께 병을 일으키는 병원균수가 증가하기 때문에 토마토의 근부병이나 오이의 덩굴쪼김병 등이 발생할 수 있다. 이와 같은 높은 염분농도의 관개로 인해 시설원예단지에서 재배 가능한 작물이 제한될 수 있다. 또한, 원예지구에서 염분이 높은 지하수에 의한 피해와 가뭄에 따른 하천유량의 감소에 따른 염분농도 증가로 인한 피해 사례가 발생되고 있어 농업용수 확보에 어려움을 겪고 있다. 염해피해와 함께 첨단시설원예단지의 경우 양액재배, 점적관개 등이 많이 이용되며, 부유물 유입이 많게 되면 막힘 현상으로 인해 관개효율이 떨어지므로 이를 개선하기 위한 수처리기술 적용이 필요하다.

관개용수의 높은 염분농도로 인한 작물성장 저해 및 수확량 감소 등의 농작물 피해를 감소하고 간척농지의 활용성을 제고하기 위해서 염분제거를 위한 기수담수화 기술 개발이 필요하다. 이와 같은 기수담수화 기술은 농업용수 공급을 목적으로 함에 따라 설치비가 저렴하고 유지관리 비용이 적게 소요되어야 하며, 농업용수 특성상 짧은 시간 동안에 많은 수량을 처리해야 하므로 저비용, 고효율의 시스템 개발이 필요하다.



a) 광양시 진상면 시설원예농가(2013.4)



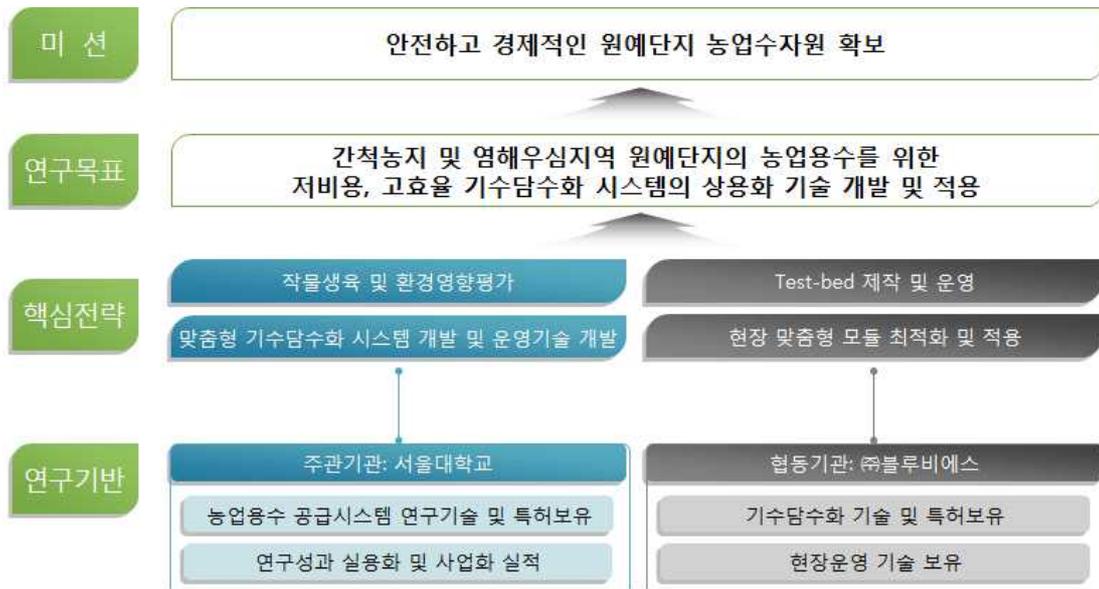
b) 임진강 수계 염분피해(2014.5)

<농업용수 염분에 의한 피해 사례>

제2절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구개발의 목표

본 연구개발의 최종 목표는 간척농지 및 염해우심지역 원예단지에 농업용수를 안전하고 경제적으로 공급할 수 있도록 저비용, 고효율 기수담수화 시스템 공정을 개발하고, 그 시제품을 제작하며, 현장 적용을 통하여 적용성을 평가함으로써 기수담수화 기술 개발과 그 실용화를 도모하는데 있다.



<연구목표 및 핵심전략>

2. 연구개발의 주요 내용

연구 목표를 달성하기 위한 주요 연구개발 내용을 정리하면 다음과 같다.

가. 간척지 및 염해우심지역의 원예단지 유형조사 및 수질기준의 정립

- (1) 고염도 원예단지 농업용수 취수사례 분석 및 유형 구분
- (2) 원예단지 농업용수 수질기준(안)의 제시

나. 기수담수화 시스템의 현장 적용에 따른 작물생육 및 환경영향평가

- (1) 시스템 적용에 따른 현장적용지구의 작물생육 및 수확량 조사
- (2) 현장적용지구의 수질 및 토양환경 모니터링 및 영향 평가

다. 기수담수화 시스템 설계인자 분석 및 공정설계

- (1) 처리공법의 특징 및 장단점 비교 평가
- (2) 기수담수화 시스템의 Pilot plant 제작 및 적용
- (3) 기수담수화 시스템 설계인자 분석 및 도출
- (4) 기수담수화 공정 개선 및 최적운영 조건 도출

라. 기수담수화 시스템 기술의 현장실용화 지역 발굴

- (1) 지역개발계획, 유역 및 농업자원 조사
- (2) 현장 실용화 대상지구 발굴

마. 기수담수화 시스템의 Test-bed 구축 및 운영성능평가

- (1) 기수담수화 시스템 Test-bed 설계 및 제작
- (2) 기수담수화 시스템 최적 운영 및 모니터링
- (3) 기수담수화 시스템 적용 타당성 평가 및 개선방안 도출

바. 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화

- (1) 현장 맞춤형 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화
- (2) 기수담수화 시스템의 산업화 전략 수립
- (3) 기수담수화 사업계획설계기준(안) 수립

3. 연차별 연구개발의 목표 및 내용

구분 (연도)	연구개발의 목표	연구개발의 내용
1차년도 (2014)	○ 간척지 및 염해우심 지역의 원예단지 유형 조사 및 수질기준의 정립	○ 원예단지 유형구분 및 적정 수질기준 정립 - 고염도 원예단지 농업용수 취수이용 사례조사 - 시기별 원예단지 농업용수 수질 조사 - 작물별 수질기준 검토를 위한 작물재배 및 모니터링 - 원예단지 농업용수 수질기준(안) 제시
	○ 기수담수화 시스템 기술의 현장실용화 지역 발굴 및 조사	○ 기수담수화 시스템의 현장실용화 지역 발굴 - 지역개발계획, 유역 및 농업자원 조사 - 현장실용화 지구 농업자원 및 처리수 현황조사 - 기후변화를 고려한 현장실용화 지역 선정 - 기수담수화 시스템의 적정 용량 산정 ○ 시범적용지역 오염수지 분석 및 목표수질 설계 - 지역 특성에 따른 기수담수화 시스템 목표수질 설정
	○ 기수담수화 시스템 공정설계 및 Test-bed 설계	○ 기수담수화 시스템 설계인자 분석 및 공정설계 - 처리공법의 특징 및 장단점 비교 평가 - 기수담수화 시스템의 Pilot plant 제작 및 적용 - 기수담수화 시스템 설계인자 분석 및 도출 - 기수담수화 공정 개선 및 최적운영 조건 도출 ○ 기수담수화 시스템 모듈 최적화 및 Test-bed 설계 - 원예단지 유형별 모듈 표준화 및 최적화 - 원예단지 유형 및 현장여건을 고려한 기수담수화시스템 Test-bed 설계

구분 (연도)	연구개발의 목표	연구개발의 내용
2차년도 (2015)	○ 기수담수화 시스템 적용에 따른 작물생육 및 환경영향 조사	○ 기수담수화 시스템 적용지구의 작물생육 및 환경영향조사 - 현장실용화 지구 수질·토양·생육 환경 영향 조사 - 현장실용화 전후검토를 위한 영향 조사
	○ 기수담수화 시스템의 Test-bed 제작 및 운영	○ 원예단지 유형 및 현장여건을 고려한 기수담수화 시스템 Test-bed 제작 - 기수담수화 시스템 운영계획 수립 - 운영 시나리오에 따른 모니터링 및 평가 실시 ○ 현장운영 평가 및 성능유지를 위한 최적제어기술 개발
	○ 기수담수화 시스템의 공정개선 및 최적운영조건 도출	○ 시스템 시험운영을 통한 모듈별 구조 및 성능개선 - 유입 수질 및 유량에 따른 시험운영 - 현장시험운영에 따른 모듈별 구조 및 성능개선 ○ 공급 용량 규모 및 수질 유형별 맞춤형 최적 공정기술 개발
3차년도 (2016)	○ 기수담수화 시스템 적용에 따른 작물생육 및 환경영향 조사	○ 기수담수화 시스템 적용지구의 작물생육 및 환경영향조사 - 현장실용화 지구 수질·토양·생육 환경영향 조사 - 현장실용화 전후검토를 위한 영향 조사
	○ 기수담수화 시스템 적용 타당성 평가 및 개선방안 도출	○ 기수담수화 시스템 공정별 용량검토·설계 및 효과대비 경제성분석 ○ 기수담수화 시스템 기술의 현장운용평가 및 성능유지를 위한 최적제어기술 적용 ○ 산업화 개발전략 수립을 위한 현장모니터링 결과 도출
	○ 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화 및 산업화 전략 수립	○ 현장 규모별, 수질 수준별 최적 공정별 모듈 최적화 및 생산공정 개발 ○ 농업용 목적의 다양한 유형별 공급을 위한 지능제어 및 스마트 운영기술 개발 ○ 저비용·저에너지 소비를 위한 운영 및 관리 전략 개발 ○ 기수담수화 시스템 기술의 사업화 전략 수립 ○ 기수담수화 계획설계기준(안) 수립

제2장 국내외 기술개발 현황

제1절 국내·외 담수화기술 현황

인구 증가와 기후 변화 등의 이유로 이용 가능한 수자원이 부족한 국가 및 지역이 늘면서 대체 수자원 개발에 대한 관심이 세계적으로 높아지고 있다. 이에 따라 염분의 농도가 높은 지하수(기수¹⁾) 또는 해수를 담수화 기술을 이용하여 처리하고 용수로 보급하는 사례가 늘고 있다. 담수화는 물 속의 염분, 이온물질, 용존 미네랄 및 금속 등을 제거하는 기술이다.

전통적인 담수화 기술은 크게 증발법과 분리막법으로 구분된다. 증발법은 해수에 열을 가하여 수증기로 만들고 이를 냉각하여 염분이나 불순물을 제거하는 방법으로 다단플래쉬법(MSF), 다중효용법(MED)이 대표적인 방법이다. 분리막법은 해수를 가압하여 역삼투현상을 일으킴으로서 담수화하는 역삼투법(reverse osmosis, RO)과 전기 포텐셜을 이용해서 원수로부터 분리막을 통하여 선택적으로 염을 제거하는 전기투석법(electrodialysis, ED)이 대표적이다. 증발법은 물을 끓이는데 막대한 에너지를 요구하는 것과는 달리, 분리막법은 특정 물질만 통과시키는 반투막을 사용하는 방법으로 일반적으로 증발법에 비해 에너지 사용량이 적으나 원수 수질에 따라 설계와 운영이 어려운 단점이 있다.

<제염 방식에 따른 담수화 기술의 원리 및 특징>

방식		원리	장·단점
증발법	다단 플래쉬법(MSF)	순차적으로 감압상태의 관내에 과열 해수를 주입하여 자기 증발시켜 발생하는 수증기를 응축하여 담수생산	(장점) 대규모 장치에 많은 실적이 있고 생산수의 순도가 높음 (단점) 에너지 소비량이 많고, 부식의 방지 필요하며 부분부하 운전이 곤란함
	다중 효용법(MED)	증발장치 내에 해수로부터 발생하는 수증기를 순차 감압상태에 있는 해수의 가열, 증발에 사용하여 응축하여 담수생산	(장점) 중규모 장치에 많은 실적이 있고 생산수의 순도가 높음. 폐열이용시 유리함 (단점) 에너지 소비량이 많고, 부식의 방지 필요하며, 최대 12중 효용 장치까지가 한도임
	증기 압축법(VCD)	증발장치내 해수로부터 발생하는 수증기를 압축에 의해 온도를 높인 후 해수의 가열 증발로 응축하여 담수생산	(장점) 소규모장치에 많은 실적이 있고, 가동시 이외에는 열원이 필요없음. (단점) 에너지 소비량이 많고, 대형 장치에는 대형의 증기 압축기가 필요함
분리막	역삼투법(RO)	반투막을 사이에 두고 해수의 삼투압보다 높은 압력을 가하여 담수생산	(장점) 최근에 실적이 급증하고 있으며, 에너지 소비량이 적으며 조작이 용이함 (단점) 분리막 내구성 문제(교체) 및

1) 기수(brackish water) : 염분농도가 해수보다 낮은 물(농도가 해수의 25%이하, 7,000ppm 이하 수준)

			압력용기, 내압배관 및 전처리 및 후처리가 필요함
이온수지	전기탈염회석법(ED)	음, 양의 두전극 사이에 교대로 배치한 양이온교환막과 음이온교환막의 사이에 해수를 흘려 해수중의 이온을 분리 제거후 담수생산	(장점) 내압용기 및 내압배관이 불필요하고 온도변화에 대응이 용이함 (단점) 적용사례가 적음

염분이 고농도인 해수의 담수화에는 주로 증발법과 역삼투압법이, 저농도인 기수의 담수화에는 역삼투압법과 전기투석법이 주로 사용되고 있다. 역삼투법 (RO)이 증발법(MSF, MED)과 비교하여 8~29 %까지 생산비용이 적게 소요되며, 최근에는 고압펌프, 에너지회수장치, 고성능 막제조 등 요소기술개발로 에너지를 저감하고, 오염물질이 막에 부착되어 막이 막히는 현상인 파울링 (fouling)을 줄이기 위한 다양한 기술개발로 효율성을 높이고 있어 증발법을 비롯한 다른 처리방식과 비교하여 경제성에서 우위를 보이고 있다. 전기투석법은 원수인 해수의 염도가 낮을수록 이론 에너지량이 감소되는 특징이 있는데, 염도가 11,000 ppm인 경우는 증발법보다, 4000-5000 ppm인 경우는 역삼투압법보다 경제적이라고 알려져 있으나, 이온화되지 않는 물질은 제거할 수 없는 단점이 있어 전기투석법방식은 실제로 해수담수화보다는 기수담수화에 많은 실적을 가지고 있다.

<담수화 방식별 경제성 분석 (이병준, 2012)>

방식	MSF	MED	RO
에너지소비량(kWh/m ³)	10-16	6-12	4-6
건설비 (\$m ³ /d)	1,200-1,500	900-1,000	700-900
생산원가 (cents/m ³)	110-125	75-85	68-92

역삼투 방식은 2005년까지는 전체 담수화 시장 중 약 48 %를 차지하였으나 에너지 비용 상승 등의 문제로 기존의 증발법을 대체하여 2020년에는 70 % 이상으로 비율이 증가할 것으로 예상되고 있다. 막증류는 소수성 막 (hydrophobic membrane)과 증발방식을 결합한 담수화 공정으로, 기존의 증발법이나 막공정과는 달리 높은 열과 압력을 요구하지 않아 에너지의 효율적 이용이 가능하며, 이론적으로 해수 중의 각종 이온과 염분을 100 % 제거할 수 있다는 장점이 있으며 태양열과 같은 신재생에너지나 발전 폐열을 활용할 경우 더욱 높은 경제성을 확보할 수 있으나 내구성과 효율성이 높은 막의 개발과 대규모 실증사례가 아직 없는 실정이다. 정삼투법은 역삼투와 반대로 유도용액의 농도를 해수보다 높게 해서 해수 중의 물을 유도용액으로 삼투압을 이용하여 담수를 확보하는 기술로써, 이론적으로 에너지 효율이 매우 좋지만 상용화를 위해서는 유도용액과 고성능의 막개발이 필요하다. 전기투석법은 하전된 전극의 계면에 형성되는 전기이중층에서 전기적 힘에 의한 이온들의 흡착 및 탈착반응을 이용한 것으로 에너지 소비가 역삼투법보다 적으나, 제거효율 향상이 필요하고 상용화에는 추가적인 연구가 필요한 방법이다.

국내의 경우 건설교통부 VC-10 (Value Creator-10) 사업의 일원으로 2006년 12월 29일에 해수담수화 플랜트 사업단 (SeaHero)을 발족하였으며, 해수담수화 플랜트 분야 차세대 핵심 기술개발, 건설소재 및 기기의 국산화를 통해 현장적용 기술의 확보와 함께 국제 경쟁력을 갖는 대용량 역삼투압 방식 해수담수화 플랜트 설계 및 건설 기술을 개발함과 동시에 고효율 운영 유지관리 관리 기술개발과 해외진출 기반을 확보하기 위한 연구사업을 수행중에 있다. 해수담수화 플랜트 사업단은 막 소재의 국산화로서 RO 플랜트의 주요 기자재인 막과 막 소재, 펌프의 개발에 중점을 두고 있으며, 특히 국산화율을 높이기 위해서 필수적으로 개발되어야 할 장비 개발 기술력 및 최근 해외에 수출하는 등 선진국과 대등한 소재 기술력을 보유하고 있다. 대용량 해수담수화 실증 플랜트 설계 및 건설 기술개발을 위해 부산 기장에 45,000톤/일 규모의 해수담수화 대형 테스트 베드를 건설 중에 있다.

기수담수화 시스템은 염분농도가 높은 해수(30,000 mg/L~40,000 mg/L)보다는 낮은 기수(5,000 mg/L~10,000 mg/L)를 이용하기 때문에 기수담수화 시스템이 해수담수화 시스템에 비해 시설비 및 운영비가 50%정도 수준이며 생산단가도 해수담수화 시스템의 경우 평균적으로 약 800 원/톤에 반해 기수담수화 시스템을 적용할 경우 약 400 원/톤으로 농업용수에는 해수담수화 시스템보다는 기수담수화 시스템이 적합하며 보다 저렴하고 요구되는 수량 및 수질을 달성할 수 있도록 저비용, 고효율 처리공정개발이 필요하다.

<시공비 및 유지관리비 비교>

(단위: 천원)

구 분		해수 담수화 시스템	기수담수화 시스템
초기투자비 (600톤/day 기준)	기계시공비	4,000,000	2,500,000
유지관리비 (년간)	전력비	43,675	28,123
	약품비	14,636	14,615
	소모품비	90,853	30,456
	계	149,164	73,194

<시스템규모에 따른 기수 및 해수담수화 운영비용 (Karagiannis et al., 2008)>

수자원	시스템 규모 (m ³ /일)	비용 (\$/m ³)
기수	<1,000	0.78-1.33
	5,000~60,000	0.26-0.54
해수	<1,000	2.23-11.3
	1,000~5,000	0.7-3.9
	12,000~60,000	0.44-1.62
	>60,000	0.50-1.00

해수담수화 시스템에서의 사용되는 역삼투막은 SWRO (Seawater Reverse Osmosis) 막으로 역삼투막 에너지 소모는 4~6 kWh/m³ 정도이며 역삼투의 작동압력은 50~70 기압이 필요하며 역삼투의 해수담수화 회수율 30~40 %로 보고되고 있다. 해수담수화보다 저염도 원수 조건에서 사용하는 기수담수화 공정에서는 RO (역삼투막)로 처리하여 청정용수를 생산하며, 기수담수화에 사용되는 역삼투막은 주로 BWRO (Brackish Water Reverse Osmosis) 막으로서 7~40 기압의 조건에서 운전하므로 해수담수화에 비해 에너지 소비가 적고 (역삼투막 에너지 소모 1~3 kWh/m³), 역삼투의 기수담수화 회수율 70~80 %로 해수담수화 회수율에 비해 높게 보고되고 있다.

<해수담수화 시스템과 기수담수화 시스템 비교>

구 분	해수담수화 시스템	기수담수화 시스템
장 점	<ul style="list-style-type: none"> ① 해수담수화는 댐 다음으로 다량의 수자원을 확보할 수 있는 기술이며, 공사기간이 짧아 조기에 다량의 수자원을 확보할 수 있음 ② 계절과 기상조건에 좌우되지 않고 물의 확보가 가능하며, 플랜트가 콤팩트하여 시설면적이 작은 특징을 가지고 있음 ③ 공급배관설비가 간단하다. ④ 역삼투 공정으로 먹는물 및 순수에 가까운 수질을 얻을 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> ① 해수담수화에 비해 저렴한 설치비와 유지관리비로 저염분 담수화시 경제적임 ② 유량 및 수질변동 대처능력 우수 전기분해장치에 의한 분해 제거 효율의 안정성 갈수기에 온도의 영향 없이 안정된 처리수질을 확보 ③ 지속적인 기술개발로 생산단가 하락 - 바이오나노수 공급으로 후단의 막을 깨끗하게 유지관리 하여 막 교체 주기를 낮출 수 있음. - 수처리 막의 관리로서 바이오나노버블수를 이용하여 미생물의 증식을 방지하며 기존에 약품처리, 세척 및 교환 등의 유지관리비를 저렴하게 유지가능하게 함. ④ 저비용으로 청정용수를 얻을 수 있음
단 점	<ul style="list-style-type: none"> ① 유기 또는 무기물에 의한 파울링(fouling) 방지를 위해 전처리에 상당한 주의가 필요 ② 전처리 설비 및 역삼투막 설비의 고압 운전으로 인해 높은 전력비가 소요 ③ 해수의 여과 및 약품주입에 의한 수질조정, 막모듈의 세정 교환이 필요하며 유지관리비가 비쌈 ④ 역삼투는 에너지 요구량과 처리비용이 높은 편임 ⑤ 역삼투 공정은 처리수의 회수율이 30~40% 정도로 다른 수처리 공정에 비해 낮은 편임 	<ul style="list-style-type: none"> ① 기수 염분 조건에 맞는 유입수 처리 ② 여과 및 약품주입에 의한 수질조정, 막모듈의 세정 교환이 필요함

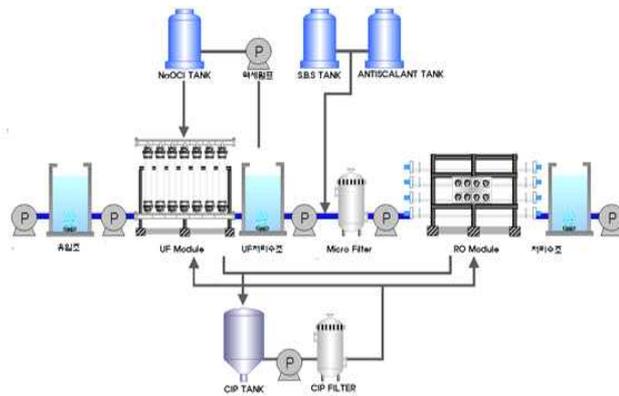
제2절 국내·외 담수화기술 개발 동향

1. 국내 담수화처리 공법

가. 담수화처리 공법

(1) 일반적 분리막 공법

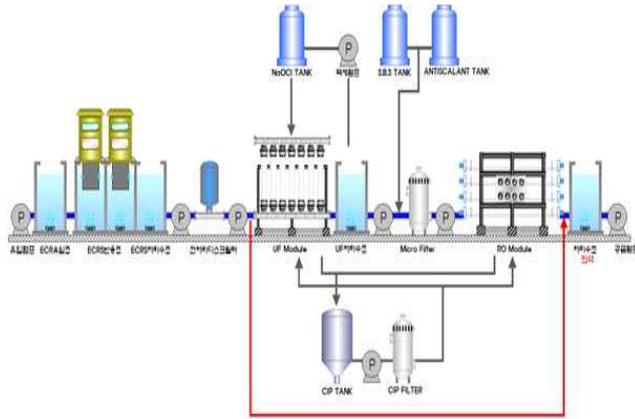
국내에서 많이 상용화된 재이용 기술로써 분리막 공정은 가압식 (UF) + (RO) 시스템으로 구성되고 있으며, 생활용수 및 음용수의 기준에 맞는 처리수 생산으로 고가의 장비와 고생산수, 고에너지, 고유지관리비로 농업용수 적용함에 있어 처리비용(수익성)과 환경영향에 문제점이 야기되고 있다. 또한 본 공정은 막의 장기적 운전을 위해서는 과도한 전처리 시설이 필요하며 막의 오염을 억제하기 위해 빈번한 화학세정이 필요하고 막의 교체 및 약품세척으로 인한 폐수가 발생하는 등 농업용수 적용에는 효율성이 많이 떨어진다.



<담수 분리막 공법>

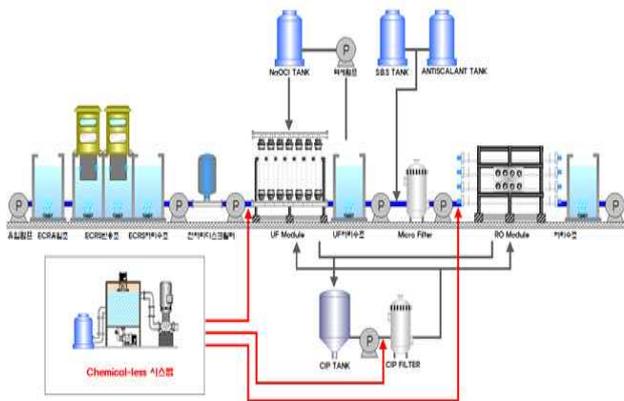
(2) 전기 전처리 + 분리막 혼합 공법

기존 초 순수 (공업용수), 생활용수 (음용수)에서 개발한 시스템의 활용범위를 보다 저에너지 저유지관리비 시스템으로 개발하여 농업 재이용수에 맞게 SS, 탁도, 대장균, 염분을 제거하여 농어촌지역에 안전한 농업용수 공급을 목적으로 한다. 공정을 살펴보면 희석 전처리 시스템 + (UF) + (RO)시스템으로 구성되어 있으며 희석 공정을 실현함으로써 후단의 막의 성능을 안정적으로 유지 및 향상시킬 수 있다. 하지만 여전히 막 오염과 막 세정이 공정 효율에 영향을 주게 되며 막의 특성을 고려한 최적의 막 세정 방법과 세정 주기 및 폐수 감소를 위한 공정개발이 필요하다.



<전기전처리 + 분리막 공법>

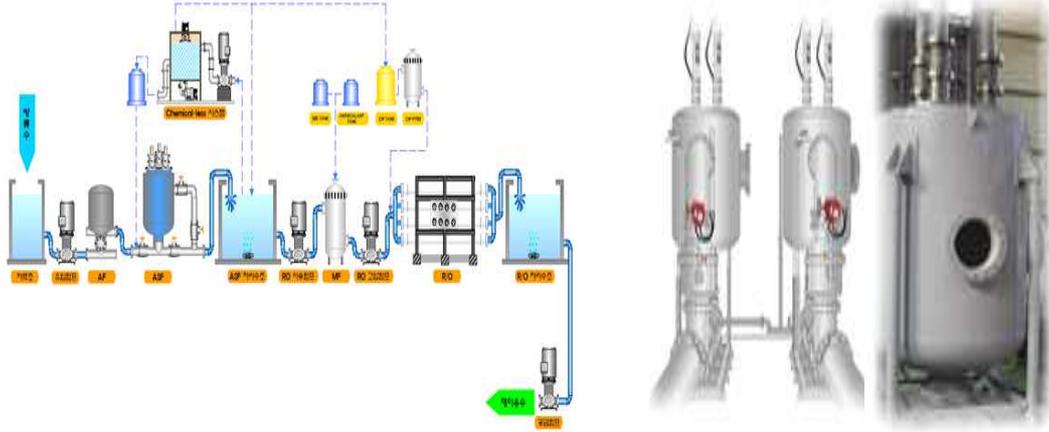
(3) Chemical-less 막 세정 시스템을 장착한 전기 전처리 + 분리막 혼합 공법
 간척지, 하천 및 기수(汽水)를 담수화하여 농업용수 사용을 목적으로 이 공정은 회석 전처리 시스템 + (UF) + (RO) + Chemical-less 시스템으로 구성 되어 있다. 막 공정의 유입수는 비교적 높은 농도의 다양한 오염물이 함유되어 있어 막의 오염 가능성이 높다. 따라서 이러한 막오염을 억제하기 위한 Chemical-less 시스템을 적용하였으며 본 세정공정으로 막의 세정 횟수 폐수발생량을 50 % 이상 줄일 수 있다. 하지만 Chemical-less의 적용으로 막 성능이 증가하였지만 막의 반영구적 사용이 어려워 기존 전처리로 사용하는 MF/UF의 설치 비용 및 운전비용을 감소 할 수 있는 새로운 소재나 공정의 개발이 필요하다.



<Chemical-less 막 세정 시스템을 장착한 분리막 공법>

(4) ASF 전처리 여과기 + 분리막 공법
 ASF (Auto Strainer Filter)는 필터를 교체하지 않고 반영구적으로 사용할 목적으로 스테인리스를 재료로 만든 필터를 말하며 필터망 (mesh) 사이즈와 병렬식 배치를 통해 다양한 용도로 사용된다. 농업용 재이용하기 위한 방법으로 제염을 위한 기수 및 해수 담수화 기술을 적용시 경제적 유지관리측면에서 RO 전처리로 사용되는 MF/UF 막의 수명이 2~3년으로 짧아 막 교체비용 및 약품비용, 폐수량 문제가 야기됨에 따라 내구성 10년 이상 사용 가

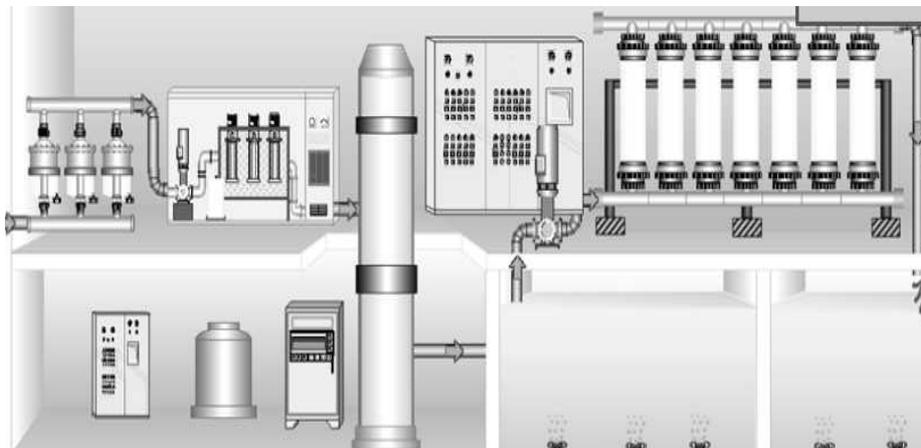
능한 친환경적인 RO 전처리 시스템이 개발로 새로운 하수재이용 기술의 방향을 제시하게 되었다. 본 기술 공정은 다음 그림과 같으며 전처리 희석 멀티 3단 ASF 시스템 + (RO) + Chemical-less 세정 시스템으로 경쟁력 있는 고품질의 농업용수를 제공 할 수 있을 것이다.



<ASF 전처리 여과기 + 분리막 공법>

(5) ZT-타워 전처리 + 분리막 공법

ZT (Zeta Potential)란 물속에 전위를 발생시켜 제타전위를 최소화함으로써 물속의 함유한 유기물의 응집력을 최대화함으로써 이를 부상시켜 제거하는 기술이다. 농업용수 재이용 방법으로 제염을 위한 기수 및 해수 담수화 기술 적용시 경제적 유지관리측면에서 RO 전처리로 사용되는 UF 막의 수명이 2~3년으로 짧아 막 교체비용 야기된다. 따라서 UF 막 대체로 사용이 가능한 ZT 타워 고액 분리전처리 시스템을 새로운 기술 방향으로 제시하게 되었다. 본 기술 공정은 다음 그림과 같으며 극미세버블 + ZT제너레이터 + (RO) 시스템으로 경쟁력 있는 고품질의 농업용수를 제공 할 수 있을 것이다.



<ZT-타워 전처리 + 분리막 공법>

나. 기수담수화 처리공법의 비교

ECRF (전처리+ 분리막 회석브랜딩 공법)는 저에너지 고효율 농업용수 생산에 적합한 공법으로 원수의 염분 농도에 따라 회석 배수를 다르게 하여 운전 하는 방법이고, 침지식 + RO 분리막 공법은 침지식 분리막을 전처리로 사용되는 방법으로 고농의 원수 부유물질에 강하며 막 수명이 길고 앞단의 전전처리가 필요 없으나 초기 시설비용이 매우 비싸 적용하기 어려운 것으로 도출되었다. 외압식 UF+ RO 공법은 설치 시 미관이 양호 하며 세척이 용하고 침지식에 비해 에너지 효율이 우수하나 고농도 부유물질 유입 시 전전처리가 제대로 이루어지지 않으면 운영하기 어려운 것으로 도출되었다.

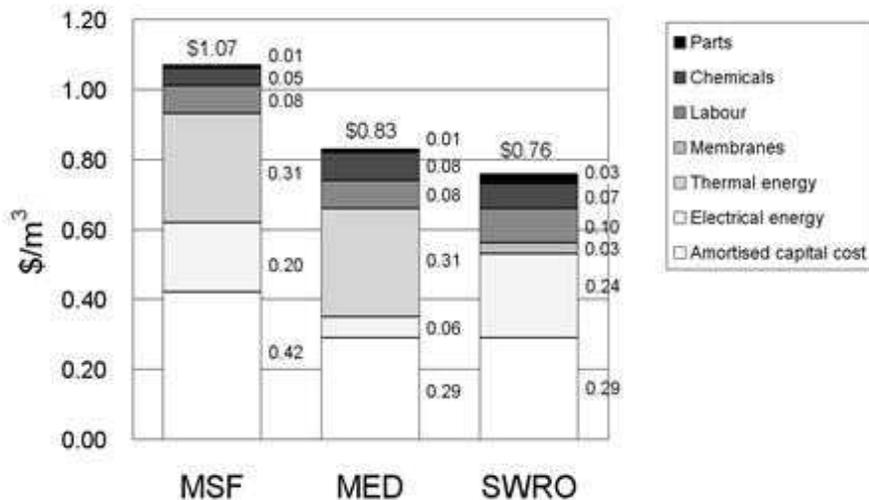
<기수담수화 처리공법 경제성 (염분1,500ppm)>

구 분		ECRF 분리막 혼형 1	침지식UF + RO 분리막 2	외압식 UF + RO 분리막 3
초기투자비 (5,000 톤/day 기준)	기계시공비	3,450,000,000원	4,850,000,000원	3,920,000,000원
유지관리비 (년간)	전력비	32,514,300원	91,253,000원	83,747,273원
	약품비	13,667,435원	19,951,425원	37,264,560원
	소모품비	89,986,667원	206,706,667원	145,040,000원
	계	136,168,402원	317,911,092원	266,051,833원
단가(원) / 톤		76	177	148

세가지 공법을 비교해보면 초기 투자비는 ECRF 분리막 혼형 3,450,000,000 원 침지식 UF + RO 분리막 4,850,000,000 원 외압식 UF + RO 분리막 3,920,000,000 원으로 도출되며, 유지관리비는 전력비, 약품비, 소모품비를 각각 합산한 금액은 ECRF 분리막 혼형 연간 136,168,402 원 , 침지식UF + RO 분리막 외압식 연간 317,911,092 원, 외압식 UF + RO 분리막 266,051,833 원 금액으로 결과를 도출 하였으며 마지막으로 각각 공법의 톤당 단가를 살펴보면 ECRF 분리막 혼형 76 원, 침지식UF + RO 분리막 177 원, 외압식 UF + RO 분리막 148 원으로 도출 되었다

2. 국외 담수화처리 공법

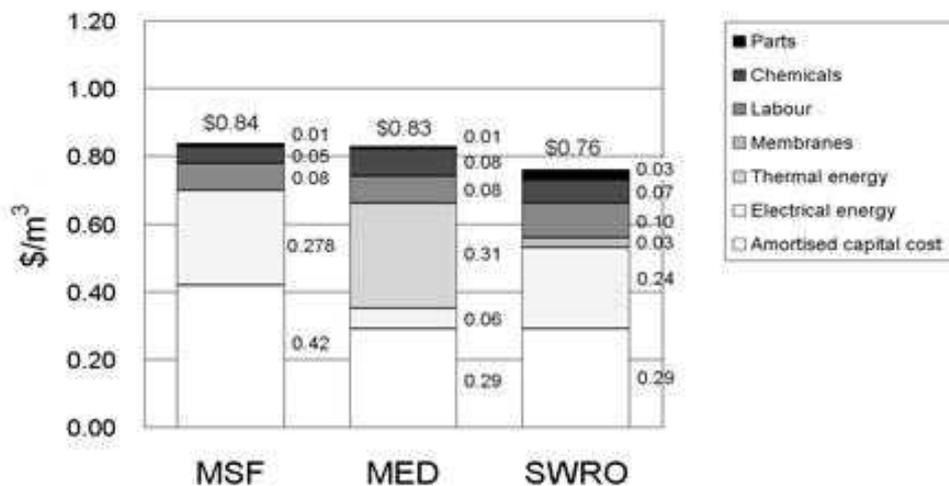
열을 이용하여 담수를 증발시켜 순수한 증기를 응축시키는 방법 (MSF; multi stage flash 과 MED; Multi effect desalination)이 있다. 그리고 역삼투압 원리를 이용하여 다공성 막인 RO (reverse osmosis)막으로 염분을 분리하는 방법이 있다. 물이 부족한 중동에서는 1950년도 열방식 (MSF)를 이용한 담수플랜트가 적용되기 시작하였다. MSF방법의 플랜트가 가장 많이 건설되었고, 안정지속적으로 운전되고 있다. 열을 이용한 담수방법은 단위 담수를 생산하는데 많은 에너지를 소비한다는 단점이 있어 중동의 산유국에서 적용되었다. 최근에는 TVC (thermo vapor compressor)를 적용한 MED방법이 개발되어 에너지 소비량을 많이 줄였다. MED가 에너지 소비량이 적은 것은 구동열원으로 이용한 스팀을 사용하기 때문이다. 1~2세대 전부터 막기술이 개발되어 기술개발이 거듭됨에 따라 담수 단위 톤당 에너지 소비량이 적어 지금은 많은 플랜트에 역삼투압방식이 채택되었다. 역삼투압 방식은 아래 그림에서 보는 것과 같이 생산단가가 적은 반면, 생산수의 수질 (250~300ppm)이 열방식 (MSF, MED)에 의한 생산수 수질 (5ppm)이 좋지 못하다. 또한 역삼투압방식에 의한 플랜트에서는 걸러낼 수 없는 인체에 유해한 성분이 있다. 열방식 담수플랜트의 프로세스에서는 유해물질이 증발되어 대기상태로 방출되므로 수질은 좋아진다. 그래서 RO 플랜트에서 생산된 물은 생활용수로만 사용할 수 있다.



<담수 1 톤 생산단가 비교>

열펌프는 저온의 열원에서 고온으로 열을 끌어올리는 기계이다. 열펌프는 일종의 냉동기이며, 압축기의 동력을 이용하여 저온 열원으로부터 고온의 환경으로 에너지를 전달하는 기계이다. 에너지 소비량을 대폭 줄일 수 있고 절약된 만큼 이산화탄소의 배출을 줄일 수 있어 친환경적인 기계이다. 최근 열펌프에 대한 기술이 많이 개발되어 하수 등의 에너지원을 난방시스템에 적용하는 기술은 상용화/보급되고 있다. 열펌프를 열방식의 담수화 플랜트에 적용하는 것은 기존의 난방에 적용하는 것보다 온도차가 높다는 것이다. 담수화플랜트의 온도(TBT, top brine temperature)는 100~120 °C이다. 난방에 필요한 온도인 50~70 °C보다

약 50 °C 정도 높다. 특히 이 방법은 플랜트에서 버려지는 고온의 폐열(중동의 경우 온도는 40 °C임)을 회수할 수 있다. 폐열에 의한 생태계에 영향을 막을 수 있기 때문에 미활용에너지 이용과 해양생태계보호 1석 2조의 효과를 낼 수 있다. 열펌프는 작은 크기의 열교환기를 적용할 수 있는 MSF가 적합하다. 압축기 용량이 크지 않으므로 대용량의 플랜트에는 적용할 수 없다. MSF는 이젝터로 시스템 내부를 진공으로 유지하고 불응축가스를 제거한다. 진공상태에서는 낮은 온도에서도 염분을 증발시킬 수 있고 증발된 스팀을 시스템 상단에 있는 열교환기에서 응축시키고 응축시 발생하는 열로 물을 예열한다. 그 후 외부 열원으로부터 스팀을 공급받아 원하는 온도로 가열한다. MSF에 열펌프를 적용한 경우 1톤의 담수를 생산하는데 소요되는 비용은 아래 그림과 같다.



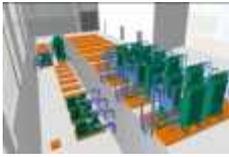
<열펌프 적용 시 담수 1톤 생산단가 비교>

담수 공정에서 전처리 공정이 차지하는 비중은 운영 효율적인 측면에서 매우 큰 역할을 담당하고 있다. 기존 전처리 공정의 경우 일반적인 수처리에 적용되고 있는 혼화응집공정과 여재를 이용한 여과공정을 결합하여 운영되고 있으며, 여과효율을 높이기 위해 여재의 구성을 달리하는 MMF (multi media filter) 방식이 널리 적용되고 있다. 담수 공정에서 현재까지 표준화된 전처리 공정이 규정되어 있지 않다. 이는 수질에 따라 다양한 전처리방법이 적용되고 있으며, 전처리 공정적용효율도 지역 및 경우에 따라 매우 다른 결과를 나타내고 있다. 따라서 전처리 공정은 수질에 따라 다양한 조합이 가능하다. 최근의 수처리 공정의 특징은 고효율 저에너지 집적화 등을 목표로 추구하고 있다. 따라서 기존 여재를 이용한 전처리 공정이하 표준처리 공정의 효율을 향상시킬 수 있는 집적화 등의 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 수처리 공정에 급속도로 적용되는 UF/MF 공정을 활용한 전처리 공정적용방안이 새로운 개념의 담수 전처리 기술로 고려되고 있다. 또한 전처리 공정의 운영결과는 담수의 핵심인 조수기 공정에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 최적화된 공정이 매우 중요하게 고려되어야 한다.

3. 농업용수 공급을 위한 담수화 시설

스페인의 경우 1960년대부터 담수화 시설을 운영하고 있으며, 현재 약 900개소의 담수화 시설을 통하여 음용수, 공업용수, 농업용수 등을 공급하고 있으며 가용수자자원 총량의 2-3%를 차지하고 있다. 스페인은 전체 수자원 수요량 중 농업용수가 75 %를 차지하고 있으며 담수화를 통해 얻어진 총 물량의 22 %가 농업용수로 사용되고 있다.

<관개용수 공급을 위한 담수화 플랜트 예 (스페인)>

담수화시설명	Cuevas de Almazora	Mazarrón	Drenajes	Terciario Alacantí Norte
설치전경				
설치연도	2003	1995	1997	2010
설계용량(m ³ /day)	25,000	13,500	6,000	5,000
설계공정	역삼투법(RO)	역삼투법(RO)	역삼투법(RO)	역전기투석법(EDR)
취수원	지하수	지하수	지표수	2차 하수처리수
원수염도 (salinity)	9,000-18,000 μ S/cm	9,000-20,000 ppm TDS	12,500 μ S/cm	3,500 μ S/cm
생산수염도	<500 μ S/cm	<300 ppm TDS	<250 ppm TDS	<1,000 μ S/cm
전력소모량(kWh/m ³)	1.2	자료없음	1.2	1.55
운영비 (€/m ³)	0.246	자료없음	0.3	0.36

국내의 경우 주로 도서지역 식수해결을 위한 82개소의 해수 담수화 소규모 시설(시설용량 6,333 m³/일, 100 m³/일 미만의 소규모 시설이 약 83 %)이 운영 중에 있으며 국내 석유화학 단지에 공업용수로 이용하기 위한 기수용 담수화 시설은 현대석유화학 등 7개사가 137,420 m³/일 운영하고 있으나 농업용수 공급을 위한 시설은 전무한 실정이다.

제3장 연구수행 내용 및 결과

제1절 원예단지 유형구분 및 수질기준(안)

기수담수화 시스템을 실용화하기 위해서는 실제 시설재배지에 대한 염해 피해사례를 파악하고 고찰할 필요가 있다. 사례분석을 통해서 염해 피해의 원인을 규명하고, 원인을 해결할 수 있는 기수담수화 시스템의 공정설계가 이루어져야 하기 때문이다. 또한, 기수담수화 시스템의 원예단지에의 효과적인 적용을 위해서는 시설재배지의 특성을 반영할 수 있어야 한다. 시설재배지의 영농형태와 목표 관개수질에 따라 기수담수화 시스템의 공정이 달라질 수 있기 때문이다. 시설재배지의 영농형태는 시설재배지의 유형을 구분하기 위한 가장 중요한 요소로 역할을 하며, 목표 관개수질은 작물의 생육에 영향을 미치는 관개용수 수질지침을 고려하여 결정할 수 있다. 따라서 염해 피해사례를 고찰하고, 원예단지의 유형구분을 통해 적정 수질기준(안)을 마련하고자 한다.

1. 고염도 원예단지 농업용수 취수이용 사례

원예단지의 고염도 관개용수 사용에 따른 작물의 발아율 저하, 생육 및 수량감소, 그리고 품질저하 등을 포함하는 피해정도는 육안으로 뚜렷이 구별하기가 어렵다. 또한, 고염도 관개용수 사용에 따른 작물생육에의 영향은 토양 등의 작물 생육환경에의 장기적인 영향의 결과로 발현될 수 있다. 일반적으로는 농지이용이 가장 많은 논벼재배에 염해피해사례가 많이 보고되고 있는 실정이지만 기수역의 간척지 개발과 고소득 농작물의 재배증가로 향후 고염도 관개용수 사용에 따른 시설재배지의 피해사례는 증가할 것으로 예상된다.

가. 섬진강 하구

언론 등을 통해 보고된 시설재배지의 염해 피해 사례는 섬진강 하구 시설재배단지의 예가 대표적이라 할 수 있다. 섬진강 하구의 하동군 목도리와 광양시 진월면과 진상면 지역은 오랜 역사를 가진 시설재배지이며, 우리나라 대표적 양상주 재배지이다. 최근 도시화에 따른 용수부족으로 섬진강 유역에 섬진강댐, 주암댐, 그리고 동복댐 등 대형 다목적댐이 새롭게 건설됨에 따라 섬진강 하류로 유입되는 수량이 크게 감소되어 섬진강 하류에서 만조 시 해수유입 거리가 상류 쪽으로 크게 확대되고 있다. 이에 따라 최근 주변 지하수의 염화가 심화되어 시설재배지 작물에의 피해에 따른 민원이 지속적으로 발생하고 있다.

한국농어민신문 2013년 4월 04일자 “광양 진상면 애호박단지, 염수피해로 몸살”

2013년 3월부터 진상면 청암뜰 시설하우스 단지 내 관정에서 퍼 올린 지하수가 염수에 오염, 모종이 타죽고 작물이 시드는 등 막대한 피해를 보고 있다. 문제는 이 같은 현상이 시간이 갈수록 더욱 심해진다는 것이다. 농가에선 수어천 정비사업 과정에서 바닥을 긁어내고

강폭을 넓히면서 바닷물의 유입이 늘었고, 겨울부터 수자원공사가 관리하는 수어댐의 방류량이 급격히 줄어들면서 바닷물이 지하수까지 오염시킨 것으로 보고 있다. 반면 광명시 등 관련기관에서는 하우스농가의 수막재배가 증가하면서 지하수 사용량이 급격히 늘자 그 빈공간을 바닷물이 침투한 것이 염해의 주원인으로 보고 있다. 피해농가로는 깻잎과 고추 모종 등이 누렇게 죽는 등 전체 작물의 절반 이상이 마른 경우가 보고되고 있으며, 애호박을 재배하는 한 농가는 수확량이 10분에 1로 줄었다고 주장하고 있다.



그림 1.3 염해로 마른 애호박 (광양시민신문, 2013년 4월 27일자)

이밖에도 섬진강 하구의 염해 피해에 따른 후속보도가 다음과 같이 이어지고 있다.

뉴스1 2013년 9월 27일자 “광양시, 청암뜰 피해대책 난항”

한겨레 2013년 10월 1일자 “섬진강 하구 잔물피해 즉각조사하라”

경향신문 2014년 2월 14일자 “광양시, 청암뜰 염수피해 2년 만에 원인 규명 용역추진”

나. 세종시 전의면

농민신문 2012년 7월 2일자 “멀쩡한 나무도 물만 주면 시름시름”

전국 최대 묘목생산단지인 꼽히는 세종시 전의면 영당리 일대가 염해 피해로 호두나무 등의 묘목들이 고사하는 것으로 나타났다. 1999년부터 관정 물을 쓰면서 나무의 싹이 돋지 않고, 1~2년 자란 묘목이 죽어가기 시작했다. 충남도보건환경연구원에 시설재배지의 지하수 분석을 의뢰한 결과 주변 농가의 염소이온농도가 기준치 250 mg/L를 크게 초과하는 396~2,134 mg/L로 나타났다. 지역 농가에 따르면 약 2만 여 평의 묘목포장 중 절반이 피해를 입었으며, 특히 시설하우스의 염해가 심하고 상황이 더 악화되고 있는 것으로 나타났다.

다. 영산강 지구

노컷뉴스 2011년 10월 4일자 “영산강 지구 대규모 농업회사 시범재배 포기”

본 보도에 따르면 영산강 간척지에서 시범재배작물 대부분이 발육불량과 상품성 저하로 사실상 시범재배가 실패한 것으로 드러났다. 영산강지구 251 ha에 한빛들 등 5개 업체가 콩과 밀, 양파와 배추, 무화과 등을 시범 재배했으나 수확량이 기대치의 20%에도 미치지 못한 것으로 나타났다. 동계작물로 파종한 가을배추와 봄배추의 경우 염해로 작황이 불량해 재배를 포기했으며, 6만 그루에 달하는 무화과는 생존율이 10%에 그치는 등 대부분 작물이 사실상 재배에 실패한 것으로 드러났다. 이에 따라 염분제거를 위한 기반시설을 설치하고, 염분에 강한 작물을 선정하는 등 충분한 준비가 필요하다고 지적했다.

영산강 지구의 경우 비록 노지재배에 의한 염해피해 발생사례이긴 하나 장기적으로 첨단 원예단지를 조성하여 고소득 작물을 재배하고자 하는 기본구상을 가진 곳으로 시설재배 시 염해에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

라. 사례분석

염해 피해사례에서 확인할 수 있듯이 다양한 작물을 대상으로 피해사례가 보고되고 있다. 일반적인 채소인 애호박, 양파, 양상추, 그리고 배추에서부터 호두나무 등의 묘목에 까지 염해 피해가 발생했다. 피해사례가 보고된 대부분의 작물들은 관개용수의 허용가능 염도수준이 1.0 dS/m로 낮은 염분에 민감한 작물로 나타났다. 우리나라에서 재배되는 대부분의 채소 작물들은 내염성이 낮은 작물들로 간척지와 간척지외 기수역과 같은 염해우심지역에서 기존의 영농활동으로는 염해피해를 입을 수밖에 없는 구조적 상황에 처해있다. 따라서 관개용수의 재처리를 통해서 관개수 중 염도수준을 현격히 저감시킬 수 있는 수처리 시스템을 도입하여 장기간 대상지역에 관개용수를 공급하거나 양액재배 등 오염된 토양의 영향을 받지 않는 방향으로 영농활동을 개선할 필요가 있다. 또한, 고도처리가 아닌 적절한 수준의 수처리와 함께 대규모 토지개량사업을 실시하여 영농환경을 개선할 수도 있다. 하지만 현실적인 고려를 포함할 경우 경제적인 수처리 시스템을 적용할 수 있는 전자를 염해우심지역의 영농활동으로 채택함이 합리적이다.

피해사례의 대부분은 염분에 노출된 지하수를 관개용수로 사용함으로써 발생하는 피해들로 분석되었다. 염해피해를 초래한 지하수는 오래전부터 관개용수로 사용하던 지하수로써 최근 지하수를 둘러싼 수문환경이 변화함에 따라 지하수가 오염된 것으로 분석된다. 지하수의 관개용수 이용은 2013년을 기준으로 전작용이 약 4.3억 m³, 답작용이 약 12.5억 m³, 그리고 원예용이 약 1.7억 m³으로 전체 농업용수 공급량 159억 m³의 약 12%에 달한다. 농업용 지하수의 오염은 인간 활동에 의해 무작위로 발생할 수 있기 때문에 안전하고 지속가능한 영농활동을 위해서는 이에 대한 대비가 필요하다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 적합한 농업용수 수처리 시스템을 적용하여 경제적인 대비책을 사전에 수립할 필요가 있다.

2. 원예단지 유형구분

원예단지의 농업용수 수질기준(안)을 제안하기 위해서는 원예단지의 유형을 구분을 통해 원예단지의 실태를 보다 체계적으로 파악할 수 있어야 한다. 원예단지의 유형은 원예단지의 영농형태에 의해서 결정되며, 영농형태는 원예단지의 시설과 대상작물, 그리고 관개용수원 등으로 구분할 수 있다. 농업용수의 이수측면에서 중요한 원예단지의 시설은 관개시설을 의미한다. 관개시설은 분수호스, 점적관개, 고랑관개, 일반호스, 스프링클러, 하이미스트 등이 있으며, 일반적으로 분수호스와 점적관개 등의 경우처럼 일정한 관을 이용한 관개시설이 대부분을 차지한다. 관개방법은 고랑관개, 분수관개, 살수관개, 점적관개, 지중관개 등이 있으며 양액재배 등의 확대로 저면관개와 같은 새로운 관개방법이 도입되고 있다. 또한, 원예단지의 원예작물은 일반적으로 채소, 과수, 그리고 화훼작물로 구분할 수 있다. 이와 같은 원예작물의 관개용수원으로 일반적으로 지하수를 관개하고 있으나, 하천수와 호소수를 포함하는 지표수를 이용하는 경우도 많으며, 최근에는 물부족 현상을 반영하여 하수처리수를 적절히 재처리하여 사용하는 경우도 늘어나고 있는 추세이다. 따라서 원예단지를 대상작물과 관개방법, 그리고 관개용수원에 따라 유형을 구분하여 정리할 수 있다.

가. 원예단지 유형구분 기준

(1) 대상작물²⁾

(가) 채소

우리나라 시설원예 산업은 채소 중심으로 발전하였는데, 채소 시설재배 면적을 보면 1970년에는 3,721 ha이었으나, 30년이 지난 2000년에는 90,627 ha로 24배 이상 증가하였다가 그 후 다소 감소하여 2011년에는 68,610 ha로 나타났다. 시설면적이 급격히 증가한 시기는 1975년부터 1980년대 사이로 거의 3배 가까운 증가를 보였는데, 이는 농자재 산업이 발달하면서 농업용 플라스틱 필름의 공급이 원활해지고, 철재 파이프 공급의 확대 및 경제발전에 따른 국민소득의 향상으로 신선채소의 요구가 증가하였기 때문이다. 시설채소 생산량은 1970년에 140천 톤이었으나, 시설재배 면적이 증가하면서 점점 증가하여 1980년에 412천 톤, 1990년에 1,017천 톤으로 백만 톤을 넘어섰으며, 그 후 기술발전에 힘입어 꾸준히 증가하여 2000년에는 3,247천 톤으로 정점에 이르게 된다. 그 후 재배면적의 감소와 함께 생산량도 감소하여 2011년에는 2,808천 톤이 생산되었다. 재배면적은 감소하였으나 생산량이 감소하지 않는 이유는 시설 내 환경조절 시스템 구축에 따른 적절한 환경관리와 작물관리 기술 등이 개발 및 보급되는 등 농자재와 재배기술의 발전으로 단위면적당 생산성이 크게 증가하였기 때문이다.

2) 고관달, 권준국, 이응호, 2013. 1. 우리나라 시설원예산업의 태동과 발전. 한국원예 발달사.

표 1.1 시설채소 재배 현황

구분	시설면적(ha)	재배면적(ha)			생산량(천톤)
		계	시설	터널	
1970	762	3,721	1,289	2,432	140
1980	7,141	17,890	9,228	8,662	412
1990	24,450	39,994	39,994	-	1,017
2000	52,189	90,627	90,627	-	3,247
2010	48,835	66,382	66,382	-	2,741

최근 빈번한 이상기상의 발생으로 채소작물의 안정생산을 위해 시설채소의 재배면적은 크게 줄지 않을 것으로 생각된다. 오히려 소비자의 건강의식 증진에 따른 수요의 지속적인 증가, 재배농가의 규모화, 현대화 및 신기술과 신품종의 도입 등으로 다소 늘어날 것으로 전망된다. 2010년 현재 시설채소 작물별 재배동향을 보면, 수박·딸기 등 과채류 비중이 69.1%로 가장 높으며, 엽채류 19.1%, 조미채소 2.7%, 양채류 2.0%, 근채류 1.5% 순이다.

품목별로는 수박 (21.2%), 딸기(10.3%), 참외(9.2%), 풋고추(8.1%), 토마토(7.9%) 등 5개 품목이 시설채소 재배면적의 절반을 차지하고 있다. 최근에는 품질향상을 위해 상추 등 엽채류의 시설재배 면적이 늘어나는 추세로 상추 재배면적은 4,539 ha (6.8%), 이상기상에 따른 병 발생 등으로 노지에서 배추재배가 어려워지면서 시설배추 재배 면적이 급증하여 3,700 ha (5.6%)에 이르고 있다. 채소작물 중 수출 전략 품목인 딸기, 토마토, 그리고 파프리카 등은 대부분 일본으로 수출하는데, 토마토와 딸기는 일정 재배면적을 유지하고 있으며 파프리카는 조금씩 증가하고 있다. 단위면적당 수량은 오이와 토마토의 경우 2배 정도 증가되었으나, 참외와 수박은 큰 증가를 보이지 않고 있다. 이는 재배단지의 생산방식이 주로 단동형 PE 필름 하우스와 무가온 재배, 조기수확을 위해 정식시기를 앞당겨 재배하는 전진재배를 함으로써 나타난 결과이다.

(나) 화훼

우리나라의 화훼산업은 1950년대까지만 하여도 부자들의 취미원에 수준으로 유지되다가 1960년대 후반에 들어서 남대문 꽃시장이 형성되고 서울 서초동에 꽃마을이 형성되면서 본격적으로 발달하기 시작하였다. 당시에는 화목류와 관상수가 대부분으로 시설재배는 매우 적었을 것으로 추정된다. 서초동 꽃마을과 함께 경남 마산에 국화 생산단지가 형성되어 일장 조절, 가온 등을 위한 목재하우스가 설치된 것으로 알려져 있으나 통계 등 정확한 자료는 없는 실정이다. 이후 화훼 시설재배는 국민 경제의 발전과 더불어 1990년대 들어 매우 빠른 속도로 증가하였다. 2000년대 들어 점차 증가폭이 둔화되었고, 2005년 이후에는 오히려 재배면적이 다소 감소하면서 시설재배면적도 정체되고 있다.

전체 화훼재배면적 중 시설재배가 차지하는 비율은 1995년 61%까지 이르렀으나, 2010년에는 48% 수준으로 감소하였다. 이는 2000년 이후 시설면적의 대부분을 차지하는 절화류와 분화류의 재배가 정체현상을 보이는 가운데, 노지재배가 많은 화목류와 관상수의 재배가 증가한데 기인하는 것으로 분석된다.

2010년 시설재배면적이 가장 많은 곳은 경기도로 1,220 ha로서 전체의 37%를 차지하고, 경남이 그 다음 (451 ha, 14%)이다. 현재 화훼 전체 재배면적 6,829 ha 중 48%인 3,268 ha가 시설재배이며, 그 중 대부분 (3,069 ha, 약 94%)이 비닐하우스다. 분류별로는 절화류와 분화류는 재배면적의 약 90%가 시설재배인 반면, 관상수나 화목류는 5% 내외에 불과하다. 절화와 분화가 상당 기간 정체 또는 감소추세를 이어왔고, 관상수와 화목류 성장세도 주춤하고 있다. 향후 이러한 화훼 시설재배의 동향은 당분간 큰 변동이 없을 것으로 판단된다.

표 1.2 화훼 시설면적 현황

연도	재배면적(ha)	시설면적(ha)			노지포장(ha)
		계(비율, %)	철골온실	비닐하우스	
1986	2,381	764 (32)	17	747	1,617
1990	3,503	1,752 (50)	59	1,693	1,751
1995	4,950	3,023 (61)	134	2,889	1,907
2000	5,890	3,336 (57)	385	2,951	2,554
2005	7,569	3,448 (46)	322	3,126	4,120
2010	6,829	3,268 (48)	199	3,069	3,561

표 1.3 2010 분류별 화훼 시설면적 현황

구분	재배면적(ha)	시설면적(ha)			노지포장(ha)
		계(비율, %)	철골온실	비닐하우스	
절화류	1,975	1,805 (91)	113	1,691	170
분화류	1,250	1,108 (89)	72	1,037	141
초화류	314	164 (52)	7	157	150
관상수류	2,134	83 (4)	3	80	2,052
화목류	1,087	81 (7)	2	79	1,006
종자 (묘, 구)	70	28 (40)	3	25	42
계	6,829	3,268 (48)	199	3,069	3,561

(다) 과수

과수는 시설재배가 쉽지 않아 채소, 화훼에 비해 시설재배 비율이 매우 낮으나, 최근 포도 반축성재배, 감귤류의 축성과 반축성재배가 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 우리나라 과수 시설재배는 1960년대 후반 대전지방의 포도재배를 시작으로 비교적 짧은 기간 동안 크게 발전하여 1991년 453 ha에서 2000년 3,402 ha, 2010년 6,225 ha로 20여 년 동안에 14배나 증가하였다. 초기에는 동해, 서리피해 등 자연재해를 방지하기 위한 수단이었지만 1980년대에 이르러서는 제주도를 중심으로 파인애플과 바나나의 하우스재배가 급격히 증가하였고, 1980년대 후반부터는 감귤의 하우스 재배가 성공하여 가온 및 보온에 의한 숙기조절이

가능해졌다. 1990년대 들어 단경기 생산이 주목적인 복숭아, 단감 등의 조기 출하를 위한 가온재배와 배·비파·금감·참다래·무화과 등의 숙기 촉진과 안정생산을 위한 무가온 재배면적이 크게 증가하였다. 2011년 현재 우리나라 시설과수 재배면적은 6,821 ha로 전체 농작물 시설재배 면적 93,416 ha의 7.3%수준이다. 과종별로는 감귤이 3,390 ha로 전체 과수 시설재배면적의 49.7%로 가장 많고, 다음으로 포도가 2,467 ha이다. 그 외에도 유자, 무화과, 참다래 등 기타과수의 재배면적이 약 1,000 ha 내외로 재배면적이 확대되고 있다.

표 1.4 과수 시설재배면적의 변화

연도	시설재배 면적(ha)				
	합계	감귤	포도	배	기타과수
1991	453	87	204	-	162
2000	3,402	1,623	1,115	64	600
2005	4,937	2,359	1,951	72	555
2008	6,027	3,013	2,009	-	1,005
2010	6,225	3,102	2,242	-	881
2011	6,821	3,390	2,467	-	964

감귤 시설재배는 1980년대부터 시도되었으나, 바나나 하우스재배가 늘어나면서 관심 밖으로 밀려났다가, 1980년대 후반 바나나가 수입되면서 온주밀감 가온재배를 시작으로 1990년대 접어들어 본격적으로 재배면적이 늘어났다. 감귤 시설재배면적은 2000년에는 전체 감귤 재배 면적의 6.1% 수준이었으나, 2010년에는 17.2%로 증가하였다. 감귤의 시설재배는 하우스재배와 비가림재배가 비슷한 수준을 유지하고 있다. 2007년 전체 시설재배 면적 중 하우스 재배 비율은 57.3%이며, 비가림재배 비율은 42.7%이다. 감귤 전체 재배면적은 오렌지와 그 밖의 열대과실 수입으로 조금씩 감소하는 경향이다. 과수 시설재배는 기상재해를 회피할 수 있어서 노지재배에 비해 안정적인 생산을 할 수 있다. 강우를 차단함으로써 우리나라에서 많이 발생하는 병해충을 쉽게 친환경적으로 방제할 수 있을 뿐 아니라, 토양수분을 조절함으로써 당도가 높은 고품질 과실을 단경기에 생산하여 농가소득을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 국제유가의 불안정에 따른 난방비의 상승과 수입 개방에 따른 수입과실의 증가, 소비에 있어서 경쟁관계에 있는 과채류의 생산량 증가 등으로 가격하락도 예상된다. 이러한 여러 가지 장·단점을 감안하여 볼 때 가온재배 면적은 점차 감소될 것으로 예상되며, 비가림재배 혹은 무가온재배를 중심으로 생산비를 낮추고 안전성 높은 고품질 과실을 생산할 수 있는 시설재배 면적은 증가할 것으로 예상된다.

(2) 관개용수

시설재배지의 관개용수의 수질특성은 관개용수의 수원에 따라 달라질 수 있다. 시설재배지의 관개용수 수원은 일반적으로 지표수, 지하수, 그리고 하수처리수 등으로 구분할 수 있다 (FAO, 2013).

(가) 지표수

지표수는 하천이나 호소수를 의미하며, 일반적인 관개용수인 저수지 관개수를 포함한다. 일반적으로 시설재배지 관개용수로 지하수를 사용하고 있으나, 최근 눈에 대규모의 시설재배단지가 들어서면서 기존의 관개시스템을 활용한 영농활동이 크게 증가하고 있다. 관행 관개용수로서 지표수는 우수한 수준의 수질을 보이고 있으며, 지속적인 농업용수의 개발과 관리를 통해 많은 양의 농업용수가 확보된 상태이다. 하지만 인구증가와 도시화에 따른 지표수의 오염은 시설채소와 같은 우수한 수질이 필요한 관개용수로의 이용을 어렵게 하고 있다. 우리나라는 농업용수 공급 목적의 수질기준을 별도로 마련하지 않고 있는 실정이며, 수질환경을 보호하기 위한 측면에서의 환경정책기본법 상 생활환경기준을 준용하도록 법제화되어있다. 따라서 환경정책기본법 상의 수질기준은 작물의 생육과 영농활동을 고려한 수질기준이기보다 하천 및 호소의 수환경을 보호하기 위한 기준이다. 환경정책기본법 상의 수질기준인 T-N과 T-P는 실제 영농환경을 고려하지 못하고 매우 엄격한 수준으로 제안되어 있다.

표 1.5 환경정책기본법 상 생활환경기준의 하천과 호소에 대한 농업용수 수질기준

구분	하천	호소
수소이온농도 (pH)	6.0~8.5	6.0~8.5
생물학적 산소요구량 (BOD) (mg/L)	8 이하	
화학적 산소요구량 (COD) (mg/L)	9 이하	8 이하
총유기탄소량 (TOC) (mg/L)	6 이하	6 이하
부유물질량 (SS) (mg/L)	100 이하	15 이하
용존산소량 (DO) (mg/L)	2.0 이상	2.0 이상
총인 (T-P) (mg/L)	0.3 이하	0.10 이하
총질소 (T-N) (mg/L)	-	1.0 이하
클로로필-a (Chl-a) (mg/L)	-	35 이하
대장균군	-	-

(나) 지하수

시설재배지 관개용수는 시설재배지 인근에 농민이 지하수를 개발하고 사용하는 경우가 대부분이다. 지하수는 일반적으로 다른 용수원에 비해 수질이 우수하고, 안정적으로 시설재배지에 공급할 수 있기 때문에 가장 우수한 시설재배지 관개용수로 평가할 수 있다. 하지만 시설재배지의 증가와 기후 등 영농환경 변화에 따라 지하수 이용량이 크게 증가하고 있으며, 이는 지하수의 고갈과 오염을 야기하여 지속가능한 지하수 이용을 어렵게 하고 있다.

지표수와 마찬가지로 지하수를 농업용수로 사용하는 경우에 대한 농업용수 공급 목적의 수질기준은 마련되어 있지 않다. 지하수를 농업용수로 사용할 경우에는 먹는물관리법 상의 농업용수 수질기준을 준용하도록 되어있다. 지하수의 경우 지표수와 달리 질산성질소와 염소이온 등 실제 농업용수의 수질기준에 중요한 항목을 설정하고 있으며, 그 기준치역시 작물의 생육 등을 고려하여 적용할 수 있는 수준이다.

표 1.6 먹는물관리법 상 지하수의 일반오염물질에 대한 농업용수 수질기준

항목	수소이온농도 (pH)	총대장균군 (균수/100mL)	질산성질소 (mg/L)	염소이온 (mg/L)
기준	6.0-8.5	-	20이하	250이하

(다) 하수처리수

전세계적으로 수자원이 부족하거나 미래의 안전한 수자원이용을 위해 하수처리수를 다양한 용도로 재이용하는 사례가 증가하고 있다. 과거에는 미처리하수를 농업용 등으로 이용하는 사례가 많았으나, 지금은 이용목적에 맞게 재처리하여 사용하는 하수재이용이 증가하는 것이다. 특히, 하수처리수를 계획적으로 직접재이용하는 경우와 더불어, 하수처리장의 증가에 따른 무계획적 간접재이용 사례가 증가하고 있으며, 이는 세계적인 추세이다 (Jeong 등, 2014). 환경부는 2013년부터 하·폐수처리수 재처리수의 농업용수 수질기준을 다음 표와 같이 고시하고, 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우에는 본 수질기준을 준용할 것을 법적으로 강제하고 있다. 지표수나 지하수와 달리 인체위해성에 대한 고려로 대장균과 같은 미생물에 대한 수질기준을 제안하고 있는 것이 특징이며, 지표수의 수환경을 고려한 접근방법과 지하수의 실제 영농활동을 고려한 접근방법이 모두 포함되어 있다. 특히, 전기전도도에 대한 기준을 마련하여 염도가 높은 하수처리수를 지속가능하게 농업용수로 이용하고자 한다.

표 1.7 하·폐수처리수 재처리수의 농업용수 수질기준

구분	기준	
총대장균군수 (균수/100mL)	직접 식용	불검출
	간접 식용	200 이하
결합잔류염소 (mg/L)	-	
탁도 (NTU)	직접 식용	2 이하
	간접 식용	5 이하
부유물질 (SS) (mg/L)	-	
생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/L)	8 이하	
냄새	불쾌하지 않을 것	
색도 (도)	-	
총질소 (T-N) (mg/L)	-	
총인 (T-P) (mg/L)	-	
수소이온농도 (pH)	5.8~8.5	
염화물 (mgCl/L)	-	
전기전도도 (μs/cm)	직접 식용	700 이하
	간접 식용	2000 이하

(3) 관개방법³⁾

시설재배지의 관개방법에는 일반적으로 고랑관개, 분수관개, 살수관개, 점적관개, 지중관개, 그리고 저면관개 등이 있다. 관개방법은 포장 내에서의 관개수 분포의 균등성과 관개강도, 다목적 이용성, 관개시설이용의 편이성과 노동력, 대상작물, 관개시설 설치비용 및 관리비용 등을 검토하여 해당지구의 관개목적과 관리체제에 적합하도록 선정한다.

(가) 고랑관개

시설내의 고랑에 물을 대주어 근근에 수분을 공급하는 관개방법으로 관개한 물은 대부분 아래로 향해 지하로 스며들면서 무효수분이 되기 쉽지만 모세관 현상으로 다시 상승하여 작물에 이용된다. 그러나 고랑과 거리가 먼 이랑의 중앙에는 수분이 도달하지 못하는 경우가 있다. 이 방법은 토양표면이 굳어질 염려가 없고 흙이 튀어 올라 작물을 오염시키는 일이 없으며 관개에 드린 경비가 저렴하고 이용이 간편하다. 그러나 물의 소모가 많고 관개 후 작업이 불편하며 시설내부가 다습해지기 쉽다. 시설 내 바닥의 경사가 관개효율을 제한하는 요인이 되는데 고랑의 경사는 1/100 이하가 적당하다.

(나) 분수관개

일정간격으로 구멍이 나 있는 플라스틱 파이프나 유공튜브 (분수호스)에 압력이 가해진 물을 분출시켜 일정 범위의 표면을 적시는 관개방법으로 일반적으로 다공튜브를 사용한다. 수압에 따라 분출수의 분출각도나 분출거리가 달라지므로 구멍의 방향과 구멍간 거리를 조절하거나 아니면 수압자체를 조절하여 관개가 균일해지도록 한다. 분수관개 시 분출수의 크기 (입자)는 고울수록 토양표면의 입단과괴를 줄여 표면의 굳어짐을 방지할 수 있으므로 작물생육에 이롭다. 대부분 물을 양쪽으로 비스듬히 분출시켜 관개하는데 설치비가 적게 들고 시공도 용이한 편으로 상추, 시금치 등 엽채류의 시설재배에서 많이 이용하고 있다.

(다) 살수관개

일정수압을 가진 물을 송수관으로 보내고 그의 선단에 부착한 각종노즐을 이용하여 다양한 각도와 범위로 물을 뿌리는 방법이다. 고정식과 회전식이 있으며 회전식을 일반적으로는 스프링클러라고 부른다. 이 스프링클러는 높은 수압을 이용하여 특수구조의 노즐을 회전시켜 균일하게 넓은 지역을 관개하는 장치이다. 또한, 살수형의 관개방법 가운데 미스트장치를 이용하는 미스트법이 있다. 강한 수압을 미스트 장치에 가하여 미세한 세무를 만들어 주로 엽상에 관개를 하는데 파종상, 육묘상, 번식상 등에 주로 이용한다. 방법에 따라서는 노즐의 간격, 살수방향, 수압 등을 조절하여 무관개지역, 즉 관개의 사각지대가 생기지 않도록 해야 한다. 이 관개방법은 작물의 엽면이나 지면 일대에 살포할 수 있으므로 자연강우와 비슷한 성격을 띠는데 관개 강도에 따라 지면이 굳어지거나 표토가 유실될 수도 있다.

(라) 점적관개

플라스틱 파이프나 튜브에 미세한 구멍을 뚫거나 그것에 연결된 가느다란 관의 선단 부분에 노즐이나 미세한 수분 배출구를 만들어 물이 방울져 소량씩 스며나오도록하여 관개하는

3) 농림부, 1996. 발경지정리방안과 효율적인 관개방법 개발연구

방법이다. 수분절약형 관개방법으로 시설채소, 분식화훼는 물론 노지의 과수재배에 이르기까지 광범위하게 이용되고 있다. 점적관개는 물을 절약할 수 있는 것 이외에도 토양이 굳어지지 않고 표토의 유실이 없으며 송수관내 유수량이 적어 물의 이동저항이 크지 않아 넓은 면적을 균일하게 관개할 수 있는 장점이 있다. 점적관개장치의 물이 스며나오는 구멍의 크기는 보통 1.5~2.0 mm 이다. 그리고 점적관개에 소요되는 수압은 1.5~2.0 Kg/cm² 이다. 관개량은 튜브의 길이로 조절할 수가 있는데 10 cm길어짐에 따라 유수량이 10% 감소한다.

(마) 지중관개

지중에 매설한 관개 파이프로부터 토양 중으로 물이 스며나와 작물의 근계에 물을 공급하는 방법이다. 지중관개는 토양의 단립화가 잘 이루어지고 유기물이 많아 물의 확산이 빠른 토양에 적용하는 것이 좋다. 지표관개에 비하여 병해발생이 적고 생산성이 높지만 지중급수 파이프로부터 근계까지 수분이 스며 올라오는데 시간이 많이 걸리고 물이 많이 손실된다. 그리고 급수파이프 매설에 노력이 많이 들고 급수공이 막히기 쉽기 때문에 급수관을 그물 튜브로 싸서 매설한다. 지중관개를 하면 물이 옆으로 이동하기가 어려우므로 급수관 바로 밑에 불투수성 필름을 깔기도 한다. 1회 급수량이 극단적으로 적으면 물의 확산이 어려우므로 1 m²당 10~20 L 정도로 충분한 물을 급수한다. 단위면적당 급수량이 많으면 지하로 유실되기 쉬우므로 급수파이프는 가급적 얇게 매설한다.

(바) 저면관개

미세한 종자를 파종한 파종상이나 분화재배에 이용되는 포트에 수분을 공급하고자 하는 경우에 저면에 있는 배수공을 통하여 물이 스며올라가도록 하는 관개방법이다. 이 방식은 기본적으로 수분의 모관상승을 이용하는 것이므로 무엇보다도 토양 (배지)의 물리성이 적합해야 한다. 즉 토양입자가 거칠고 크면 모관상승력이 낮아 포트가 건조해질 수 있으며 반대로 너무 점질이면 통기가 불량해지므로 적당한 물리성이 요구된다. 저면관개에는 보수성이 있는 매트위에 포트를 놓고 이 매트와 수분이 모관상승하여 수분이 공급되도록 하는 방식, 포트의 배수공에 심지를 매달고 이 심지를 포트 밑의 저수조에 잠기도록하여 이를 통해 수분을 공급하는 방식, 벤치에 일정수위의 물을 채웠다 빼기를 주기적으로 반복하는 관개방식인 저면 담배수 (ebb and flow) 관개 등이 있다. 이러한 저면급액 방식은 수분소요량이 각기 다른 여러 가지 크기의 포트가 함께 있을 때 좋은 관개방법이며 또한 관개할 때 잎이 젖어서는 안 되는 식물 등에 매우 좋으나 포트 표층에 염류가 집적되므로 주기적인 검사와 저면관개로서 집적염류를 세척해 주어야 한다.

(사) 관개방법 현황

이남호 등 (1998)은 시설농업에서 사용되고 있는 관개시설을 분수호스, 점적관개, 고랑관개, 일반호스, 스프링클러, 하이미스트의 6개로 분류하여 조사하였다. 가장 많이 이용되는 관개시설은 모니터링 대상지인 남사면에서는 일반호스를 이용한 살수관개, 채운면에서는 분수호스를 이용한 분수관개, 용평면에서는 점적관개 방법이었다. 남사면에서는 화훼를 많이 재배하고 있기 때문에 일반호스가 가장 많이 사용되고 있었다. 용평면에서는 점적관개시설이 가장 많이 사용되고 있었는데 이는 물이 상대적으로 충분치 못한 관계로 물을 절약할 수 있는 방법을 채택한 것으로 조사되었다. 전체적으로 분수관개 (48.8%), 살수관개 (24.0%),

그리고 점적관개 (19.9%) 순으로 많이 사용되었으며, 채소재배를 중심으로 한 시설재배지에서는 분수호스를 이용한 분수관개가 56%로 가장 많았으며, 점적관개가 약 23%, 그리고 일반호스와 스프링클러, 하이미스트를 이용한 살수관개가 약 12%, 고랑관개가 약 9%로 조사되었다. 화훼재배의 경우는 살수관개 (78.5%), 분수관개 (15.5%), 그리고 점적관개 (6.0%) 순서로 많이 사용되고 있었다.

표 1.8 용인지역 시설재배지 관개시설 조사결과 (이남호 등, 1998)

구분	지역별			재배작목별		전체
	남사면	채운면	용평면	채소	화훼	
분수호스	43 (25.9)	185 (86.9)	5 (5.1)	220 (56.0)	13 (15.5)	233 (48.8)
점적관개	44 (26.5)	6 (2.8)	45 (45.9)	90 (22.9)	5 (6.0)	95 (19.9)
고랑관개	3 (1.8)	19 (8.9)	13 (13.3)	35 (8.9)	0 (0.0)	35 (7.3)
일반호스	58 (35.0)	3 (1.4)	23 (23.4)	34 (8.7)	50 (59.5)	84 (17.6)
스프링클러	17 (10.2)	0 (0.0)	12 (12.2)	13 (3.3)	16 (19.0)	29 (6.2)
하이미스트	1 (0.6)	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (0.2)	0 (0.0)	1 (0.2)
합계	166 (100)	213 (100)	98 (100)	393 (100)	81 (100)	477 (100)

또한, 농림축산식품부 (2014) <시설채소 온실현황 및 채소류 생산실적>에서는 시설채소의 온실에서 사용하는 관개시설로 스프링클러, 점적관개, 다공튜브, 분무호스 등으로 구분하여 조사를 실시하였다. 스프링클러는 회전노즐과 분출수에 의하여 반동판에 생기는 충격력으로 회전되면서 물이 살수되는 관개시설이며, 점적관개는 물이 작은 구멍을 통하여 한방울씩 떨어지게 하여 작물에 공급하는 관개시설이다. 또한 다공튜브는 노즐(튜브)에 뚫린 구멍에서 분사되는 물로 관개하는 시설을 의미하고, 분무호스는 노즐에 뚫린 구멍을 통해 분사되는 물로 관개하는 방법이다.

지역에 따라 차이는 있으나 전국단위에서 점적관개가 약 41%, 스프링클러와 분무호스를 이용한 살수관개가 약 36%, 다공튜브를 이용한 분수관개가 약 10%, 그리고 기타가 약 3%를 차지하였다. 이상의 결과로부터 채소를 대상으로 한 시설재배지의 주요한 관개방법이 점적관개와 살수관개, 그리고 분수관개임을 확인할 수 있다.

표 1.9 2013년 전국 관개시설 현황 (농림축산식품부, 2014b)

지역	합계	스프링클러	점적관개	다공튜브	분무호스	인력
전국	51,058	8,770 (17.2)	20,886 (40.9)	5,326 (10.4)	14,668 (28.7)	1,409 (2.8)
서울	137	-	-	-	137 (100.0)	-
부산	674	170 (25.2)	130 (19.3)	108 (16.0)	226 (33.5)	40 (5.9)
대구	920	50 (5.4)	187 (20.3)	374 (40.7)	275 (29.9)	34 (3.7)
인천	283	134 (47.2)	112 (39.5)	4 (1.3)	17 (6.0)	17 (6.0)
광주	753	14 (1.9)	275 (36.5)	247 (32.7)	214 (28.4)	4 (0.5)
대전	173	15 (8.7)	27 (15.6)	1 (0.6)	126 (72.8)	4 (2.3)
울산	279	12 (4.3)	22 (7.9)	87 (31.2)	140 (50.2)	18 (6.5)
경기	6,511	2,083 (32.0)	962 (14.8)	916 (14.1)	2,405 (36.9)	146 (2.2)
강원	2,834	480 (16.9)	2,047 (72.2)	56 (2.0)	163 (5.8)	88 (3.1)
충북	2,331	693 (29.7)	1,174 (50.4)	119 (5.1)	329 (14.1)	16 (0.7)
충남	7,226	1,022 (14.1)	4,005 (55.4)	849 (11.7)	1,283 (17.8)	67 (0.9)
전북	5,275	1,435 (27.2)	2,345 (44.5)	401 (7.6)	800 (15.2)	294 (5.6)
전남	4,621	1,056 (22.9)	2,201 (47.6)	287 (6.2)	755 (16.3)	323 (7.0)
경북	9,289	466 (5.0)	2,944 (31.7)	841 (9.1)	4,825 (51.9)	213 (2.3)
경남	9,439	1,054 (11.2)	4,314 (45.7)	1,006 (10.7)	2,924 (31.0)	142 (1.5)
제주	179	70 (39.1)	72 (40.2)	10 (5.6)	24 (13.4)	3 (1.7)
세종	134	16 (11.9)	70 (52.2)	21 (15.7)	26 (19.4)	2 (1.5)

화훼의 경우 일반적으로 상단관개와 저면관개를 이용하게 되며 상단관개는 스프링클러, 저면관개는 점적관개를 의미한다. 소규모 화훼시설재배지의 경우 분무호스를 이용한 살수관개를 주로 관개방법으로 채택하고 있으며, 대규모 화훼시설재배지의 경우 자동화된 관개시스템의 도입으로 점적관개와 스프링클러를 활용한 상단관개, 그리고 매트 및 저면담배수, 그리고 심지 관개방법 등의 저면관개를 혼용하고 있다.

매트관개법은 국화 분화재배에 좋은 관개방법으로 벤치위에 비닐을 깔 다음 그 위에 친수성인 부직포를 깔고 그 위에 화분을 올려놓고 재배하는 방식이다. 그러나 오래되면 매트 발생하는 이끼류가 모관수의 흐름을 차단하여 관개에 불균형을 초래한다. 또 이동이나 출하시에 매트 속으로 파고 든 뿌리가 절단되어 분화품질을 저하시키므로 내면에 황산구리를 함유한 물질을 발라둔 화분을 사용하여 뿌리가 매트 속으로 들어가지 못하도록 막아야 한다. 저면담배수관개은 상업용 분재배자들이 이용하는 최신 관개방법중의 하나로 벤치에 물을 담수시켜 일정기간 화분 밑구멍으로 흡수시켰다가 다시 배수시키는 방법이다. 이 관개법은 화분의 크기에 관계없이 적절하게 관개할 수 있고 물을 완전히 끊을 수도 있다. 그러나 초기시설비가 많이 들어가며 벤치위의 대형트레이를 설치할 때 정확하게 수평을 잡아야 하며 벤치의 다리를 고정시킬 필요가 있다. 심지관개는 화분밑에 친수성 부직포나 막대기를

꽃고 한쪽 끝을 물통 속에 넣어 모세관 작용을 이용하여 화분 안으로 물을 빨아올리는 방법이다. 매트관개보다 과습상태가 되지는 않으나 심지를 다는 노력이 필요한 결점이 있다. 또한 출하 후 물 관리의 용이성을 고려하여 화분과 물받이 접시를 일체화한 화분도 개발되어 있다.

시설과수의 경우 일반적으로 점적관개와 살수관개의 관개방법을 채택한다. 소규모 시설과수 재배지의 경우, 분무호스를 이용한 살수관개가 이루어지며, 자동화 또는 규모화된 시설과수 재배지의 경우, 점적관개의 형태가 추천되며 재배대상 작물에 따라 스프링클러를 이용한 살수관개가 이루어지는 경우도 많다. 또한, 제주도와 같은 화산회 토양을 모체로 할 경우는 수관 및 주간의 중간 부위에서 살수하는 것이 공중 습도를 줄이고 물이 골고루 퍼지므로 유리하고, 점토질을 모체로 할 경우는 물을 지니는 힘이 강하므로 점적관수 시설을 하여 관개량을 줄이는 것이 유리하다.

나. 원예단지 유형

앞서 논의한 대상작물과 관개용수, 그리고 관개방법에 따른 원예단지의 유형은 다음 표와 같이 분류할 수 있다. 본 연구에서 구분한 원예단지의 유형은 모든 대상작물과 관개용수원에 대해 대표적인 관개방법을 고려하여 36가지로 구분하였다. 본 연구에서 제안한 원예단지 유형은 적용하는 목적에 따라 보다 간소화 하거나 세분화 할 수 있다.

기수담수화 시스템이 적용되는 지역은 간척지와 염해우심지역으로 현재 채소 작물이 주를 이루고 있다. 관개용수로는 지하수가 대부분을 차지하고 있으며, 향후 대규모 시설원예단지 조성에 따른 추가적인 관개용수는 관행 관개용수 또는 간척지 조성에 따른 담수호의 담수를 활용하는 방안이 검토되고 있다. 또한, 시설원예단지가 첨단화됨에 따라 채소 작물은 대부분 점적관개를 포함하는 관개시스템으로 진화하고 있다. 이와 같은 현실을 고려할 때 기수담수화 시스템의 적용을 위한 원예단지 유형분류는 적게는 VS-I, VS-IV, VG-I, VG-IV 등 4가지로 고려할 수 있다.

표 1.10 원예단지 유형분류

구분	대상작물	관개용수	관개방법
	V/F/T	S/G/W	I/II/III/IV
(1) VS- I	채소 (V)	지표수 (S)	점적관개 (I)
(2) VS- II			살수관개 (II)
(3) VS- III			분수관개 (III)
(4) VS- IV			저면관개 (IV)
(5) VG- I		지하수 (G)	점적관개 (I)
(6) VG- II			살수관개 (II)
(7) VG- III			분수관개 (III)
(8) VG- IV			저면관개 (IV)
(9) VW- I		하수처리수 (W)	점적관개 (I)
(10) VW- II			살수관개 (II)
(11) VW- III			분수관개 (III)
(12) VW- IV			저면관개 (IV)
(13) FS- I	화훼 (F)	지표수 (S)	점적관개 (I)
(14) FS- II			살수관개 (II)
(15) FS- III			분수관개 (III)
(16) FS- IV			저면관개 (IV)
(17) FG- I		지하수 (G)	점적관개 (I)
(18) FG- II			살수관개 (II)
(19) FG- III			분수관개 (III)
(20) FG- IV			저면관개 (IV)
(21) FW- I		하수처리수 (W)	점적관개 (I)
(22) FW- II			살수관개 (II)
(23) FW- III			분수관개 (III)
(24) FW- IV			저면관개 (IV)
(25) TS- I	과수 (T)	지표수 (S)	점적관개 (I)
(26) TS- II			살수관개 (II)
(27) TS- III			분수관개 (III)
(28) TS- IV			저면관개 (IV)
(29) TG- I		지하수 (G)	점적관개 (I)
(30) TG- II			살수관개 (II)
(31) TG- III			분수관개 (III)
(32) TG- IV			저면관개 (IV)
(33) TW- I		하수처리수 (W)	점적관개 (I)
(34) TW- II			살수관개 (II)
(35) TW- III			분수관개 (III)
(36) TW- IV			저면관개 (IV)

3. 원예단지 농업용수 수질기준(안)

가. 농업용수 수질조건

(1) 염분

농업용수로서 적합한지를 결정하는 중요한 수질 항목인 염분은 작물의 생육을 저해하거나, 말라 죽게 하는 요소이다 (Grattan 등, 2002). 높은 염분은 토양수분포텐셜을 낮추어 작물이 수분과 영양분을 흡수하기 어렵게 만듦으로써 작물의 생산성을 저하시키기 때문에 1950년대부터 농업용수 수질의 적합성을 판단하는 가장 중요한 항목으로 사용되고 있다 (Beltran, 1999; Bauder 등, 2011). 염분은 전극으로 수질 중 이온의 수준을 간접적으로 측정하여 표현하는 전기전도도 (electric conductivity, EC_w)를 사용하여 주로 표현된다. 염분에 따른 작물피해는 작물의 종류에 따라 다르나 일반적으로 관개수의 EC_w 가 $750 \mu s/cm$ 미만인 경우 염분에 따른 작물생육에 영향을 주지 않으며, $3,000 \mu s/cm$ 을 초과하게 되면 심각한 문제를 발생시켜 농업용수로 부적합하다 (Ayers와 Westcot, 1985).

전기전도도와 가용성 염류에 기초하여 관개용수를 5단계로 구분하면 아래 표와 같다. Ayers와 Westcot (1985)에서와 같이 바람직한 관개용수의 전기전도도 수준은 $750 \mu s/cm$ 이하이며, $750 \mu s/cm$ 를 초과하는 관개용수를 사용할 시에는 적합한 처리가 필요하고, $3,000 \mu s/cm$ 를 초과하는 경우에는 관개용수로 부적합하다.

표 1.11 전기전도도와 가용성 염류에 따른 관개용수 구분 (Scofield, 1936)

관개용수 구분	전기전도도 ($\mu s/cm$) ^a	TDS (ppm)
1등급, 훌륭한 수준	<250	<175
2등급, 우수한 수준	250-750	175-525
3등급, 허용가능한 수준 ^b	750-2,000	525-1,400
4등급, 의심스러운 수준 ^c	2,000-3,000	1,400-2,100
5등급, 부적합한 수준 ^c	>3,000	>2,100

a 25°C에서 측정된 값을 기준으로 함

b 사용을 위해서는 적합한 용탈(leaching)과정이 필요함

c 우수한 배수시스템이 필요하며, 민감한 작물에는 해로운 수준임

관개용수의 전기전도도 수준에 따른 염해수준을 정리하면 아래 표와 같다.

표 1.12 관개용수의 전기전도도 수준에 따른 예상되는 피해 (Hergert와 Knudsen, 1977)

EC _w	염해
<0.75	일반적으로 관개용수의 염도에 따른 피해는 없는 관개용수
0.75-1.50	민감한 작물a에 대해서는 염해를 야기할 수도 있으며, 염분의 토양 내 축적을 사전에 차단하기 위해서는 용탈과정이 필요한 관개용수
1.50-3.0	대부분의 작물에 있어서 염해를 야기하기 때문에 적합한 처리가 필요하며, 용탈시키지 않을 경우 토양 내 염 집적을 야기하는 관개용수
3.0-7.5	투수성 토양에서 내염성 작물b에만 사용할 수 있으며, 매년 토양 내 염 집적을 관찰해야 하는 관개용수

a 상추, 피망, 당근, 양파 등
b 사탕무, 밀, 보리 등

작물의 내염성은 염분을 포함한 토양에서의 작물의 생육 또는 수확량으로부터 평가할 수 있으며, 염분을 포함한 토양과 작물의 수확량은 선형적 관계를 가진다. Mass와 Hoffman은 이와 같은 성질을 이용하여 Mass와 Hoffman 모델을 다음과 같이 제안하였다 (Mass와 Hoffman, 1977).

$$P = 100 - b(EC - a), \text{ with } EC > a \quad (\text{식 1.1})$$

여기서 P는 최적의 조건에서 초대가능 생산량에 대한 농작물의 생산량을 의미하며 %의 단위를 가진다. EC는 뿌리층 (rootzone)에서 채취한 토양의 포화반죽 (saturated paste) 상태에서의 평균 전기전도도를 의미하며 dS/m의 단위를 가진다. a는 임계염도로서 dS/m로 표현되며, b는 염도에 따른 생산량 감소 기울기로 %/dS/m로 표현된다. 주요 작물의 내염성은 다음과 같다.

표 1.13 주요 작물의 내염성 (Mass와 Hoffman, 1977; Mass, 1984)

작물	100% yield		90% yield		75% yield		50% yield		0% yield	
	ECe ⁴⁾	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw
서양호박 (Zucchini)	4.7	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10
사탕무 (Beet, red)	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
브로콜리 (Broccoli)	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
토마토 (Tomato)	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
오이 (Cucumber)	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
시금치 (Spinach)	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10
셀러리 (Celery)	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
배추 (Cabbage)	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
감자 (Potato)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
포도 (Grape)	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
고구마 (Sweet potato)	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
고추 (Pepper)	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
상추 (Lettuce)	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
무 (Radish)	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
양파 (Onion)	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
당근 (Carrot)	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
콩 (Bean)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
딸기 (Strawberry)	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4.0	2.7
순무 (Turnip)	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12	8.0

(2) 치환성 양이온

나트륨, 칼슘, 마그네슘 등 치환성 양이온의 농도는 관개용수 수질에서 중요하다. 소금의 구성 성분인 나트륨은 점토 구조를 파괴하여 토양에 나쁜 영향을 미친다. 토양수의 나트륨 함량이 높으면 알칼리성 토양이 되어 투수성이 감소하며 배수불량을 나타내며, 토양 구조에 나쁜 영향을 미친다. 칼슘 성분이 주요 양이온 농도를 차지하면 토양은 입상구조를 갖게 되기 쉬우며 투수성이 좋아진다.

4) Soil salinity

토양수의 나트륨 이온량의 상태를 나타내는 지표로서 나트륨 흡착비 (sodium adsorption ratio)를 적용하는데, SAR는 다음 값으로 표시된다.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad (\text{식 1.2})$$

여기서, 우변의 이온은 당량농도 (meq/L)이다.

아래 그림은 염도와 나트륨 흡착비에 따른 관개용수의 수질 분류를 나타낸다. 두 항목 모두 작물에 미치는 해가 낮은 것부터 매우 높은 것까지 4단계로 구분하고 있다.

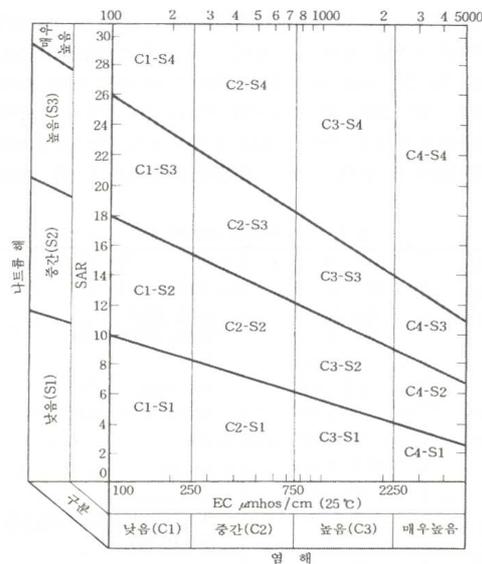


그림 1.4 염도와 나트륨 흡착비에 따른 관개용수의 수질분류

높은 수준의 나트륨 (Na)은 마그네슘 (Mg)와 칼슘 (Ca)의 가용성을 방해하여 잎이 마르는 염해를 유발할 수 있다. 또한, 칼슘과 마그네슘은 토양에서의 양이온 수지에 근본적인 역할을 하며, 나트륨의 작물생육에의 부정적 영향을 약화시키는 역할을 한다. 일반적으로 칼슘과 마그네슘은 관개수 중에서 염분의 해리 과정에 의해 생성된 이온의 형태로 존재하며 경도로써 표현할 수 있다.

(3) 영양물질

질소와 인은 작물 생육에 필수 영양물질로서 그 자체가 유해하지는 않지만 과도한 영양염류는 작물생육에 부정적인 영향을 미친다. 또한, 과도한 영양염류가 물속에 녹아 있을 경우 지하수 오염과 같은 수질오염을 초래할 수 있으며, 호소 및 연안에서와 같은 대규모 수체에서는 부영양화를 초래하므로 우리나라의 경우 호소 수질기준을 차용하여 이수측면에서 농업용수 수질기준에 질소와 인 성분량을 포함하고 있으며, 지하수의 농업용수 수질기준은 질산성질소를 기준으로 20 mg/L 이하로 설정되어 있다.

(4) 유기물

일반적으로 유기물의 지표로 BOD 등을 사용한다. BOD가 높으면 유기물이 분해되는 과정에서 수중의 산소를 소비하여 혐기성 상태를 초래하며, 분해과정에서 Fe^{3+} , Mn^{5+} , SO_4^{2-} 와 같은 토양 내 산화물들이 산소를 소비하여 산소결핍에 따른 토양의 산화환원전위가 낮아지게 된다. 따라서 Fe, Mn, 황화물 등이 생성되고 이러한 물질들이 유기산과 함께 양분흡수를 방해하고 체내대사를 저해하여 결국은 벼의 수확량 감소를 가져올 수 있다 (안윤주 등, 2006). 우리나라의 경우 이수측면에서 BOD를 중점적으로 통제해왔기 때문에 하천과 호소를 기준으로 한 엄격한 수질기준을 가지고 있으나, 일반적으로 시설재배지에 대한 수질기준으로 채택하지 않는 것이 보통이다.

(5) 수소이온농도

pH를 이용한 수소이온농도는 관개용수로서의 적합성을 신속하게 평가하는 근거가 되는 항목으로 일반적인 관개용수의 pH 범위는 6.5~8.4를 갖는다. 이 범위에 속하지 않아도 관개용수로 적합할 수 있으나 작물의 영양상 불균형을 초래하거나 관개용수가 독성 이온을 포함할 수 있다 (Ayers와 Westcot, 1985). 일반적으로 pH와 관련된 가장 큰 피해는 관개시스템에의 부적영향을 들 수 있다. 이례적으로 낮은 pH 수준에서 관개시스템의 부식이 가속화 될 수는 있으며, 높은 알칼리성 관개수는 점적관개시스템에 관개효율을 저하시킬 수 있다 (Bauder 등, 2011). 우리나라의 농업용수 수질기준은 하천과 호소, 그리고 지하수에 대해 6.0~8.5로 설정되어 있다.

(6) 독성원소

황 (S)과 염소 (Cl)은 작물생육에 필수 요소이나 다량이 관개수 중에 포함되면 작물에 직접적인 독성을 야기할 수 있으며, 일반적으로 스프링클러관개 방식 등에 따른 작물이 젖은 상태에서 많이 발생한다. 일반적으로 황은 황산염 (SO_4^{2-})의 형태로 물에 포함되어 있으며, 염소는 염화물의 형태로 관개수에 존재한다. 관개수중 염소농도에 따른 작물의 염소 피해와 염소농도에 대한 농작물의 허용가능한 수준은 다음과 같다.

표 1.14 관개수중 염소농도에 따른 작물의 염소 피해 (Mass, 1990)

염화물 (mg/L)	염소 피해
<70	일반적으로 모든 작물에 대해 안전한 수준
71-140	염소에 민감한 작물이 다소간의 피해가 발생할 수 있는 수준
140-350	염소에 대해 중간정도의 민감도를 가진 작물이 상당한 피해가 발생할 수 있는 수준
>350	심각한 수준

붕소 (B)는 작물생육에 필수요소이지만 매우 낮은 농도에서도 독성을 가질 수 있다. 대개의 경우 붕소는 건조지역의 토양이나 지열이 높은 지역의 관정 등에서 높은 붕소 농도를 나타내며, 지표수에는 용인할 수 있는 수준의 붕소가 함유된 것으로 보고되고 있다 (De

Pascale 등, 2013). 또한, 가정용 합성세제로 인해 하수처리장 방류수의 영향을 받은 관개용수에서 다량의 붕소가 발견되기도 한다. 일반적인 관개용수의 붕소 농도는 0.2~0.5 mg/L로 알려져 있으며, 0.3 mg/L이상의 붕소 농도를 가진 관개용수는 붕소에 민감한 작물에 피해를 유발할 수 있고, 4.0 mg/L을 초과할 경우에는 관개용수로 부적합하다 (De Pascale 등, 2013).

관개수 중 붕소 농도에 따른 피해는 다음 표에 나타낸 바와 같이 일반적으로 0.5 mg/L미만에서는 피해가 발생하지 않으며, 2.0 mg/L을 초과하는 수준의 관개수는 내성작물에만 사용할 수 있다 (Mass, 1999).

표 1.15 농작물의 생산량에 손실이 없는 최대 허용가능한 염소농도 (Mass, 1990)

농작물	최대 염소이온 (Cl ⁻) 농도 (mg/L) ^a
딸기	350
콩	350
양파	350
당근	350
무	350
상추	350
순무	350
고추	525
옥수수	525
감자	525
고구마	525
잠두	525
양배추	525
셀러리	525
시금치	700
오이	875
토마토	875
브로콜리	875
호박 (squash, scallop)	1,050
사탕무	1,400
주키니 (squash, zucchini)	1,575

a 뿌리층에서 샘플링한 포화토양침출액 (saturated-soil extracts)의 염소이온 농도

표 1.16 관개용수의 붕소 농도에 따른 피해 수준 (Mass, 1990)

붕소 농도 (mg/L)	작물피해
<0.5	모든 작물에 적용이 가능함
0.5-1.0	대부분의 작물에 적용이 가능하나, 예민한 작물에는 피해를 유발할 수 있음
1.0-2.0	보통정도 내성 작물에 적용이 가능하나, 예민한 작물은 초세 (plant vigor)가 감소함
>2.0	내성작물에만 적용할 수 있음

붕소에 대해 예민한 정도로 작물을 구분하면 아래 표와 같이 분류할 수 있으며, 예민한 작물에는 포도, 사과, 자두 등 과수가 주로 포함되며, 내성작물로는 양파와 양배추 등 채소 작물이 주를 이룬다.

표 1.17 작물의 관개용수 중 붕소허용기준

구분	예민한 작물	보통정도 내성 작물	내성작물
붕소(B) (mg/L)	1.0	2.0	4.0
작물	피칸, 호우, 사과, 자두, 배, 포도, 체리, 복숭아, 알카도, 그레이프푸루츠	해바라기, 감자, 목화, 토마토, 단팥, 홍당무, 올리브, 보리, 밀, 옥수수, 귀리, 호박, 고추, 고구마	아스파라가스, 야자수, 사탕무, 알팔파, 글라디올로스, 잠두, 양파, 양배추, 상추, 당근
관개수중 붕소 허용농도 (mg/L)	0.3	1.0	2.0

철 (Fe)은 관정과 같은 우물물에서 매우 높은 농도를 보일 수 있다. 호산성 (acid-loving)의 식물은 철이 다량 함유된 관개수를 관개할 경우 생육에 지장을 초래할 수 있다. 또한, 다량의 철 성분은 농작물의 외관상 문제뿐만 아니라 식물조직에 독성을 야기할 수 있으며, 온실 등의 시설에의 피해와 관개시스템의 이미터에 막힘 현상을 초래할 수 있다 (FAO, 2013). 농작물의 생육에는 미량 중금속 등이 필요하나 관개수 중에 포함된 중금속 성분 농도가 높으면, 작물에 해를 미칠 수 있다. 구리 (Cu)는 뿌리 성장을 억제하고, 아연 (Zn)과 비소 (As)는 줄기의 백화현상과 뿌리 성장 억제 등의 부작용을 초래할 수 있으며, 알루미늄 (Al)은 산성 토양에서 생산성 저하를 유발할 수 있다 (Asano 등, 2007). 수은 (Pb), 시안 (CN), 카드뮴 (Cd) 등은 유해독성 중금속으로 토양이나 물에 용해되어 있으면 일정함량 이상에서 작물에 축적되어 인체에 유해한 영향을 줄 수 있기 때문에 엄격한 제한을 하는 것이 보통이다 (Gupta와 Gupta, 1998; 정한석 등, 2013). 이에 따라 FAO의 농업용수 수질지침에는 17개 중금속 항목에 대해 기준을 제안하고 있으며, US EPA (2012)의 경우에도 물 재이용 지침에서 같은 항목에 대한 기준을 마련하고 있다.

표 1.18 관개수 중 미량원소 허용수준

항목	Ayers와 Westcot (1985) (mg/L)	US EPA (2012) (mg/L)
알루미늄 (Al)	5.0	5.0
비소 (As)	0.1	0.1
베릴륨 (Be)	0.1	0.1
카드뮴 (Cd)	0.01	0.01
크롬 (Cr)	0.1	0.1
코발트 (Co)	0.05	0.05
구리 (Cu)	0.2	0.2
불화물 (F)	1.0	1.0
철 (Fe)	5.0	5.0
납 (Pb)	5.0	5.0
리튬 (Li)	2.5	2.5
망간 (Mn)	0.2	0.2
몰리브덴 (Mo)	0.01	0.01
니켈 (Ni)	0.2	0.2
셀렌 (Se)	0.02	0.02
바나듐 (V)	0.1	0.2
아연 (Zn)	2.0	2.0

표 1.19 주요 미량 중금속 요소별 하수재이용 허용농도 (US EPA, 2012)

성분	장기이용 (mg/L)	단기이용 (mg/L)	비 고
알루미늄 (Aluminum)	5.0	20.0	산성 토양에서 생산성 저하를 유발할 수 있다. 하지만 pH 5.5 ~ 8.0 의 토양에서는 이온화를 촉발시키고 독성을 제거한다.
비소 (Arsenic)	0.10	2.0	식물의 종류에 따라 독성을 가지는 범위가 다르다. 수단그래스(Sudan grass)에 대해서는 12 mg/L 이상에서 독성을 가지고, 쌀(rice)에 대해서는 0.05 mg/L 이하에서도 유독하다.
베릴륨 (Beryllium)	0.10	0.5	식물의 종류에 따라 독성을 가지는 범위가 다르다. 케일 (kale)에 대해서는 5 mg/L, 부쉬빈 (bush bean)에 대해서는 0.5 mg/L 이상에서 유독하다.
붕소 (Boron)	0.75	2.0	식물성장의 필수요소이다. 배양액의 붕소 최적 함량은 약 0.1~0.5 mg/L 정도이다. 민감한 식물체에 대해서는 1 mg/L 의 양으로도 독성을 가진다. 일반적으로 재이용수에 포함된 충분한 붕소는 흙의 불충분양을 보완한다. 대부분의 잔디는 2.0~10 mg/L 에서도 비교적 잘 견딘다.

성분	장기이용 (mg/L)	단기이용 (mg/L)	비 고
카드뮴 (Cadmium)	0.01	0.05	콩 (bean), 비트 (beet), 순무 (turnip)에 대해서는 0.1 mg/L 이상에서 유독하다. 지속적인 제한이 필요하다.
크롬 (Chromium)	0.1	1.0	일반적으로 필수 성장요소로 인식되지 않는다. 식물체에 대해 가지는 독성에 대한 정보가 부족하기 때문에 지속적인 제한이 필요하다.
코발트 (Cobalt)	0.05	5.0	토마토에 대해 0.1 mg/L 이상에서 유독하다. 중성 및 알칼리 토양에서 활발하게 활동하지 않는다.
구리 (Copper)	0.2	5.0	몇몇 식물체에 대해 0.1~1.0 mg/L 이상에서 유독하다.
불소 (Fluoride)	1.0	15.0	중성 및 알칼리 토양에서 활동하지 않는다.
철 (Iron)	5.0	20.0	공기가 통하는 토양에서는 식물체에 대해 독성을 가지지 않는다. 하지만 토양의 산성화와 필수 인 및 몰리브덴의 손실을 유발할 수 있다.
납 (Lead)	5.0	10.0	높은 농도에서는 식물체 세포의 성장을 저해할 수 있다.
리튬 (Lithium)	2.5	2.5	대부분의 작물에 대해 5 mg/L 까지는 허용된다; 토양 내부에서 유동적이다. 감귤류 과일(citrus)에 대해서는 유독하다.
망간 (Manganese)	0.2	10.0	산성 토양에서 많은 작물에 대해 약 0.2~2 mg/L (a few-tenths to a few mg/L) 이상에서 유독하다.
몰리브덴 (Molybdenum)	0.01	0.05	토양 및 물에서 일반적인 농도에서는 식물체에 대해 독성을 가지지 않는다. 몰리브덴의 농도가 높은 토양에서 성장한 사료는 가축에게 유독할 수 있다.
니켈 (Nickel)	0.2	2.0	몇몇의 식물체에 대해 0.5~1.0 mg/L 이상에서 유독하다.
셀레늄 (Selenium)	0.02	0.02	낮은 농도에서도 식물체에 대해 유독하며 낮은 농도의 셀레늄이 포함된 토양에서 성장한 사료도 가축에게 유독할 수 있다.
주석 (Tin) 텅스텐 (Tungsten) 티타늄 (Titanium)	-	-	식물체에 의해 효과적으로 제거된다; 허용수준은 알려지지 않았다.
바나듐 (Vanadium)	0.1	1.0	여러 식물체에 대해 상대적으로 낮은 농도에서도 유독하다.
아연 (Zinc)	2.0	10.0	여러 식물체에 대해 각각 다른 범위의 농도에서 유독하다. pH 6 이상에서 독성이 감소되며 세립질 토양 및 유기질 토양에서도 독성이 감소된다.

나. 시설재배지 수질 규범 및 지침

일반적으로 농업용수와 관련한 수질은 규범 (criteria), 지침 (guidelines), 기준 (standards) 등으로 제시된다. 수질규범은 특정 목적에 이용되는 수질이 과학적으로 적합한지 여부를 논의하여 정리한 결과로 특정 항목에 대한 과학적 기준을 의미한다. 수질지침은 일반적으로 갖추어야 할 목표나 지도기준으로 규범을 바탕으로 적절히 관리해야 할 목표로서 제시하는 것을 의미하며 법적으로 구속되지 않는다. 수질기준은 수질지침을 바탕으로 법적으로 충족해야 하는 실제 규제기준으로서 제시한 것이라 할 수 있다. 안전하고 실용적인 수질기준을 제안하기 위해서는 규범을 먼저 마련하고, 규범을 바탕으로 지침이나 법률적 제한을 포함하는 기준을 도입하게 된다. 지금까지 농업용수 수질과 관련해서는 전세계적으로 많은 규범과 지침, 그리고 기준이 제안된 바 있으나, 시설재배지를 특정한 수질 기준 등은 거의 마련되지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제안된 수질 규범과 지침 등을 활용하여, 우리나라 현실을 반영한 수질기준(안)을 제안하고자 한다.

(1) FAO

전세계적으로 농업용수 수질기준과 관련한 기준이 되는 것은 FAO에서 제안한 농업용수 수질기준이다. 최근 FAO에서는 농업용수에 대한 수요가 다방면으로 발생함에 따라 시설재배지에 대한 특별한 관심을 기울이기 시작했다 (FAO, 2013). FAO는 2013년에 시설재배지 채소작물의 농산물우수관리제도 (good agricultural practices)를 위한 보고서를 발간하였으며, 적합한 시설재배지 관개용수 이용을 위한 지침을 포함하였다. FAO (2013)는 안전하고 환경적인 시설재배지 농산물을 생산하기 위한 시설재배지의 관개시스템 설계에 필요한 평가유형별 고려해야 할 수질항목과 초기평가에 적용할 수 있는 수질지침을 제안하였다.

제안된 시설재배지에서의 관개시스템 설계 시 고려사항은 시설재배지의 영농환경을 고려하여 초기영농조건과 시비상황, 그리고 수처리시스템의 계획에 있어서 필요한 물리·화학적 관개수질 항목에 대해 논의하였다. 아래 표는 평가유형을 초기평가, 집약농업, 관비, 그리고 수처리시스템 계획으로 구분하여 평가유형별 고려해야 하는 관개수질 항목을 제안하고 있다. 평가유형에 관계없이 pH, EC, 칼슘, 마그네슘, 나트륨, 염화물, 탄산염과 황산염 등은 필수항목으로 제안하고 있다. 제안된 필수항목은 관개수의 산도와 염도, 그리고 대표적인 독성 성분으로 FAO에서는 산도/염도 및 지표물질 항목으로 규정하고 있다. 질산성 질소, 암모니아성 질소, 인산염, 칼륨, 철, 망간, 구리, 아연, 붕소, 그리고 폴리브텐으로 구성된 다량 및 미량 영양소는 관비와 수처리시스템 계획에 있어서 필수 평가항목이며, 초기평가와 집약농업에 있어서는 일부항목에 대해 선택적으로 적용할 수 있는 것으로 제안하였다. 또한, 기타 독성물질에 대해서는 지역의 영농환경에 따라 선택적으로 모든 평가유형별로 적용할 수 있으며, 수처리시스템을 계획할 경우에는 반드시 부유물질에 관해서 관개용수를 평가해야 한다. 제안된 시설재배지에서의 관개시스템 설계 시 고려사항은 적용 대상지역의 농업환경에 따라서 적절하게 수정하여 사용할 필요가 있다.

표 1.20 시설재배지 관개시스템 설계 시 고려사항 (De Pascale 등, 2013)

항목	초기평가 (Initial assessment)	집약농업 (Intensive farming)	관비 (Fertigation)	수처리시스템 계획
산도/염도				
pH	●	●	●	●
EC	●	●	●	●
지표물질 (Characterizing substances)				
칼슘 Ca	●	●	●	●
마그네슘 Mg	●	●	●	●
나트륨 Na	●	●	●	●
염화물 Cl	●	●	●	●
탄산염 CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻	●	●	●	●
황산염 SO ₄ ⁻	●	●	●	●
다량 및 미량 영양소 (Macro-and micronutrient)				
질산성 질소			●	●
암모니아성 질소			●	●
인산염			●	●
칼륨 (K)			●	●
철 (Fe)	●	●	●	●
망간 (Mn)		●	●	●
구리 (Cu)		●	●	●
아연 (Zn)		●	●	●
붕소 (B)	○	●	●	●
몰리브덴 (Mo)	○	○	○	○
독성물질 (Toxic substances)				
Tensioactives	○	○	○	○
Cd, Cr, Ni, Pb, Hg	○	○	○	○
불화물 (Fluorides)	○	○	○	○
점적관개 막힘현상				
부유물질				●

● always necessary
○ necessary in zones at risk

다음 표는 FAO (2013)에서 제안한 시설재배지에서 관개시스템을 설계하기 위하여 초기평가에서 사용할 수 있는 지침으로 각 항목별 기준과 기준을 초과할 경우에 발생할 수 있는 피해를 제시하고 있다. FAO (2013)에서 제안한 시설재배지의 관개용수 수질 지침은 강우에 의한 자연적인 희석작용을 기대할 수 없기 때문에 노지재배에 비해 보다 엄격한 수질 수준을 요구한다. FAO에서 제안하고 있는 수질항목들은 대부분 토양에 축적되어 작물생육에 영

향을 미치거나, 주요 항목의 경우 작물의 잎 등에 침착되는 등의 부작용을 유발할 수 있다. 또한, pH, Ca, Fe, 그리고 부유물질 등은 관개시스템에 문제를 야기할 수 있으며, 미량원소의 경우 독성으로 작물에 작용할 수 있다. 이밖에도 질산성 질소와 암모니아성 질소, 인산염 및 칼륨 등 관비와 수처리시스템을 설계함에 있어 반드시 필요한 항목의 경우에는 FAO (2013)에서 별도로 제안하고 있지 않기 때문에 지역사회의 농업환경에 적합한 수준을 결정하여 준용할 수 있을 것이다.

표 1.21 시설재배지 관개시스템 설계를 위한 초기평가에 사용할 수 있는 수질지침

항목	한계치		한계치 초과 시 위험 사항			
	시설재배	노지재배	토양축적	노즐막힘	잎 침착	독성
pH*	6.0-8.0	6.0-8.0		●		
EC (<i>dS/m at 20°C</i>)	<0.75	<1.50	●		●	
Ca (<i>mg/L</i>)	<150			●	●	
Mg (<i>mg/L</i>)	<35					
Na (<i>mg/L</i>)	<50	<150	●		●	
Chlorides (<i>mg/L</i>)	<50	<200	●		●	
Carbonates (<i>mg/L</i>)	<250		●	●	●	
Sulphates (<i>mg/L</i>)	<50	<300	●		●	
Fe (<i>mg/L</i>)	<1.0	<3.0		●	●	
Mn (<i>mg/L</i>)	<0.6	<2.0	●		●	●
Cu (<i>mg/L</i>)	<0.3	<1.0	●			●
Zn (<i>mg/L</i>)	<0.3	<3.0	●			●
B (<i>mg/L</i>)	<0.3	<2.0	●			●
Mo (<i>mg/L</i>)	<0.05	<0.05	●			●
Tensioactives (<i>mg/L</i>)	<0.5	<0.5	●			●
Cd (<i>mg/L</i>)	<0.01	<0.01	●			●
Cr (<i>mg/L</i>)	<0.1	<0.1	●			●
Ni (<i>mg/L</i>)	<0.2	<0.2	●			●
Pb (<i>mg/L</i>)	<5.0	<5.0	●			●
Hg (<i>mg/L</i>)	<0.002	<0.002	●			●
Fluorides (<i>mg/L</i>)	<1.0	<1.0	●			●
SS (<i>mg/L</i>)	<30	<30		●	●	

* 기준범위의 상한을 초과할 경우에는 농약과 살균·살충제의 효능을 떨어뜨릴 수 있으며, 하한을 초과할 경우에는 관개시스템의 부식을 야기할 수 있다.

(2) 미국

미국에서도 아직까지 시설재배지에 대한 특별한 수질 지침이나 기준을 마련하고 있지는 않다. 다만, 몇몇 연구를 통해서 시설재배지의 특성을 고려한 수질규범은 제안된 바 있다 (Dole과 Wilkins, 1999). Dole과 Wilkins (1999)은 일종의 ‘바람직한’ 수질규범을 FAO (2013)와 같이 알칼리도와 염도, 그리고 독성 등에 대한 수질항목들을 중심으로 제안하였다.

표 1.22 시설재배지 관개용수의 바람직한 수질규범 (Dole과 Wilkins, 1999)

수질항목	목표수준 (desired level)
EC (<i>dS/m at 20°C</i>)	< 0.5
pH	5.0-7.0
Alkalinity* (<i>mg/L</i>)	40 - 100
Nitrate, NO ₃ (<i>mg/L</i>)	< 5
Ammonium, NH ₄ (<i>mg/L</i>)	< 5
Phosphorous, P (<i>mg/L</i>)	< 5
Potassium, K (<i>mg/L</i>)	< 10
Calcium, Ca (<i>mg/L</i>)	< 120
Sulfates, SO ₄ (<i>mg/L</i>)	< 240
Magnesium, Mg (<i>mg/L</i>)	< 24
Manganese, Mn (<i>mg/L</i>)	< 2
Iron, Fe (<i>mg/L</i>)	< 5
Boron, B (<i>mg/L</i>)	< 0.8
Copper, Cu (<i>mg/L</i>)	< 0.2
Zinc, Zn (<i>mg/L</i>)	< 5
Aluminum, Al (<i>mg/L</i>)	< 5
Molybdenum, Mo (<i>mg/L</i>)	< 0.02
Sodium, Na (<i>mg/L</i>)	< 50
SAR	< 4
Chloride, Cl (<i>mg/L</i>)	< 140
Fluoride, F (<i>mg/L</i>)	< 1

* Expressed as calcium carbonated

Dole과 Wilkins (1999)가 제안한 시설재배지 관개용수의 목표수준은 FAO (2013)에서 제안하지 않은 질산성 질소와 암모니아성 질소, 인산염 및 칼륨 등 관비와 수처리시스템을 설계함에 있어 반드시 필요한 항목에 대한 수질규범을 제시하고 있다. Dole과 Wilkins (1999)에는 미량원소에 대한 수질규범이 제안되지 않았으나, US EPA (2012)의 물재이용 수질지침과 같은 다른 관개용수 수질수준을 차용하여 사용할 수 있을 것이다.

(3) 캐나다

캐나다의 브리티시 콜롬비아주 농림수산물부(BCMAFF)는 다음 표와 같이 시설재배지 수질기준을 제시하고 있다. 브리티시 콜롬비아주 (1996)에서 제안하고 있는 시설재배지 수질기준은 Dole과 Wilkins (1999)와 유사한 수질항목에 대해 거의 비슷한 수질수준을 목표로 하며, EC와 알칼리도, 그리고 몰리브덴 항목에 대해 보다 완화된 수질기준을 갖고 있다. 다만, FAO (2013)에서와 같이 질산성 질소와 암모니아성 질소, 인산염 및 칼륨 등 관비와 수처리시스템을 설계함에 있어 반드시 필요한 항목에 대한 수질규범은 제시하고 있지 않다. 제안된 수질기준을 만족하는 수원의 경우 시설재배지의 관개용수로 적합하며, 제안된 수질기준을 초과하는 경우 상업용 용도의 시설재배지 작물의 재배를 위해서는 별도의 수처리과정이나 영농활동의 특별한 관심이 필요하다.

표 1.23 캐나다 브리티시 콜롬비아주 (British Columbia) 농림수산물부의 시설재배지 관개용수 수질기준 (BC MAFF, 1996)

항목		상한값 (upper limit)	최적범위 (optimum range)
pH			5-7
EC	plugs	0.75 mmhos (500 mg/L)	near zero
	general	1.25 mmhos (800 mg/L)	near zero
SAR		4	0-4
Alkalinity		200 mg/L	0-100 mg/L
Bicarbonate equivalent		150 mg/L*	30-50 mg/L
Calcium		120 mg/L	40-120 mg/L
Magnesium		24 mg/L	6-24 mg/L
Iron		5 mg/L	1-2 mg/L
Manganese		2 mg/L	0.2-0.7 mg/L
Boron		0.8 mg/L	0.2-0.5 mg/L
Zinc		2.0 mg/L	0.1-0.2 mg/L
Copper		0.2 mg/L	0.08-0.15 mg/L
Molybdenum		0.07 mg/L	0.02-0.05 mg/L
Fluoride		1.0 mg/L	0 ^a
Sulfate		240 mg/L	24-240 mg/L
Chloride		140 mg/L	0-50 mg/L
Sodium		50 mg/L	0-30 mg/L

* 중탄산염이 50 mg/L를 상회하는 경우에는 산처리 (acidification)를 통한 수정이 필요하다.

a 특히, 백합과 프리지아와 같이 불소에 민감한 작물에 대해서는 불소가 검출되지 않는 것이 바람직하다

(4) 네덜란드⁵⁾

네덜란드는 간척지가 많고 시설재배가 가장 발달한 나라 중 하나로, 지금까지 다수의 수질 규범과 지침에 대한 연구가 진행된 바 있다. Sonneveld와 Voogt (2009)는 시설재배지 토양의 용탈 (leaching) 정도에 따라 3가지 그룹으로 구분하여, 각 토양조건에 적합한 수질 지침을 제안한 바 있다. 그룹 1은 5% 미만의 용탈이 발생하는 토양조건, 그룹 2는 5~20%의 용탈이 발생하는 토양조건, 그리고 그룹 3은 20%를 초과하는 용탈이 발생하는 토양조건을 각각 의미한다. 그룹 1과 같이 용탈이 거의 발생하지 않는, 다시 말해 배수가 불량한 토양의 경우 매우 엄격한 수준의 수질을 만족하여야 하며, 그룹 2에 해당하는 수질 지침도 FAO (2013) 등 앞서 검토한 수질 규범과 유사하거나 더 엄격한 것으로 조사되었다. 특히, 그룹 1의 수질지침은 양액재배에 적용되는 수질기준과 유사한 수준으로 (농어촌연구원, 2009), 엄격한 수준의 수질이 요구되는 경우에는 그룹 1의 수질지침을 준용할 필요가 있다.

다른 연구 규범 및 지침과 달리 Sonneveld와 Voogt (2009)는 pH의 경우, 탄산염 등을 이용한 영농활동을 통해서 충분히 조절할 수 있는 부분이기 때문에 중요한 수질항목으로 고려하지 않고 있다.

표 1.24 시설재배지 토양조건에 따른 관개용수 수질 지침

항목	단위	그룹 1*	그룹 2*	그룹 3*
EC	<i>dS/m at 20°C</i>	<0.5	<1.0	<1.5
pH		-	-	-
Na	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<0.5 (11.5)	<3.0 (69)	<5.0 (115)
Cl	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<0.5 (17.75)	<3.0 (106.5)	<5.0 (177.5)
Ca	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<1.5 (60)	<2.5 (100)	<3.5 (140)
Mg	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<0.7 (16.8)	<1.25 (30)	<2.0 (48)
SO ₄	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<0.7 (67.2)	<1.25 (120)	<2.0 (192)
HCO ₃	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<5.0 (305)	<7.5 (457.5)	<10.0 (610)
Fe	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<10 (0.56)	-	-
Mn	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<10 (0.55)	-	-
B	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<15 (0.15)	<25 (0.25)	<50 (0.5)
Zn	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<3 (0.195)	<5 (0.325)	<10 (0.65)
Cu	<i>mmol/L (mg/L)</i>	<1 (0.063)	<1.5 (0.0945)	<3 (0.189)

* 그룹 1은 용탈 5% 미만, 그룹 2는 용탈 5-20% 수준, 그룹 3은 용탈 20% 초과를 의미

5) Sonneveld and Voogt, 2009. Plant Nutrition of Greenhouse Crops, Springer.

다. 수질항목별 비교분석 및 필요성 고찰

앞서 살펴 본 FAO (2013), Dole과 Wilkins (1999), BC MAFF (1996), 그리고 Sonneveld와 Voogt (2009)의 시설재배지 관개용수에 대한 수질 규범 및 지침을 비교 분석하여 우리나라 현황에 적합한 수질기준(안)을 제안할 수 있다. Sonneveld와 Voogt (2009)의 경우 그룹 1의 토양조건을 대상으로 한 수질 지침을 기준으로 다른 수질 규범 및 지침과 비교 분석하였다.

(1) 염분

기수역 및 간척지에는 작물생육에 큰 영향을 주는 다량의 염분이 포함되어 있기 때문에 기수역과 간척지 인근에서의 시설재배지 관개용수 이용은 염분에 대한 기준이 필요하다. EC에 대한 수질 규범 및 지침으로는 FAO의 0.75 dS/m 미만, Dole과 Wilkins (1999)의 0.5 dS/m 미만, BC MAFF (1996)의 1.25 dS/m 미만, 그리고 Sonneveld와 Voogt (2009)의 0.50 dS/m 미만이 있다. 일반적으로 0.75 dS/m 미만 염도를 가진 관개용수를 사용했을 경우 작물생육에 부정적인 영향이 없는 것으로 알려지고 있으나, 시설재배지의 경우 자연상태와 달리 강우에 따른 토양내의 염분 세척효과를 기대할 수 없기 때문에 보다 엄격한 기준이 적용되어야 한다. 또한, FAO (2013)의 경우에도 EC가 0에 가까운 값을 보이는 것이 최적의 조건으로 설명하고 있다. 따라서 우리나라의 주요 시설재배지 작물에 대한 장기간의 현장실험 결과가 도출되기 전까지는 Sonneveld와 Voogt (2009)의 수질지침을 준용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

(2) 주요 양이온

칼슘 (Ca)와 마그네슘 (Mg)는 토양에서의 양이온 수지 균형에 근본적인 역할을 수행할 뿐만 아니라 작물생육에 필수 양이온이며, 나트륨해를 완화시키는 역할을 하기 때문에 적절한 수준으로 관리할 필요가 있다. 칼슘과 마그네슘에 대한 수질 규범 및 지침으로는 FAO (2013)가 다소 완화된 수준을 보이는 반면, Sonneveld와 Voogt (2009)는 가장 엄격한 수준을 보이는 것으로 분석되었다. 시설재배지의 시설과 관개시스템에 부정적인 영향을 주지 않는 수준에서 다소 높은 수준의 양이온은 작물생육에 긍정적인 영향을 줄 수 있기 때문에 너무 엄격한 수준의 수질 규범보다는 Dole과 Wilkins (1999)와 BC MAFF (1996)의 수준이 보다 적합할 수 있다. 특히, 두 수질 지침에서는 SAR에 대한 고려도 포함하고 있기 때문에 이를 고려하여, 시설재배가 발달한 네덜란드의 수질 지침인 Sonneveld와 Voogt (2009)를 반영하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(3) 부유물질

관개수중 높은 수준의 부유물질은 관개시스템의 성능저하를 초래할 수 있고, 토양의 수리전도도를 낮추어 지표유출에 따른 토층표면의 오염을 유발할 수 있다 (Vinten 등, 1983; Ragusa 등, 1994). 또한, 많은 바이러스와 박테리아가 미립자와 결합하여 이동하기 때문에 부유물질 제거는 바이러스 제거와 관련이 있다 (US EPA, 2012). 따라서 관개시스템의 성능저하를 초래하거나 직접식용 등과 같이 미생물에 의한 감염의 위험성이 큰 채소를 대상으로 부유물질에 대한 수질기준을 적용할 수 있다.

부유물질에 대한 수질 규범 및 지침으로는 FAO의 SS에 대한 30 mg/L 미만이 있다. Dole과 Wilkins (1999)와 BC MAFF (1996), 그리고 Sonneveld와 Voogt (2009)의 경우에는 별도의 기준을 제안하고 있지 않다. 우리나라의 경우 이수측면의 농업용수 수질기준에서 SS에 대한 수질기준으로 하천은 100 mg/L 이하, 호소는 15 mg/L를 각각 제시하고 있으며, 하수처리수를 농업용수로 재이용할 시에는 탁도를 기준으로 채소와 같은 직접식용을 대상으로 2 NTU 이하를 적용하고 있다. 현재 수질기준의 연속성과 FAO (2013)의 수질 지침을 고려하여 호소에 대한 우리나라의 수질기준인 15 mg/L를 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

표 1.25 시설재배지 수질 규범 및 지침 비교

항목	FAO (2013)	Dole과 Wilkins (1999)	BC MAFF (1996)	Sonneveld와 Voogt (2009) ^a
pH	6.0-8.0	5.0-7.0	5.0-7.0	-
EC (<i>dS/m at 20°C</i>)	<0.75	<0.5	<1.25	<0.5
Ca (<i>mg/L</i>)	<150	<120	<120	<60
Mg (<i>mg/L</i>)	<35	<24	<24	<16.8
Na (<i>mg/L</i>)	<50	<50	<50	<11.5
Chlorides (<i>mg/L</i>)	<50	<140	<140	<17.8
Alkalinity ^b (<i>mg/L</i>)	<250	40-100	<200	-
Sulfates (<i>mg/L</i>)	<50	<240	<240	<67.2
Fe (<i>mg/L</i>)	<1.0	<5	<5	<0.60
Mn (<i>mg/L</i>)	<0.6	<2	<2	<0.60
Cu (<i>mg/L</i>)	<0.3	<0.2	<0.2	<0.06
Zn (<i>mg/L</i>)	<0.3	<5	<2	<0.20
B (<i>mg/L</i>)	<0.3	<0.8	<0.8	<0.15
Mo (<i>mg/L</i>)	<0.05	<0.02	<0.07	-
Tensioactives (<i>mg/L</i>)	<0.5	-	-	-
Cd (<i>mg/L</i>)	<0.01	-	-	-
Cr (<i>mg/L</i>)	<0.1	-	-	-
Ni (<i>mg/L</i>)	<0.2	-	-	-
Pb (<i>mg/L</i>)	<5.0	-	-	-
Hg (<i>mg/L</i>)	<0.002	-	-	-
Fluorides (<i>mg/L</i>)	<1.0	<1	<1	-
SS (<i>mg/L</i>)	<30	-	-	-
Nitrate, NO ₃ (<i>mg/L</i>)	-	<5	-	-
Ammonium, NH ₄ (<i>mg/L</i>)	-	<5	-	-
Phosphorous, P (<i>mg/L</i>)	-	<5	-	-
Potassium, K (<i>mg/L</i>)	-	<10	-	-
SAR	-	<4	<4	-

a 그룹 1에 대한 지침으로 단위환산 과정에서 일부 항목에 대해서는 반올림한 값임

b 탄산염 (carbonates)으로 표현되는 값임

(4) 유기물질

유기물질은 악취나 색변을 통해 심미적인 악영향을 주며, 미생물의 영양공급원으로서의 역할을 하고, 소독과정에 부적영향을 미치는 요인이다 (US EPA, 2012). 하지만 FAO (2013)을 포함하여 유기물에 대한 별도의 수질기준을 마련하고 있는 곳은 없다. 우리나라의 경우 이수측면에서 BOD를 중점적으로 통제해왔기 때문에 엄격한 BOD 수질기준을 가지고 있으나, 시설재배지의 영농활동을 위한 별도의 유기물질에 대한 수질기준은 필요하지 않은 것으로 볼 수 있다. 특히, 직접하수재이용하고 있는 44개 하수처리장 방류수의 BOD 농도는 평균 약 2.6 mg/L를 나타냈으며 (환경부, 2014), 간접하수재이용 관개용수는 약 2.0 mg/L (정한석 등, 2013), 미처리하수가 유입되는 경우에도 2.6 mg/L의 매우 낮은 수준을 유지하고 있는 것으로 조사되었다 (송정현 등, 2014). 상대적으로 가장 심리적 거부감이 큰 관개용수인 하수처리수의 수준을 고려할 때 별도의 시설재배지 유기물질 수질기준을 마련하지 않더라도 수질관리를 위한 수질기준 정책의 실현에 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

(5) 영양염류

영양염류는 비료성분으로 작물생육에 도움을 줄 수 있지만 하수에 포함된 다량의 영양물질은 적절한 관리가 이루어지지 않으면 질소과다 등에 따른 피해를 초래할 수 있다 (Chiou, 2008; Jeong 등, 2014). 또한, 인 (Phosphate)은 관개시스템에서 클로킹 (clogging) 현상을 유발 할 수 있는 박테리아나 조류의 성장을 촉진시킬 수 있다.

영양염류에 대한 수질 규범 및 지침으로는 Dole과 Wilkins (1999)가 질산성 질소와 암모니아성 질소, 그리고 인에 대해 모두 5 mg/L 미만을 제안한 바 있다. 우리나라의 경우 이수측면의 농업용수 수질기준으로서 총질소 1 mg/L, 총인 0.1 mg/L 등의 엄격한 기준이 마련되어 있으며, 지하수의 농업용수 수질기준은 질산성질소를 기준으로 20 mg/L 이하로 설정되어 있다. 저수지를 이용한 관행 관개용수의 경우 평균적으로 T-N은 약 1.1 mg/L, T-P는 약 0.05 mg/L를 나타내 비교적 양호한 수준인 것으로 분석되었다 (송정현 등, 2014). 하수처리장 방류수가 희석된 하천수를 관개하는 간접하수재이용 관개용수의 경우 평균적으로 T-N은 약 3.3 mg/L, T-P는 약 1.6 mg/L로 나타났으며, 미처리하수가 유입된 관개용수의 경우 평균적으로 T-N은 약 14.0 mg/L, T-P는 약 2.8 mg/L로 분석되었다 (정한석 등, 2013; 송정현 등, 2014). 이는 상대적으로 엄격한 수준의 하수재이용 수질기준을 가진 이스라엘과 이탈리아의 수질기준에 적용하여도 크게 우려할 수준은 아니다.

영양염류는 일정수준 이하에서 비료성분으로서의 중요한 역할을 수행할 수 있기 때문에 비점오염원 등의 수질관리측면에서 제안된 현행 하천과 호소를 대상으로 한 수질기준을 농업용수 수질기준으로 사용하기에는 한계가 있다. 또한, 현재 농업용수로 사용되고 있는 관행 관개용수와 하수처리수 등의 수질 수준이 다른 국가들과 비교하여 우려할 정도의 수준은 아닌 것으로 판단된다. 따라서 시설재배지 관개용수 이용을 위한 영양염류에 대한 특별한 기준은 현재로서 필요하지 않은 것으로 판단된다.

(6) 수소이온농도

수소이온농도에 대한 수질 규범 및 지침으로는 pH를 기준으로 FAO는 6.0~8.0, Dole과 Wilkins (1999)는 5.0~7.0, BC MAFF (1996)는 5.0~7.0 등이 있다. 우리나라의 경우, 이수

측면의 하천과 호소, 그리고 지하수를 대상으로 한 농업용수 수질기준은 pH 6.0~8.5로 채택하고 있으며, 하수처리수를 농업용수 재이용할 경우에 대해 pH를 5.8~8.5 범위로 수질기준을 제시하고 있다. Sonneveld와 Voogt (2009)는 pH의 경우, 탄산염 등을 이용한 영농활동을 통해서 충분히 조절할 수 있는 부분이기 때문에 중요한 수질항목으로 고려하지 않고 있다. 따라서 현재 우리나라에서 일반적으로 적용되고 있는 이수측면의 농업용수 수질기준을 적용하여도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

(7) 독성원소 및 미량원소

황과 염소, 그리고 붕소 등의 독성원소는 작물에 직접적인 독성을 야기할 수 있기 때문에 시설재배지 관개용수에서 반드시 고려해야할 주요한 수질항목이다. 황과 염소는 황산염(SO_4^{2-})과 염화물의 형태로 각각 관개수에 존재하기 때문에 본 항목에 대한 규제가 필요하다. FAO (2013)와 Dole과 Wilkins (1999), BC MAFF (1996), 그리고 Sonneveld와 Voogt (2009)는 세 가지 주요 독성원소에 대해 기준을 제안하고 있으며, 그 수준에는 차이가 있다. FAO (2013)와 Sonneveld와 Voogt (2009)은 상대적으로 엄격한 수준을 보이고 있으며, Dole과 Wilkins (1999)와 BC MAFF (1996)는 완화된 수준의 규범을 제안하고 있다. Dole과 Wilkins (1999)와 BC MAFF (1996)가 제시하고 있는 수준은 모든 작물에 대해 안전한 수준은 아니며, 특히 염소나 붕소에 대해 민감한 작물에 대해서는 피해가 발생할 수 있는 높은 수준이다. 따라서 모든 작물에 대해 안전한 수준을 수질 지침을 제안하고 있는 FAO (2013)나 Sonneveld와 Voogt (2009)을 준용하는 것이 바람직하다.

미량원소에 대한 수질 규범 및 지침은 FAO (2013)을 포함하여, Dole과 Wilkins (1999), BC MAFF (1996), 그리고 Sonneveld와 Voogt (2009)이 모두 제안하고 있으며, 규범항목에 대해서는 다소간의 차이가 있다. 모든 수질 규범 및 지침에 대해서 마련되어 있는 미량원소는 철 (Fe), 망간 (Mn), 구리 (Cu), 그리고 아연 (Zn)이다. 미량원소에 대해 배수능이 불량한 토양을 그룹을 대상으로 한 Sonneveld와 Voogt (2009)의 수질 규범이 가장 엄격한 수준이며, 다음으로 FAO (2013), Dole과 Wilkins (1999), BC MAFF (1996) 순으로 나타났다. 또한, FAO (2013)가 가장 많은 항목에 대해서 지침을 제시하고 있다.

미량원소에 대한 우리나라의 농업용수 수질 규범 및 기준은 하수처리수를 농업용수로 이용하는 경우에 대한 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준만이 존재한다. 본 수질기준은 FAO (1985, 2013)나 US EPA (2012)의 수질지침과 비교하여 보다 엄격하며, 상대적으로 엄격한 수준의 하수재이용에 대한 수질기준을 가진 이스라엘 및 이탈리아와 비슷한 수준인 것으로 분석되었으나 다수의 국가에서 수질기준으로 제안하고 있는 불소 (F), 철 (Fe), 그리고 몰리브덴 (Mo)에 대해서는 수질기준이 확립되지 않은 것으로 조사되었다. 불소는 작물에 축적되어 잎과 과실에 피해를 주고 수확량을 감소시키며 (Bustingorri와 Lavado, 2014), 철은 공기가 통하는 토양에서는 일반적으로 식물체에 독성을 가지지 않지만 산성토의 관개된 논에서 필수 인의 손실에 따른 수확량 저감 등의 피해가 큰 것으로 보고되고 있다 (Fageria 등, 1990, Fageria 등, 2002). 또한, 몰리브덴의 농도가 높은 토양에서 성장한 사료 작물은 가축에게 유독할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Welch 등, 1991).

FAO는 철과 아연에 대해 시설재배지에서의 허용가능농도를 일반적인 농업용수의 미량원소 허용가능농도보다 더 엄격하게 제안하고 있다. 따라서 우리나라의 경우에도 하수재이용을 위한 미량원소 기준을 차용할 시, 아연에 대한 보다 엄격한 기준을 마련하는 것이 추천

된다. 작물생육에 영향을 미치는 불소, 철, 그리고 몰리브덴 등과 같은 수질기준이 마련되지 않은 항목에 대해서는 우리나라의 상황을 반영하여 제안할 필요가 있으며, 이를 위한 선행연구가 존재하지 않는 상황에서 다른 국가의 수질기준을 차용할 수 있을 것으로 사료된다. PCB (폴리염화비페닐) 등은 우리나라에서만 규제를 하고 있으나 유해독성 중금속으로 토양이나 물에 용해되어 있으면 인체에 유해한 결과를 초래할 수 있기 때문에 현행 하수재이용 수질기준을 시설재배지 농업용수에도 포함하는 것이 바람직할 것이다.

표 1.26 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준

(단위: mg/L)

알루미늄 (Al)	비소 (As)	총붕소 (B-total)	카드뮴 (Cd)	6가크롬 (Cr ⁶⁺)	코발트 (Co)	구리 (Cu)	납 (Pb)
5 이하	0.05 이하	0.75 이하	0.01 이하	0.05 이하	0.05 이하	0.2 이하	0.1 이하
리튬 (Li)	망간 (Mn)	수은 (Hg)	니켈 (Ni)	셀렌 (Se)	아연 (Zn)	시안 (CN)	폴리클로리네이 티드비페닐 (PCB)
2.5 이하	0.2 이하	0.001 이하	0.2 이하	0.02 이하	2 이하	불검출	불검출

(8) 미생물

일반적으로 농업용수에 필요한 수질항목에는 미생물이 포함되지 않는다. 우리나라의 경우에도 하천과 호소, 그리고 지하수를 대상으로 한 이수측면의 농업용수 수질기준에는 미생물 관련 항목이 포함되지 않는다. 시설재배지 농업용수의 경우에도 FAO를 포함하여 선행연구에서 미생물에 관련된 기준을 제안한 바 없다. 하지만 FAO (2013)에서 언급한 바와 같이 관개용수로 하수 또는 하수처리수가 사용될 수 있으며, 살수관개와 같이 직접적으로 인체에 영향을 미치거나 채소 등의 농작물을 소비하는 과정에서 관개용수의 미생물이 인체에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 또한, 향후 이용가능한 수자원과 농업환경의 변화에 대처하여 하수재이용 등의 영농활동이 시설재배에도 적용될 수 있다. 따라서 시설재배지 농업용수에 대한 수질기준으로 미생물과 관련된 항목을 적용할 필요가 있다.

하수처리수의 농업용수 재이용 수질기준은 크게 미국 캘리포니아주의 보수적인 접근방법과 WHO의 보다 범용적인 접근방법으로 구분할 수 있으며 (Brissaud, 2008), 이는 미생물과 관련된 항목에서 잘 대변된다. 미국 캘리포니아주의 수질기준은 감염에의 위험을 절대적으로 차단하는 것을 원칙으로 정립되어 왔기 때문에 총대장균군수를 기준으로 7일 중간값 2.2 cfu/100mL와 최대 240 cfu/100mL 등의 기준치를 제안하고 있다. 이에 반해 지역별 질병역학적 특성과 경제적 상황을 고려하여 정립된 WHO (2006)의 수질지침은 가장 엄격한 무제한적 관개에 대해서도 *E.coli* 1,000 cfu/100mL를 제안하고 있다. 수질샘플에 총대장균군수보다 *E.coli* 수가 현저하게 적은 점을 감안하면 대장균에 대한 캘리포니아주 수질기준의 엄격함은 WHO보다 단순 수치 이상의 현격한 차이를 보인다고 할 수 있다.

현재 환경부에서 제안하고 있는 하수재이용을 위한 대장균 수질기준은 WHO에 비해 매

우 엄격하게 규제하고 있으며, US EPA가 분변성 대장균을 대상으로 하는 것을 고려할 때 총대장균군수를 대상으로 하는 우리나라가 US EPA보다 더 엄격한 수질기준을 갖고 있다. 하수처리수를 농업용수로 직접하수재이용하고 있는 44개 하수처리장 중 8개 하수처리장의 방류수가 간접식용에 대한 수질기준 총대장균군수 200 MPN/100mL를 초과하였으며, 44개 전체 하수처리장 방류수의 총대장균군수 평균값이 139 MPN/100mL로 나타났다 (환경부, 2014). 따라서 현재의 처리수준과 수질기준으로는 하수처리수를 직접식용을 위한 관개용수로 사용하는 것은 부적절하며, 간접식용을 위해서도 추가적인 수처리가 필요한 것으로 나타났다. 특히, 최대허용기준치를 사용하는 현재의 수질기준과 연평균값을 기반으로 제시하는 환경부 하수처리장 방류수 수질자료를 고려할 때 거의 대부분의 현행 농업용 재이용수가 대장균 수질기준을 초과하는 것으로 볼 수 있다.

간접하수재이용이 이루어지고 있는 관개지구의 관개용수 수질을 분석한 결과 관개기간 동안 총대장균군수가 평균적으로 약 19,000 MPN/100mL이 검출되는 것으로 나타났으며, 상대적으로 좋은 수질로 평가되는 저수지를 관개하는 지역의 경우에도 총대장균군수가 평균적으로 약 15,700 MPN/100mL이 검출되는 것으로 보고되었다 (정한석 등, 2013). 또한, 미처리하수가 관개용수에 영향을 미치는 관개지역의 관개용수 중 총대장균군수는 평균 약 77,000 MPN/100mL에 이르는 것으로 나타났다 (송정현 등, 2014). 논 관개용수를 대상으로 한 정량적 미생물 위해성 평가에서 하수처리수를 관개하는 것이 지하수를 관개하는 것보다 9배 높은 인체위해성 수준을 보였지만 (Jang 등, 2010), 매우 높은 수준의 관개용수 총대장균군수 수질 현황에도 불구하고 우리나라에서는 미처리하수 또는 하수처리수의 논관개용수 사용에 따른 실제적인 인체 피해사례가 보고되고 있지는 않다. 이것은 대상항목인 총대장균군이 일반 자연계에서 쉽게 접할 수 있는 것으로 병원성 미생물에 대한 지표로 이용하기에 한계가 있음을 나타낸다. 높은 수준의 총대장균군수 농도를 보이는 관개용수의 *E.coli* 농도는 저수지 관개용수 13 MPN/100mL 간접하수재이용 관개용수 46 MPN/100mL, 미처리하수의 영향을 받는 관개용수 107 MPN/100mL로 각각 나타났으며, 분변성 대장균의 경우 각각 5000 MPN/100mL, 180 MPN/100mL, 그리고, 633 MPN/100mL, 수준으로 분석되었다 (정한석 등, 2013; 송정현 등, 2014). 저수지를 이용한 관행 관개용수의 경우에도 높은 수준의 분변성 대장균군수를 보임에 따라 대장균에 대한 현실적인 규제가 가능하기 위해서는 WHO와 같이 병원성 미생물을 잘 대변할 수 있는 *E.coli*를 대상으로 한 규제가 필요하다.

채소와 같이 날 것으로 소비되는 작물에 대한 인체위해성 연구가 많이 수행된 바 있으나 정량적 미생물 위해성 평가를 실시한 많은 연구들에서 나타나듯이 위해성평가를 위한 초기 조건 및 실험 설계 방법에 따라 위해성의 수준이 다양하게 나타날 수 있다 (Pettersson 등, 2001; Hamilton 등, 2006). 따라서 보수적인 접근방법을 통해 하수재이용에 대한 대중의 우려 수준을 낮추고 인체위해성을 최대한 차단할 필요가 있다. 이를 위해 보수적인 수질기준을 채택하고 있는 국가들의 수질기준을 고려하여 간접하수재이용 수질기준을 결정하는 것이 바람직하다.

4. 시설재배지 수질기준(안)

수질기준은 과학적 근거를 바탕으로 한 수질지침과 달리 법적 실효성을 가진 실현가능성을 가장 우선적으로 고려해야 한다. 행정적 의미의 수질기준은 일반화된 수질지침으로 생각할 수 있다. 과학적으로 아무리 타당한 수준의 수질이라도 실현가능하지 않은 수준이라면 재고할 필요가 있으며, 행정적 규제의 현실을 감안하여 최대한 일반화된 수준과 형태를 가져야 한다. 따라서 대상작물 및 관개방법, 관개수 등의 조건에 따라 구분한 시설재배지 유형에 따른 각각의 수질기준을 마련하는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이며, 모든 종류의 시설재배지에 일반적으로 적용될 수 있는 수준의 행정적 규제가 마련되어야 한다.

우리나라의 일반적인 수질기준은 최대허용치를 사용함에도 불구하고, 다른 국가들과 비교하여 매우 엄격한 수준의 기준을 적용하고 있다. 엄격한 수준의 최대허용치를 실제 수질기준으로 적용하는 것은 규제의 성격을 가지는 수질기준으로 부적합 것으로 확률개념을 도입하여 현실화할 필요가 있다. WHO (2006)는 산술평균 (arithmetic mean)을 수질지침의 기준으로 하고 있으며, US EPA (2012)의 수질지침은 수질항목에 따라 중간값이나 평균값을 사용하고, 미국 주별 수질기준은 기하학적 평균 (geometric mean)이나 수질샘플 당 초과횟수 등을 기준으로 하고 있다. 또한, 그리스와 이탈리아의 경우에도 수질기준에 확률론적 고려를 접목하고 있다. 수질항목에 따른 모니터링 값은 샘플링이 이루어지는 환경에서의 수문학적 변화에 영향을 크게 받기 때문에 엄격한 수준의 최대허용치를 사용하는 것은 현실을 반영하지 못한 결과이다. 따라서 다른 대부분의 국가에서 실시하고 있는 평균값이나 초과확률을 수질기준에 적용하는 것이 바람직하다.

이상의 논의 결과로부터 제안된 시설재배지의 수질기준 시안은 다음 표와 같다. FAO (2013)을 포함하여 다수의 연구에서 필수 수질항목으로 채택하고 있는 pH, EC, Ca, Mg, Na, 염화물, 황화물, Fe, Mn, Cu, Zn, B에 대해서 우선적으로 고려하였으며, Cd, Cr, Ni, Pb, Co, Li, Mo, CN, PCB 등의 미량원소와 관개시스템에 영향을 줄 수 있는 SS, 그리고 인체위해성을 평가하기 위한 *E.coli* 등을 수질 기준 항목으로 선정하였다. 미량원소 중 FAO (2013)과 우리나라 하수재이용 수질기준에 모두 있는 항목의 경우에는 보다 엄격한 기준을 채택하였으며, 하나의 수질 지침 및 기준에 있는 항목의 경우 그 지침 및 기준의 기준치를 우선적으로 고려하였다.

표 1.27 시설재배지 수질기준(안)

수질항목	기준치
pH	6.0-8.5 ^a
EC ($\mu s/cm$)	$\leq 300^a$
Ca (mg/L)	$\leq 80^a$
Mg (mg/L)	$\leq 20^a$
Na (mg/L)	$\leq 30^a$
염화물 (mg/L)	$\leq 50^a$
황화물 (mg/L)	$\leq 50^a$
Fe (mg/L)	$\leq 1.0^a$
Mn (mg/L)	$\leq 0.2^a$
Cu (mg/L)	$\leq 0.2^a$
Zn (mg/L)	$\leq 0.3^a$
B (mg/L)	$\leq 0.3^a$
Cd (mg/L)	$\leq 0.01^a$
Cr (mg/L)	$\leq 0.05^a$
Ni (mg/L)	$\leq 0.2^a$
Pb (mg/L)	$\leq 0.1^a$
Co (mg/L)	$\leq 0.05^a$
Li (mg/L)	$\leq 2.5^a$
Mo (mg/L)	$\leq 0.05^a$
CN (mg/L)	불검출
폴리클로리네이티드비페닐 (PCB)	불검출
Suspended solids (mg/L)	$\leq 15^a$
<i>E.coli</i> (MPN/100mL)	$\leq 10^b$ (max)

a 수질기준의 적용을 위한 모니터링 기간에 대한 산술평균값이 본 기준을 만족하여야 함

b 80%이상의 수질 샘플이 불검출이어야 함

제2절 기후변화에 따른 원예단지의 농업용수 수요량 산정

원예단지의 농업용수 수요량은 기상조건과 작물, 토양, 관개방법 등에 따라 다르다. 일반적으로 시설재배 용수량은 노지재배방식과는 상당한 차이를 갖는데, 이는 온실 피복재에 의한 강우량이 차단되므로, 작물 필요수량을 전량 관개에 의존하기 때문이다. 또한 온실의 작물 증발산량은 온실피복재로 인하여 태양복사량이 감소하고, 내부 풍속이 거의 없으므로, 노지보다 감소하게 된다 (FAO, 2013). 따라서 시설재배 용수량의 산정에서는 이와 같은 조건을 고려하여야 한다. 본 절에서는 국내외 문헌을 중심으로 시설재배용수의 필요수량을 산정하고, 실제 사용량 등의 사례를 조사, 분석하도록 한다. 또한, 문헌에서 제안된 방법들로부터 시설재배지 관개용수량 산정방법을 새롭게 제안하고, 시범적용지역을 대상으로 대상작물에 대한 시설재배지 관개용수량을 산정하였다.

1. 시설재배 작물의 농업용수량 산정

가. 시설재배 작물의 증발산량

(1) 국내외 연구결과

온실재배의 증발산량은 노지재배보다 작은 값으로 보고되고 있다. Orgaz 등 (2005)은 건조지역에서 시설재배는 증발산에 의한 물소비량을 줄이는 목적으로 적용하고 있다고 보고하였다. 비닐온실에서는 장과 복사량을 차단하고, 온실 내 풍속을 감소시켜 증발산량을 줄여주기 때문에 수분 손실을 최소화하는 기능을 갖기 때문이다.

Mears (1990)은 온실재배와 관련하여 다음과 같이 논의하였다. 온실은 추운 기후에서 따뜻한 환경을 제공하는 데 필요하다고 알려지고 있으나, 적절한 냉각 시스템을 갖추면 매우 더운 조건에서도 작물생육조건을 개선하는 재배방법이 될 수 있다. 건조한 조건에서도 현대적 기술을 채택하면 고부가 가치 식물의 생산이 가능하게 할 수 있다. 시설재배는 단위 물소비량에 대한 식물 생산량을 크게 증가시킬 수 있는 잠재적 편익을 가지고 있는 데, 이는 수자원의 부족을 겪는 곳에서는 중요하다고 하였다. Fernandez 등 (2003)은 노지재배에 비하여 온실재배의 증발산량은 60~85 % 정도로 감소하고, 높은 관개효율로 인하여 온실재배 농법은 노지재배보다 물수요량을 줄일 수 있다고 하였다. Stanghellini (1993)은 온실재배의 증발산량은 노지의 70 %정도로서 물 사용효율을 높일 수 있다고 하였다. 특히 온실재배의 관개효율을 높이는 것이 상대적으로 쉽기 때문에 물 사용효율을 높인다고 알려져 있다 (Jolliet, 1999). Baille 등 (2001)은 온실 유리에 흰색 페인트를 칠하여 태양복사열의 50 %를 감소시킬 수 있다고 하였다. 온실의 복사량의 감소는 기온, 상대습도 등과 같은 미세기상인자를 간접적으로 조절할 수 있었다. 한편 Orgaz 등 (2004)는 온실재배 메론과 수박의 작물계수 K_c 를 결정하는 실험을 하였으며, 그 결과 노지조건과 거의 같은 값을 얻었다고 보고하였다. Mpusia (2006)은 케냐의 온실에서 장미의 일별 증발산량을 측정하였으며, 그 값은 노지의 65 %로 나타났다. 이는 비닐 피복재에 의한 태양복사량의 차단, 온실내의 낮은 풍속과 높은 상대습도에 기인하는 것으로 조사되었다. 토마토의 온실재배에서 점적관개를 실시하고, 증발산량을 측정된 결과 Penman-Monteith 식으로부터 추정된 잠재증발산량의 75 % 정도의 값을 나타냈다 (Harmanto 등, 2004).

한편, FAO (2013)의 지중해 지방의 채소작물 온실재배 관개방법에 대한 보고서에서는 고추, 토마토, 메론, 수박 등의 증발산량을 제시하였다. 특히 노지재배의 증발산량과 비교하여 온실재배에서는 60 % 정도로 훨씬 작은 값이었으며, 이는 온실 내 태양복사량이 40 %정도 작고, 풍속이 0.1~0.3 m/s로 거의 없기 때문으로 분석하였다. 또한 지중해 지방의 온실재배에서 적용되는 모래 멀칭으로 인한 토양면 증발량의 감소로 작물 소비수량이 더 낮은 것으로 보고하였다. FAO (2013)은 지중해 온실재배 작물의 작물계수 K_c 를 제안하였으며, 고추, 토마토는 생육초기는 0.2, 최대값 1.3, 오이는 각각 0.2, 1.2, 메론은 0.2, 1.1를 보였다. 스페인 알메리아 지역 증발산량 자료로부터 온실채소재배의 작물계수 K_c 를 다음 표에서와 같이 제안하였다. 또한 온실재배의 경우 채소작물의 파종시기와 생육기간 등은 시장 상황에 따라 변동하므로, 노지재배의 작물계수를 일률적으로 적용할 수 없다고 하였다. 따라서 온실재배의 잠재증발산량 추정에서 Penman-Monteith 식보다는 간편한 관계식을 적용하는 것이 유리하다고 제안하였다. 스페인의 온실재배 관개용수량을 보고하였으며, 고추의 경우 재배시기가 가을-겨울에는 311 mm, 메론은 177 mm, 수박은 189 mm 등으로 보고하였다.

표 2.1 스페인 알메리아의 온실재배 채소의 작물계수(K_c)

작물별	초기 K_c	최대 K_c	최종 K_c
고추	0.2	1.3	0.9
토마토	0.2	1.4	1.0
메론	0.2	1.3	1.1
오이	0.2	1.2	-
가지	0.2	1.2	0.9
겉질 콩	0.2	1.4	1.2

국내의 온실재배 증발산량에 대한 조사 연구결과는 엄기철 등 (2012)의 고추, 엄기철 등 (2010)의 봄배추, 정필균 등 (2010)의 가을배추 등이 있다. 고추의 잠재증발산량은 일평균 2.3 mm로 보고하였다. 한편, 이광야와 김선주 (2001)의 농업용수 수요량 산정시스템개발, 농어촌연구원 (2009)의 새만금지역 용수활용방안연구 (원예 및 축산용수 공급방안), 장정렬 등 (2014)의 새만금 간척지구 농업용수 수요량 산정연구 결과 등이 발표된 바 있다.

(2) 1.2. 잠재증발산량 추정방법

온실재배의 채소, 화훼작물의 잠재증발산량 추정방법은 Penman-Monteith식 (FAO, 1998), 증발계증발량법 (Fernandez 등, 2010), Hargreaves 식 (Fernandez 등, 2010), Almeria 복사량 관계식 (Bonachela 등, 2006) 등이 있다 (FAO, 2013). 여기서 Penman-Monteith식은 앞 절의 FAO 잠재증발량식과 같다. Fernandez 등 (2010)은 온실재배 작물의 잠재증발량은 FAO (1977)의 증발계 증발량을 활용하여 다음과 같이 추정하였다.

$$ET_o = K_p \times E_{pan} \quad (\text{식 2.1})$$

여기서, ET_o 는 증발산량 (mm/day), K_p 는 증발계수 (0.79), E_{pan} 는 증발계 증발량 (mm/day)이다.

Hargreaves식은 다음과 같다.

$$ET_o = 0.0023R_a\tau(T_{\max} - T_{\min})^{1/2} \times (T+17.8) \text{ (식 2.2)}$$

여기서, R_a 는 외계 복사량 (mm/day), τ 는 온실 내외부의 태양복사량 비율, T, T_{\max}, T_{\min} 는 평균, 일 최대, 최저 온실내 온도 (°C)이다.

Bonachela 등 (2006)은 잠재증발산량을 복사량의 함수로 제안하였으며, 다음 식과 같다.

$$ET_o = (0.288 + 0.0019 \cdot JD)R_o\tau \quad (\text{Julian days } JD \leq 220) \quad \text{(식 2.3)}$$

$$ET_o = (1.339 - 0.00288 \cdot JD)R_o\tau \quad (JD > 220) \quad \text{(식 2.4)}$$

한편, FAO (1998)의 Penman-Monteith식은 작물의 잠재증발산량 추정에 널리 이용되고 있다. FAO (1998)는 (식 2.7)이 건조기후나 습윤기후 조건에서 적용 가능하다고 하였으며, 공기동력학적 저항을 295 s/m로 하였을 때 비닐 온실내의 잠재증발산량 추정이 타당하다고 하였다. 여기서 Penman-Monteith식의 미세기상자료는 온실내의 값을 적용하였다 (Fernandez 등, 2010). 온실내 기상자료를 적용하는 방식은 실측자료가 부족한 까닭에 스페인에서는 Almeria 식을 이용한 증발산량 산정 프로그램을 활용하고 있다고 보고하였다. 그런데 Almeria 식이 개발된 지역 이외에서 적용가능한지는 자료가 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 온실외의 기상자료를 이용하여 Penman-Monteith식으로부터 잠재증발산량을 산정하고, 온실과 노지재배의 증발산량 차이를 온실재배계수 (coefficient for greenhouse crops)를 고려하여 다음 식으로부터 추정하도록 하였다.

$$ET_c = K_c \times K_{gc} \times ET_o \quad \text{(식 2.5)}$$

여기서, K_{gc} 는 온실재배계수이며 노지재배와 온실재배의 증발산량 비율 (=0.65~0.85), ET_o 는 FAO Penman-Monteith로부터 산정한 잠재증발산량이다.

나. 시설재배 농업용수량 구성요소

일반적으로 발작물의 농업용수량은 작물의 증발산량과 지하 침투량, 유효수량, 관개효율 등으로부터 결정할 수 있다. 증발산량은 작물의 생육시기별로 토양면 증발량과 작물의 증산량의 합을 말한다. 지하 침투량은 유효 토심이하로 물이 배수되어 작물이 이용할 수 없는 양이다. 유효수량은 강수량 중 작물 생육에 직접 활용하는 수량이다. 이들 요소들의 관계로부터 필요수량을 결정하고, 총 관개수량은 관개효율을 고려하여 결정한다.

시설재배 채소의 관개수량은 유효수량을 고려하지 않는다. 따라서 필요수량은 증발산량과 지하침투량, 작물재배관리에 필요한 수량 등을 고려하여 결정할 수 있다. 필요수량은 작물 재배에 필요한 수량으로 이를 순용수량이라 한다. 관개지구에 필요한 총용수량은 순용수량과 도수효율 및 관개효율을 고려한 수량으로 정의된다.

- 필요수량 = 증발산량 + 재배관리용수량 + 지하침투량
- 조용수량 = 순용수량 + 도수 및 관개효율을 고려한 수량

Wang 등 (2009)은 점적관개 시 일반적으로 지하침투량을 무시할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 향후 일반 및 첨단원예단지에 일반적으로 적용되는 점적관개 또는 양액재배 형태를 고려하여 지하침투량이 없는 것으로 가정하였다. 조용수량은 필요수량에 관개효율을 적용하여 다음과 같이 정의하기도 한다.

- 조용수량 = 필요수량 / 관개효율

시설재배 채소작물의 관개수량의 구성요소는 다음과 같다.

(1) 증발산량

작물의 증발산량은 기상조건과 작물의 종류, 생육시기에 따라 다르다. 실제 증발산량은 기상조건에 따른 잠재증발산량을 기초로 작물의 생육조건에 따른 작물계수를 곱하여 산정한다. 잠재증발산량 (potential evapotranspiration)이란 목초와 같이 밀생하는 기준작물 (reference crop)이 토양수분이 충분한 조건에서 식물의 증발산량과 토양면 증발량의 합으로 정의된다. 증발산량은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (\text{식 2.6})$$

여기서, ET_c 는 작물의 증발산량, ET_o 는 잠재증발산량, K_c 는 작물계수이며, 작물계수 (crop coefficient)는 작물의 실제 증발산량의 잠재증발산량에 대한 비로 정의한다.

(2) 잠재증발산량

채소 등 발작물의 잠재증발산량은 FAO Penman-Monteith 식으로부터 추정할 수 있다.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{식 2.7})$$

여기서, ET_o : 기준 작물의 증발산량 (mm/day), R_n : 작물 표면에서 실제 복사량 (MJ/m²/day), G : 토양 열유동량 (MJ/m²/day), T : 지상 2m 높이에서의 기온(°C), u_2 : 지상 2m 높이에서의 풍속(m/s), e_s : 포화수증기압 (kPa), e_a : 실제 수증기압 (kPa), $e_s - e_a$: 포화수증기압 차이 (kPa), Δ : 대기온도에서 포화수증기압 곡선의 기울기 (kPa/°C), γ : 습도계수 (kPa/°C) 이다.

(3) 작물계수

작물계수 K_c 는 실제증발산량의 알팔파와 같은 목초의 잠재증발산량에 대한 비(무차원)이다. 작물계수는 작물의 종류, 생육시기, 기후조건, 토양증발량 등에 따라 변화한다. 이들 인자의 영향을 정리하면 다음과 같다.

(가) 작물의 종류

작물이 충분히 성장한 상태에서 토양수분이 충분한 경우 실제증발산량은 잠재증발산량과 차이가 있는데, 그 이유는 작물의 초장, 공기동력학적 성질, 엽면과 그 기공의 특징에 따라 변화하기 때문이다. 일반적으로 작물의 줄 간격이 좁을수록, 차관이 높을수록, 조도상태 변화가 클수록 작물계수가 1.0보다 큰 값을 보인다. K_c 의 값은 기준 초본보다 5~10 % 정도 큰 값을 나타내며, 옥수수, 수수, 사탕수수 등은 15~20 % 이상을 나타내기도 한다.

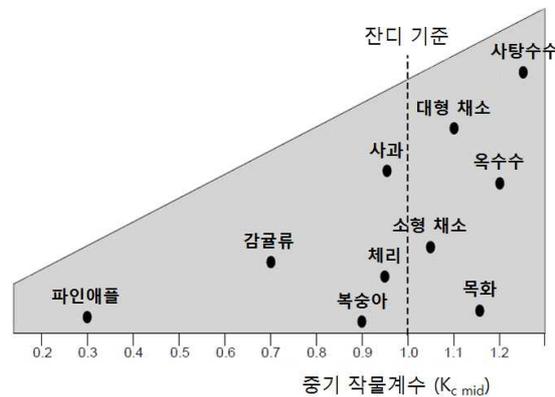


그림 2.1 작물에 따른 중기 작물계수 (FAO, 1998)

(나) 기후조건

K_c 는 상대습도가 45 % 정도의 반 습윤 (semi-humid) 지역에서 평균 풍속이 2 m/s 이하의 조건에서 정의된 값이다. 풍속의 변화는 작물의 공기동력학적 저항을 변화시키므로 기준 초본보다 초장이 긴 작물의 경우 작물계수도 영향을 받게 된다. 농작물의 공기동력학적 특성은 초본의 경우와 다르므로 특정 작물에 따라 다르며, 동일한 작물의 경우도 초장 등 생육상태와 기상조건에 따라 변화한다. 충분히 자란 농작물의 공기동력학적 특성은 기준 초목과 비교하여 더 큰 값을 나타내며 따라서 작물계수는 풍속이 클수록, 상대습도가 낮을수록 K_c 값이 크다. 한편 습윤기후조건에서 풍속이 작으면 K_c 값은 작아진다. 그밖에도 K_c 는 수증기압의 영향도 받게 된다.

(다) 토양면 증발량

작물계수는 기준 초본과의 차이를 나타내므로, 농지와 초지의 토양면 증발량의 차이도 내부적으로 고려하게 된다. 농작물이 충분히 성장한 상태에서는 토양면 증발량은 작물의 증산량보다 작은 값으로 작물계수에 미치는 영향이 작다. 그러나 초기 생육단계에서는 토양면 증발량의 영향이 크므로, 작물계수는 토양의 습윤정도에 영향을 받게 된다. 즉, 토양이 포화 상태에서는 작물계수가 1보다 큰 경우도 있으나, 건조상태에서는 증발량이 거의 없으므로

0.1까지 낮아지기도 한다. 아래 그림은 작물의 파종기부터 완숙기까지 작물계수의 변화를 개념적으로 나타낸 것으로, 토양면의 습윤정도에 따른 토양증발량의 영향을 보여준다.

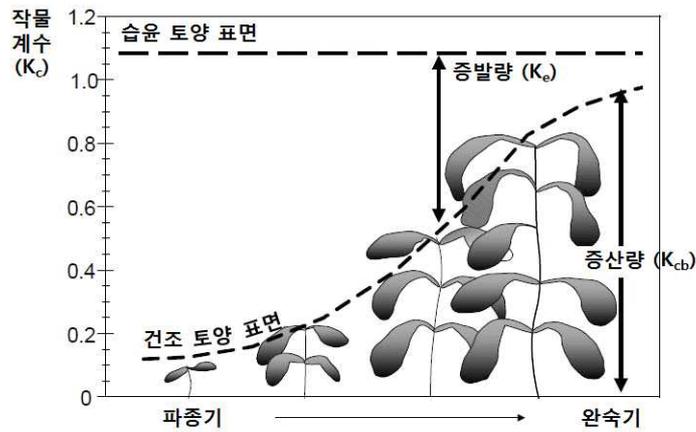


그림 2.2 토양면의 습윤정도에 따른 증발산작용 (FAO, 1998)

(라) 작물생육단계

작물은 파종 후, 발아되어 완숙될 때까지 지면피복과 초장, 엽면적 등이 변화된다. 작물의 생육단계별 증발산량의 차이로 작물계수는 변화하는데, 생육단계는 4단계, 즉 초기단계 (initial stage), 성장단계 (crop development stage), 중간단계 (mid-season stage), 최종단계 (late season stage) 등으로 구분할 수 있다. 초기단계는 파종으로부터 지면 피복상태 즉 피복율이 10 %에 달하는 기간으로 하며, 성장단계는 피복율 10 %부터 완전히 성장하는 기간 (피복율 95 % 이상)까지로 구분한다. 중간 단계는 성장단계로부터 완숙기 전까지, 그리고 최종단계는 완숙기부터 수확기까지로 구분한다. 작물생육단계를 1~4 단계로 구분하기도 하는데, 피복율의 정도를 기준하는 것이 보통이다.

작물생육단계별 작물계수는 일반적으로 다음 그림과 같이 초기단계의 K_c 는 토양수분과 작물에 따라 0.15~1.0의 범위이며, 성장단계는 0.2~1.1정도이다. 중간단계는 K_c 값이 0.8~1.15 정도이며, 최종단계에서는 점차 감소하여 초기단계의 값으로 수렴하는 변화를 보인다.

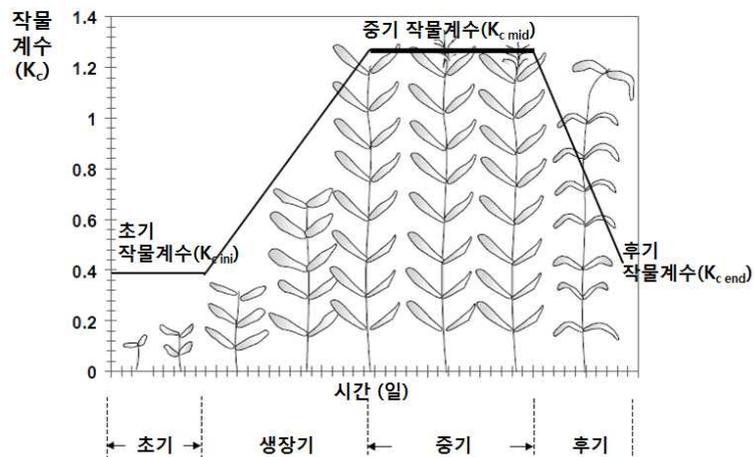


그림 2.3 작물생육단계별 작물계수 (FAO, 1998)

(마) 작물계수의 결정

작물의 증발산량을 산정하기 위해서는 작물생육단계별 작물계수(K_c)를 결정하여야 한다. 작물계수의 결정 절차는 다음과 같다.

- ① 작물의 생육단계별로 그 기간과 작물계수 K_c 를 추정한다.
- ② 작물 생육단계별 작물계수 K_c 를 토양수분조건에 따라 조정한다. 노지재배의 경우 토양 수분의 변동이 크므로 습윤 정도와 그 발생 빈도, 관개 시기와 양 등을 감안해야한다.
- ③ 작물 생육단계별 작물계수 곡선을 작성한다.

FAO (1998)에서 제안한 작물별 생육단계별 작물계수는 다음 표와 같다.

표 2.2 주요 채소작물의 생육단계별 작물계수 K_c (시기별 평균) (FAO, 1998)

작물	생육단계별 작물계수 K_c			최대 초장(m)
	초기 단계	중간 단계	최종 단계	
브로콜리	0.7	1.05	0.95	0.3
양배추		1.05	0.95	0.4
당근		1.05	0.95	0.3
셀러리		1.05	1.00	0.6
마늘		1.00	0.70	0.3
상추		1.00	0.95	0.3
양파		1.05	0.75	0.4
고추		0.6	1.05	0.90
토마토	1.15		0.70~0.90	0.6
오이	0.6	1.00	0.75	0.3
호박, 겨울 호박	0.5	1.00	0.80	0.4
애호박	0.5	0.95	0.75	0.3
메론	0.5	1.05	0.75	0.4
수박	0.4	1.00	0.75	0.4
비트	0.5	1.05	0.95	0.4
감자	0.5	1.15	0.75	0.6
고구마		1.15	0.65	0.4
무우		1.10	0.95	0.6
사탕무	0.35	1.20	0.70	0.5
그린 빈스 (green beans)	0.5	1.05	0.90	0.4
팥	0.4	1.00	0.35	0.4
잠두(fababean)	0.5	1.15	1.00	0.8
탕콩	0.5	1.15	1.00	0.5
콩	0.4	1.15	0.50	0.5~1.0
아스파라가스	0.5	0.95	0.30	0.2~0.8
딸기	0.4	0.85	0.75	0.2

(4) 온실재배 관리용수

온실재배에서는 토양재배와 양액재배 등의 방법을 적용하고 있다. 토양재배는 노지재배와 같은 방식이며, 양액재배는 수경재배나 인공적으로 토양을 대신하는 매질을 사용하는 방법이다. 온실의 관개량은 재배방식에 따라 다를 수 있다. 토양재배의 경우, 작물 수확 후 휴경 상태에서도 관개하는 경우도 많다. 그밖에도 작물 생육단계에 따라 영농관리 관행에 따른 관개와 토양 염도를 억제하기 위한 재염용수 등을 공급하기도 한다. 이와 같이 작물증발산량 보충 이외의 용수를 재배관리용수라고 한다.

(5) 실제 관개량과의 관계

실제 관개량과 작물증발산량 (소비수량)의 비율을 상대적 관개량 (relative irrigation supply, RIS)라고 하는데, 이 값은 관개의 적정여부를 나타내는 지수이다 (FAO, 2013). RIS의 값은 작물의 종류와 재배기간 동안에도 큰 차이를 보인다. FAO (2013)에서는 작물의 전 생육기간에 대한 RIS는 오이의 경우 1.6, 메론은 1.0로 보고하였다. 생육단계별로는 생육초기에는 2~5정도로 매우 큰 값에서 점차 감소한다고 하였다. 생육초기의 RIS값이 큰 이유는 과중 후나 이식 후 작물의 원활한 정착을 위해 충분한 양의 물을 공급하는 데 따른 것이다. Thompson 등 (2007)도 관개량과 필요수량을 비교하였으며, 유사한 결과를 얻었다.

(6) 토양살균 및 이식용수

작물의 관개 이외에도 상당량의 물을 비생육기간 중에 적용하기도 한다. 스페인 알메리아에서 널리 시행되고 있는 비생육기간 중 관행적 관개에는 1) 토양 살균 (soil disinfection) 목적으로 여름철 작물 수확 후 과중이나 이식 전에 시행하는 관개, 2) 작물 이식 전에 토양 수분을 이식 가능하도록 하는 이식용 관개 등이 있다 (FAO, 2013).

온실내 토양 소독은 1~2년 마다 시행되며, 농약을 관개수와 함께 적용하거나, 토양 단면을 포화상태로 한 후에 태양열을 이용하여 가열 살균하는 방법, 그리고 이 두 가지 방법을 함께 쓰는 방법 등이 있다. 살균 및 이식용수량은 20~50 mm 정도로 보고되고 있다 (FAO, 2013).

(7) 기타용수

장정렬 등 (2014)은 새만금 간척지구 원예단지 농업용수 수요량 조사연구에서 간척지 밭작물의 염분 피해를 줄이기 위한 재염화방지용수로서 총 용수량의 10% 정도를 고려하였다. 간척농지의 토양은 염도가 높아 밭작물의 재배에서는 염해를 저감하기 위한 용탈요구량 (leaching requirement)을 고려하는 것이 필요하다.

장정렬 등 (2014)은 밭에서는 다목적 용수량을 고려해야 한다고 하였다. 다목적 용수량은 작물이 생리적으로 요구하는 수분 보급 이외의 용수량으로 재배관리용수, 기상재해방지용수, 관리작업의 생력화용수 및 기타 용수를 포함하며, 국토해양부 (2011)의 수자원장기종합계획에서 보고한 67 mm를 적용하였다. 정하우 등 (2006)은 시설재배의 경우 휴경기 중 연작장애방지 및 재염을 위한 용수를 사용하고 있다고 하였으며, 그 양은 190~430 mm로 보고하였다. 연작장애방지 및 재염을 위한 용수량은 총 관개용수량의 20~45%에 해당한다.

(8) 관개효율 및 원예단지 시설재배지용수 수요량

시설재배에서 적용하는 관개방식은 스프링클러, 점적관개 등이다. 스프링클러의 관개효율은 70~85%로 보고되고 있으며, 점적관개는 80~85%이다. 장정렬 등 (2014)은 새만금지구 고추의 시설재배용수로 다음 표와 같이 산정하였다. 필요수량은 새만금간척지 고추에 해당하며, 토양은 silt loam으로 가정하고, 관개효율 70%를 적용한 경우로서, 작물필요수량 (순용수량) 1,585mm, 다목적용수량 67 mm, 재염화방지용수 158mm (순용수량의 10%)로 하였으며, 시설재배지용수 수요량은 1,805 mm로 산정하였다. 또한, 새만금 주변지역에서 가장 많이 재배되는 파프리카를 대상으로 한 시설재배용수로 1,965 mm을 산정하였다.

표 2.3 새만금간척지구 원예단지의 시설재배지용수 수요량 (장정렬 등, 2014)

작물	조용수량 (mm)			시설재배지용수 수요량 (10 ³ m ³ /ha/yr)
	필요수량	다목적용수	재염화방지용수	
고추	1,585	67	156	18.08
파프리카	1,965			19.65

다. 농업용수 수요량 산정방법

시설재배지의 농업용수 수요량은 아래 그림과 같은 방법에 의해 산정하였다. 시설원예단지의 농업용수 공급계획을 위해서는 재배 대상작물의 생육시기별 증발산량과 기타 재배관리에 필요한 수량 (기타 필요수량)을 결정해야 한다. 이를 위해서는 기상자료로부터 잠재증발산량을 산정하고, 대상 작물의 재배시기 및 생육단계별 작물계수를 결정하여 실제증발산량을 추정해야한다. 실제증발산량은 노지재배를 기준으로 한 증발산량으로 시설재배지에서 증발산량을 추정하기 위해서는 온실재배계수를 적용하여야 하며, 본 연구에서는 온실재배계수를 0.85를 사용하도록 한다. 또한, 시설재배지는 자연강우에 의한 재염효과를 기대할 수 없기 때문에 재염화방지용수 등 재배관리용수를 적용해야 하며, 본 연구에서는 정하우 등 (2006)과 장정렬 등 (2014)을 바탕으로 필요수량의 30%를 적용하였다. 필요수량으로부터 시설재배지용수 수요량을 산정하기 위한 관개효율은 시설재배지의 영농형태에 따라 차이가 많이 발생하는데 70 %를 적용하여 산정하였다.



그림 2.4 시설재배지 관개용수량 산정방법

2. 기후변화 시나리오에 기초한 기후전망

기후변화 전망에 대한 대부분의 연구는 미래의 기후를 예측할 수 있는 기후모델링을 이용하여 수행되고 있다. 기후변화에 연구의 초점을 두고, 대기뿐만이 아니라 지구 기후 시스템을 구성하는 해양, 지면, 빙하, 대기 중 에어로졸 등 모든 기후 요소들을 포함하는 기후시스템모델이 개발되고 있으며 이를 이용하여 기후 시나리오를 산출하고 기후 변화의 영향 평가를 하는 등 전구기후모델은 기후변화의 연구에 매우 중요한 정보를 제공하고 있다 (기상청, 2010). 기후변화 시나리오는 기후변화 모델의 입력 조건으로 사용되는 미래 대기의 이산화탄소 농도를 기준으로 하고 있다. 즉 시나리오는 앞으로 대기의 이산화탄소 농도가 현재 추세대로 지속적으로 증가할 것인지, 감축노력에 의해 어느 정도 현상유지를 할 것인지, 감소할 것인지 등 몇 가지 시나리오를 정해 기후변화 모델에서 동일한 경계조건으로 이용할 수 있도록 정한 값이다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 온실가스 시나리오에 따른 기후변화 평가 보고서를 5~6년 주기로 꾸준히 발간하면서 인간 활동에 의한 기후변화와 그 영향에 대한 과학적인 증거들을 제시하고 기후변화 문제를 해결하기 위한 대책을 마련하고 있다 (국립기상연구소, 2012).

가. RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오

IPCC 4차 보고서(2007)에 사용한 SRES 온실가스 시나리오를 대신하여 IPCC 5차 보고서(2013)에서는 대표농도 경로 (RCP)를 새로운 시나리오로 사용하였다. RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도 변화 경향을 반영하였으며 최근 예측모델에 맞게 해상도 등을 업데이트하였다. IPCC 4차 보고서에서 사용된 SRES에서는 미래 사회·경제 형태가 가장 먼저 결정되고 이에 따른 배출량 시나리오로 온실가스 농도가 정해지는데, 이러한 순차방법은 분리된 각 시나리오 간의 정보 전달에 시간 지연이 일어나는 문제점이 있었다. 이에 IPCC 5차 보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였다. 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 ‘대표 (Representative)’라는 표현을 사용한다. 그리고 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로(Pathways)’라는 의미를 포함한다. RCP에서 4가지 대표 온실가스 농도는 복사강제력 (W/m^2)을 기준 2.6, 4.5, 6.0, 8.5를 사용하였으며, 이는 입사 태양복사량의 약 3.6 %, 2.5 %, 1.9 %, 1.1 %에 해당된다.

표 2.4 IPCC 4차 및 5차 보고서 시나리오 비교

구분		SRES			RCP			
기본개념		RCP와 달리 사회·경제 유형별 온실가스 배출량을 설정 후 기후변화 시나리오 산출			온실가스 농도값을 설정 후 기후변화 시나리오를 산출하여 그 결과의 대책으로 사회·경제 분야별 온실가스 배출 저감 정책 결정			
사회경제학적 가정		사회구조 변화에 따른 온실가스 배출 고려			기후변화 대응정책 수행여부에 따른 온실가스 농도 고려			
예측모델		에어로졸 변화 고려			토지이용도변화 추가 및 한반도 상세지형 반영			
격자간격	전지구	400 km			135 km			
	한반도	27 km			12.5 km			
	남한	10 km			1 km			
시나리오	종류	B1	A1B	A2	2.6	4.5	6.0	8.5
	CO2기준 (ppm)	550	720	830	420	540	670	940
	개념	지역간 격차가 적고, 인구감소, 청정자원 절약기술 도입	화석에너지와 비화석에너지 원 균형, 신기술, 고효율화 기술 도입	인구증가, 경제성장은 낮고, 환경에의 관심도 상대적으로 낮음	인간 활동에 의한 영향을 지구가 스스로가 회복 가능한 경우	온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우	온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우	현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우
	비고	미래 사회구조를 중심으로 선정			기후변화 대응정책과 연계하여 선정			

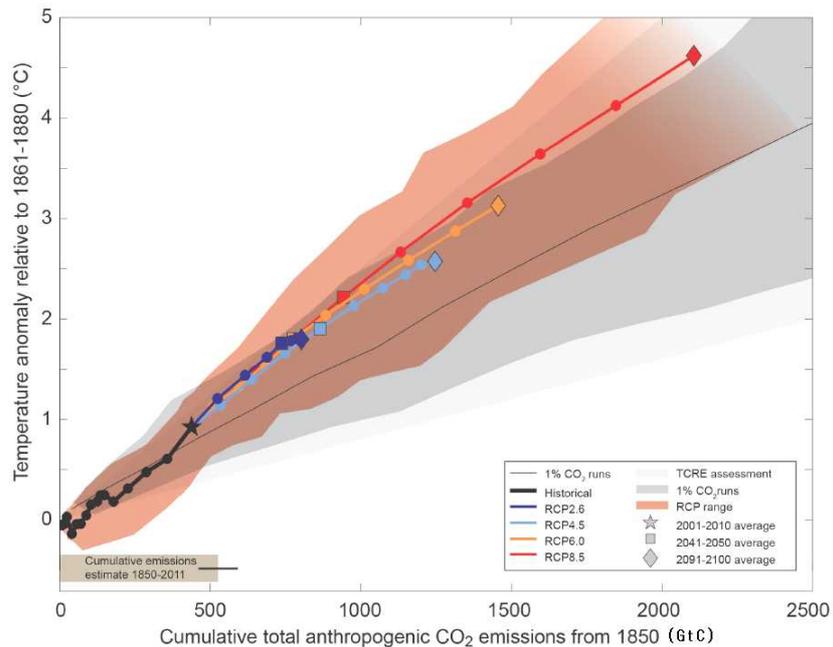


그림 2.5 RCP 시나리오의 이산화탄소 배출량(GtC)에 따른 전지구 평균기온

우리나라 기상청에서도 기후변화 대응을 위한 국가전략 수립 지원을 위해 IPCC에서 권장하는 RCP 시나리오에 따른 전지구 및 지역기후변화 시나리오를 산출하고 있다 (국립기상연구소, 2012). 기상청은 CMIP5 국제사업의 표준 실험체계를 통해 전지구 기후변화 시나리오 산출을 위해서 영국 기상청 해들리센터의 기후변화예측모델인 HadGEM2-AO를 도입하여 기상청 슈퍼컴퓨터에 설치하였다. 이 모델의 대기의 수평해상도는 135 km이다. 미래 기후변화 전망을 평가하기 위해서 기본적으로 1860년의 온실가스 농도로 고정하여 최소 200년 이상 적분하는 제어적분 실험을 수행하였으며, 1860년부터 2005년까지 관측된 자연과 인위적인 강제력에 대한 과거기후 모의실험 후 RCP 시나리오에 따라 2100년까지 미래 기후변화를 전망하였다.

전지구 기후변화 시나리오 산출과 함께 아시아 지역 기후변화 시나리오 개발을 CORDEX 국제사업과 연계하여 진행하고 있으며, 국내 기후변화 대응 지원을 위하여 한반도 지역 기후변화 시나리오를 개발하였다. 이러한 지역 기후변화 시나리오 산출에는 영국 기상청 해들리센터 지역기후모델인 HadGEM³-RA가 사용되며, 아시아 영역에 대해서는 50km 해상도, 한반도 영역에 대해서는 12.5km 해상도를 갖고 있다. 실험 종류는 과거기후모의 (1950-2005년)와 RCP에 기반한 미래 2100년까지 기후변화 전망 실험이며, 입력자료로 135 km 격자 규모의 전지구 기후변화 시나리오가 사용되었다. 상세화된 지역기후변화 시나리오는 전지구 기후모델에서 표현할 수 없는 복잡한 지형의 효과가 잘 반영된다.

남한 상세(1km) 기후변화 시나리오는 지역기후모델을 통해 생산된 한반도(12.5km) 기후변화 시나리오를 바탕으로 통계적 상세화 과정을 통해 생산된다. 관측자료(2000~2010)를 PRIDE 모델에 적용하여 1km 해상도의 관측격자 자료를 생산하여 기후값으로 사용하였다. 그리고 12.5km 한반도 시나리오 자료에서 각 격자점별로 계절 변동(Seasonal cycle)을 제거한 편차(Anomaly) 자료를 추출한다. 관측에서 얻은 기후값에 지역기후모델의 편차를 더하면, 모델 계통오차가 제거된 새로운 1km 격자형 시나리오 자료가 생산된다.

이처럼 기상청에서 제공하는 기후변화 시나리오 자료는 크게 3가지의 공간해상도와 200년, 400년 제어적분으로 나뉘어져 있으며, 정보제공 내용은 표 0.2와 같다.

본 연구에서는 미래 시설재배지 농업용수 산정을 위해 기상청에서 제공하고 있는 HadGEM2-AO모형의 한반도 기후변화 시나리오 자료 (해상도 12.5 km)를 활용하였으며, 우리나라를 중심으로 4종 시나리오 (RCP 2.6/4.5/6.0/8.5)에 기초한 미래 기후전망 (2011~2100년)에 대한 자료로 구성된다.

표 2.5 기상청 기후변화 시나리오 정보제공 현황

		전지구 전망자료	한반도 전망자료	남한상세 전망자료	남한상세 양상불 전망자료	기후 극한지수	행정구역별 자료
온실 가스 시나 리오	200년 제어 적분	RCP 2.6/4.5/ 6.0/8.5	RCP 4.5/8.5	RCP 4.5/8.5	RCP 4.5/8.5	RCP 4.5/8.5	RCP 4.5/8.5
	400년 제어 적분	RCP 2.6/4.5/ 6.0/8.5	RCP 2.6/4.5/ 6.0/8.5	RCP 2.6/4.5/ 6.0/8.5	RCP 4.5/8.5	RCP 4.5/8.5	RCP 2.6/4.5/ 6.0/8.5
공간범위		경도: 0~360 위도: -90~90	경도: 111.0 ~ 144.625 위도: 26.5 ~ 48.875	남한 지역	남한 지역	남한 지역	73개 지점, 17개 광역시도, 230개 시군구
시간범위		1860~2100	1950~2100 (200년 제어적분) 1979~2100 (400년 제어적분)	2011~2100	2021~ 050	2011~2100 (200년 제어적분) 2021~2050 (400년 제어적분)	기온, 강수량 : 2000~2100 상대습도 등 : 1950~2100
공간해상도		약 135km	약 12.5km	1km	1km	1km	-
시간해상도		월	일, 월	일, 월	일, 월	년	일, 월
정보종류		기온(최고, 최저, 평균), 강수, 상대습도, 풍속	기온(최고, 최저, 평균), 강수, 상대습도, 풍속	기온(최고, 최저, 평균), 강수	기온(최고, 최저, 평균), 강수	기온지수 (열대야, 폭염, 여름, 서리,결빙일 수, 식물 성장기간) 강수지수 (호우일수, 강수강도)	기온(최고, 최저, 평균), 강수, 상대습도, 기압, 풍속 등

나. RCP 시나리오에 따른 우리나라 기온과 강수의 미래 전망

12 km 해상도의 지역기후모델을 이용한 지역기후변화 시나리오에 따르면 기후변화 완화의 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출하는 경우 (RCP8.5), 21세기 말 우리나라 평균기온은 약 6.0 °C 상승, 강수량은 20.4 % 증가가 예상되고 저감 노력이 실현되는 경우 (RCP 4.5)에는 3.4 °C의 기온 상승과 17.3 %의 강수량 증가가 예상된다. 기온의 상승은 우리나라 중북부지역에서 뚜렷하게 나타나며, 강수량의 증가는 남해안과 중서부 지역에서 두드러지게 나타난다. 일반적으로 강수에 대한 미래전망은 시·공간에 따른 변동성이 크므로 증가 추세가 기온에 비하여 뚜렷하지 않고 불확실성이 크다는 사실을 주지할 필요가 있다. 한반도 지역의 폭염일은 현재 (1971~2000년) 관측에서 연평균 8.5일인데, 기온이 상승하는 21세기 말 (2070~2099년)에는 RCP 4.5와 8.5에서 각각 32.3일, 65.9일로 나타나 매우 증가할 것으로 전망되었다. 열대야일 (현재 평균 3.7일) 또한 21세기 말 RCP 4.5와 8.5의 경우 각각 34.6일과 62.8일로 급격하게 증가할 것으로 전망되고 있다. 반면 추위와 관련된 영하일수는 급격하게 감소할 것으로 전망된다. 기후구의 변화도 뚜렷하게 나타난다. RCP 4.5에 따르면 아열대 기후구 지역이 서해안으로는 보령까지 확대되고, 대도시 해안 지역인 인천도 아열대 기후구에 포함된다. 내륙으로는 전주, 광주, 순천, 산청, 합천, 대구까지, 동해안 지역으로는 속초까지 아열대 기후구에 포함되는 것으로 나타났다. RCP 8.5에 의하면, 관측 지점 중 해발고도가 가장 높은 대관령을 중심으로 한 인제, 홍천, 원주, 제천 등을 제외한 전국 대부분의 지역이 아열대 기후구에 포함될 것으로 전망된다 (국립기상연구소, 2011). 자세한 미래기후변화 전망 결과는 국립기상연구소에서 2011년에 발행한 「IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서」에 수록되어 있다.

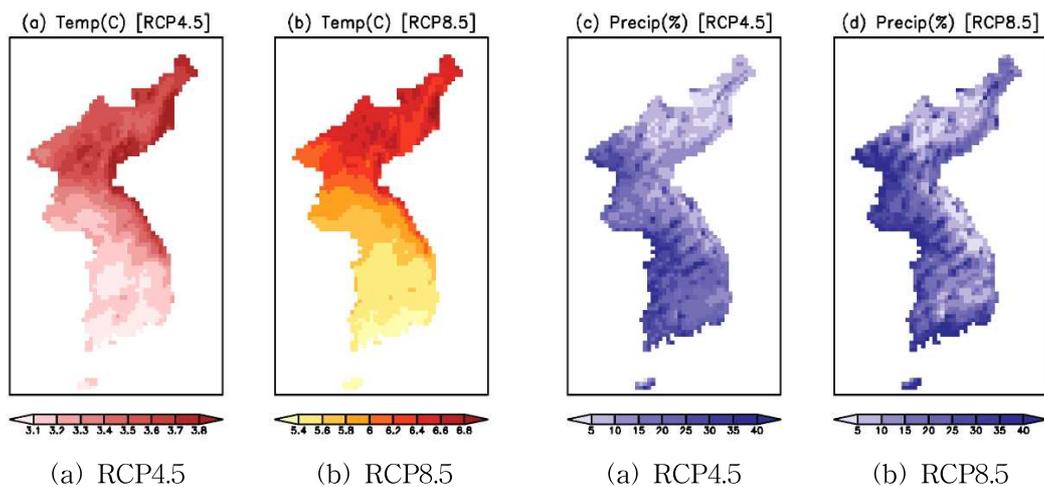


그림 2.6 20세기 말 (1971~2000년)
대비 21세기 말 (2070~2099년)
기온변화 (°C)

그림 2.7 20세기 말 (1971~2000년)
대비 21세기 말 (2070~2099년)
강수변화 (%)

3. 주요 시설재배 작물 선정 및 작부체계

가. 주요 시설재배 작물 선정

국내 시설 재배 면적은 2015년 기준 농업경영체 DB에 등록된 품목별 시설 재배현황을 살펴본 결과, 전체 재배면적(노지, 시설) 1,660,414 ha의 5 %에 해당하는 77,946 ha로 나타났으며, 품목별로는 과일과채류가 시설재배 면적의 34.6 %로 재배면적이 가장 큰 것으로 나타났다.

표 2.6 2015년 품목별 시설 재배현황 (농림사업정보시스템)

순위	구분	면적(ha)	비율(%)	순위	구분	면적(ha)	비율(%)
1	과일과채류	26,949	34.6	6	버섯류	2,680	3.4
2	엽경채류	17,487	22.4	7	양채류	2,201	2.8
3	조미채소류	7,824	10.0	8	서류	1,434	1.8
4	과실류	7,177	9.2	9	근채류	1,066	1.4
5	과채류	5,629	7.2	10	산채류	755	1.0

작물별 농업용수 수요량 산정을 위해 주요 시설 재배 품목을 상세화하여 재배면적 상위 15개 작물을 결정하고, 해당작물이 가장 많이 재배되는 시군구를 조사하였다. 전체 시설 재배면적의 약 12 %에 해당하는 수박의 경우 충청남도 부여군에서 1,182 ha로 가장 많이 재배되고 있었으며, 약 5 %에 해당하는 딸기의 경우 충청남도 논산시에서 986 ha 가장 재배면적이 많은 것으로 나타났다. 참외는 참외 전체 재배면적 4,476 ha의 약 77 %가 경상북도 성주군 (3,430 ha)에서 재배되고 있었으며, 만감의 경우도 만감 전체 재배면적인 2,530 ha의 약 78 %를 제주도 서귀포시 (1,963 ha)에서 재배되고 있는 것으로 나타났다. 상위 15개 작물 중 최종적으로 FAO, 농촌진흥청 등 다양한 영농정보 수집이 가능한 수박, 딸기, 참외, 토마토, 오이, 상추, 고추, 시금치, 방울토마토, 얼갈이배추 10개 작물을 대상작물로 선정하였다.

표 2.7 시설 재배작물의 재배면적 순위 (상위 15개 작물)

순위	작물	면적(ha)	시설재배 면적대비 비율(%)	1순위 재배시군		영농 정보	대상 작물
				시군구	면적(ha)		
1	수박	9,086	11.7	부여군	1,182	○	◎
2	딸기	5,803	7.4	논산시	986	○	◎
3	참외	4,476	5.7	성주군	3,430	○	◎
4	토마토	3,457	4.4	부산 강서구	362	○	◎
5	오이	3,224	4.1	천안시	359	○	◎
6	상추	3,147	4.0	논산시	722	○	◎
7	열무	2,804	3.6	고양시	747	△	
8	고추	2,705	3.5	밀양시	546	○	◎
9	시금치	2,582	3.3	포천시	981	○	◎
10	만감	2,530	3.2	서귀포시	1,963	△	
11	건고추	2,473	3.2	청양군	115	△	
12	방울토마토	2,446	3.1	부여군	337	○	◎
13	포도	2,194	2.8	김천시	544	△	
14	호박	1,993	2.6	진주시	299	△	
15	얼갈이배추	1,800	2.3	포천시	462	○	◎

나. 작부시기 및 작물계수 설정

앞서 선정된 10개 대상작물의 농업용수 수요량 산정을 위해서는 작물계수나 작부시기 등의 영농자료 수집이 선행되어야 한다. 먼저 작물계수는 작물생육단계에 따라 순별 작물계수를 사용하는데 기존에 제시된 FAO (1998), 농촌진흥청 (1994)의 생육단계별 작물계수를 참고하였다. 초기, 중기, 그리고 후기 작물계수의 적용을 위해 농촌진흥청의 시설 재배 작물의 생육시기별 작물계수를 최우선으로 하며, 이에 해당하는 자료가 없을 경우 농촌진흥청의 노지 원예작물의 생육시기별 작물계수, FAO 주요 채소작물의 생육단계별 작물계수 자료를 이용하였다. 작부시기의 경우, 농촌진흥청 (2007)에서 발간한 주요 원예작물 재배력 자료를 바탕으로 해당 작물의 작부시기를 초기, 생장기, 중기, 후기 4단계로 구분하였다. 시설재배 작물이므로 축성재배에 초점을 맞추고, 해당하는 자료가 없을 경우만 노지의 작부시기를 적용하였다.

표 2.8 주요 시설 재배 작물의 생육단계별 작물계수

순위	작물	작물계수 정보			생육단계별 작물계수 Kc		
		RDA (시설)	RDA (노지)	FAO (노지)	초기	중기	후기
1	수박	◎		○	0.51	0.98	0.88
2	딸기			◎	0.40	0.85	0.75
3	참외		◎		0.49	0.94	0.86
4	토마토	◎		○	0.62	1.27	1.25
5	오이	◎		○	0.65	0.91	0.99
6	상추	◎	○	○	0.52	1.16	1.34
7	고추		◎	○	0.53	1.06	1.82
8	시금치		◎		0.70	1.03	1.03
9	방울토마토	◎	○		0.69	1.48	1.25
10	얼갈이배추	◎	○		0.69	1.37	1.25

표 2.9 주요 시설 재배 작물의 작부시기 (농촌진흥청, 주요 원예작물 재배력)

순위	작물	초기		생장기		중기		후기	
		시작일	종료일	시작일	종료일	시작일	종료일	시작일	종료일
1	수박	11/21	12/10	12/11	01/20	01/21	03/30	04/01	04/30
2	딸기	09/01	09/20	09/21	09/30	10/01	10/31	11/01	05/10
3	참외	10/21	11/30	12/01	01/31	02/01	05/10	05/11	06/20
4	토마토	09/11	10/10	10/11	11/30	12/01	01/20	01/21	05/10
5	오이	10/11	11/10	11/11	12/20	12/21	01/20	01/21	04/30
6	상추	01/11	02/10	02/11	02/28	03/01	03/31	04/01	05/31
7	고추	10/11	10/20	10/21	12/20	12/21	02/10	02/11	06/20
8	시금치	02/01	02/10	02/11	02/28	03/01	05/31	06/01	07/10
9	방울토마토	09/11	10/10	10/11	11/30	12/01	01/20	01/21	05/10
10	얼갈이배추	03/21	03/31	04/01	04/20	04/21	05/20	05/21	06/10

4. 기후변화에 따른 주요 시설재배 작물의 농업용수 수요량 분석

안정적이고 지속적인 작물생산을 위해서는 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향에 대하여 정확히 파악하고, 이로 인해 발생할 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 연구가 필요하다. 즉 기온 상승, 강수량 및 강우강도 변화 및 일조시간의 변화 등의 기후변화에 따른 농업수자원에 미치는 영향에 대한 평가가 필요하다 (유승환 등, 2009). 이에 앞서 선정된 RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료와 작물별 작부체계 및 작물계수 자료를 이용하여 수박, 딸기, 참외, 토마토, 오이, 상추, 고추, 시금치, 방울토마토, 얼갈이배추 10개 작물을 대상으로 작물 증발산량 및 필요수량 등을 산정하였다.

가. 수박 농업용수 수요량 산정

RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 향후 30년간 시기별 수박의 농업용수 수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 949 mm, 온실증발산량 229 mm로 산정되었으며, 재배관리 용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하면 용수 수요량은 468 mm가 된다. 2030년의 경우 용수 수요량이 495 mm로 2016년에 비해 6 % 증가하였으나, 2045년에는 2016년에 비해 6 % 감소한 442 mm로 산정되었다.

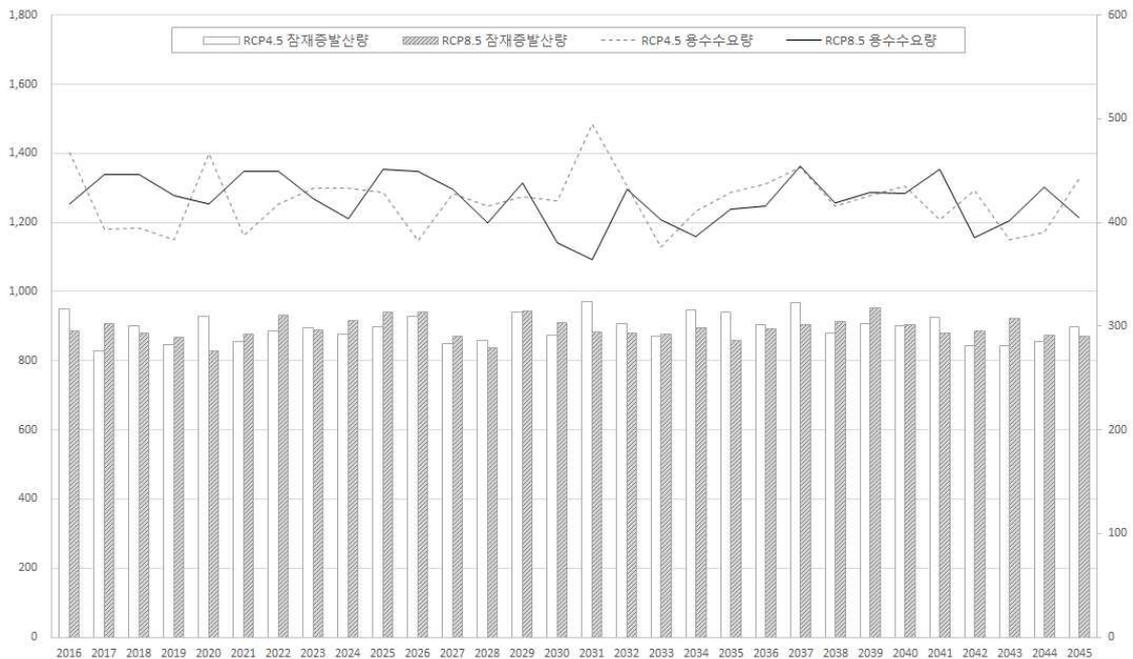


그림 2.8 수박의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.10 수박의 기후변화 시나리오별 농업용수 수요량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	949	229	327	468	887	205	293	418
2017	827	193	276	394	908	219	312	446
2018	902	193	276	394	879	218	312	446
2019	845	188	268	383	869	209	298	426
2020	928	229	327	467	829	205	292	417
2021	855	190	271	388	877	220	314	449
2022	887	205	292	417	932	220	314	449
2023	894	212	303	433	890	207	296	423
2024	877	212	303	433	917	198	282	403
2025	898	210	300	429	942	221	316	451
2026	929	187	268	382	941	220	314	449
2027	849	210	300	428	870	212	302	432
2028	857	204	291	416	837	196	280	399
2029	940	208	297	425	943	215	307	438
2030	875	206	294	421	910	186	266	381
2031	972	243	347	495	883	178	255	364
2032	907	213	305	436	880	212	302	432
2033	871	184	263	376	878	197	282	402
2034	946	201	287	410	896	190	271	387
2035	940	210	300	429	858	202	289	412
2036	904	214	306	437	893	204	291	416
2037	967	222	317	453	905	223	318	454
2038	879	204	291	416	913	205	293	418
2039	907	209	298	426	952	210	300	429
2040	900	213	304	435	905	210	300	428
2041	926	197	282	403	879	221	316	451
2042	843	211	302	431	887	189	270	385
2043	845	188	268	383	923	197	281	402
2044	855	191	274	391	875	213	304	434
2045	899	217	309	442	870	198	284	405

나. 2. 딸기 농업용수 수요량 산정

RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 향후 30년간 시기별 딸기의 농업용수 수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 949 mm, 온실증발산량 290 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하면 용수 수요량은 593 mm가 된다. 2045년에는 잠재증발산량은 899 mm, 온실증발산량 269 mm, 용수 수요량은 549 mm로 2016년에 비해 7 % 감소한 것으로 나타났다.

RCP 8.5 시나리오를 기준으로 시기별 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도의 잠재증발산량은 887 mm, 온실증발산량 271 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 때 용수 수요량은 2016년에 552 mm, 2045년에는 528 mm로 2016년에 비해 4 % 정도 감소한 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 2037년에 573 mm로 용수 수요량이 가장 크게 나타났다.

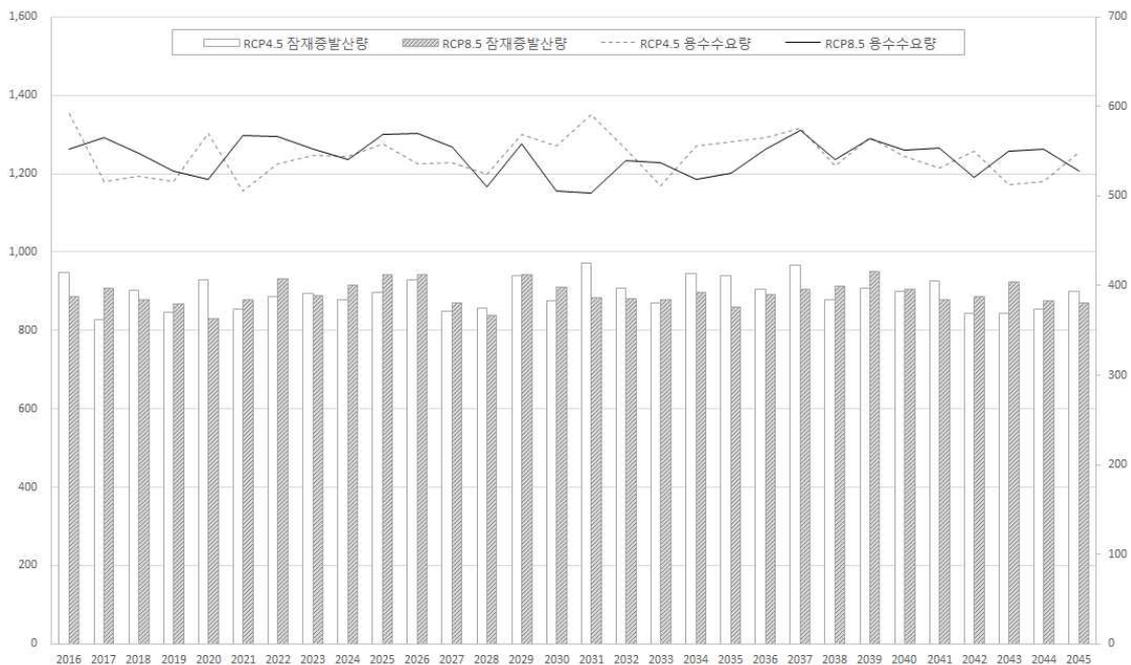


그림 2.9 딸기의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.11 딸기의 기후변화 시나리오별 농업용수 수요량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	949	290	415	593	887	271	387	552
2017	827	253	361	516	908	277	395	565
2018	902	256	365	522	879	268	383	547
2019	845	253	361	516	869	258	369	528
2020	928	280	399	571	829	254	363	519
2021	855	248	354	506	877	278	397	567
2022	887	263	375	536	932	277	396	566
2023	894	267	382	545	890	271	387	553
2024	877	267	381	545	917	265	378	540
2025	898	274	391	558	942	279	398	568
2026	929	263	375	536	941	279	399	570
2027	849	263	376	537	870	272	388	555
2028	857	257	367	525	837	250	357	510
2029	940	279	398	568	943	274	391	559
2030	875	272	389	556	910	248	354	505
2031	972	290	414	591	883	246	352	503
2032	907	271	387	552	880	264	378	540
2033	871	250	358	511	878	263	376	537
2034	946	272	389	556	896	254	363	518
2035	940	275	392	561	858	258	368	526
2036	904	277	396	566	893	271	387	553
2037	967	282	403	576	905	281	401	573
2038	879	262	374	534	913	265	378	540
2039	907	277	396	566	952	277	395	565
2040	900	267	381	544	905	270	386	551
2041	926	260	372	531	879	272	388	554
2042	843	269	385	550	887	255	364	520
2043	845	251	359	513	923	269	385	550
2044	855	253	362	517	875	271	387	552
2045	899	269	385	549	870	259	370	528

다. 참외 농업용수 수요량 산정

향후 30년간 RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 시기별 참외의 농업용수 수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 958 mm, 온실증발산량 396 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하면 용수 수요량은 809 mm가 된다. 2045년에는 잠재증발산량은 925 mm, 온실증발산량 403 mm, 용수 수요량은 822 mm로 2016년에 비해 2 % 정도 증가한 것으로 나타났으며, 용수 수요량은 2031년의 용수 수요량이 893 mm로 가장 큰 것으로 나타났다.

RCP 8.5 시나리오를 기준으로 시기별 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도의 잠재증발산량은 857 mm, 온실증발산량 357 mm로 산정되었다. RCP 4.5 시나리오의 용수 수요량 산정과 동일하게 재배관리용수량과 관개효율을 적용하면 용수 수요량은 2016년에 728 mm, 2045년에는 776 mm로 기준년도인 2016년에 비해 7 % 증가한 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 835 mm로 2022년의 용수 수요량이 가장 큰 것으로 산정되었다.

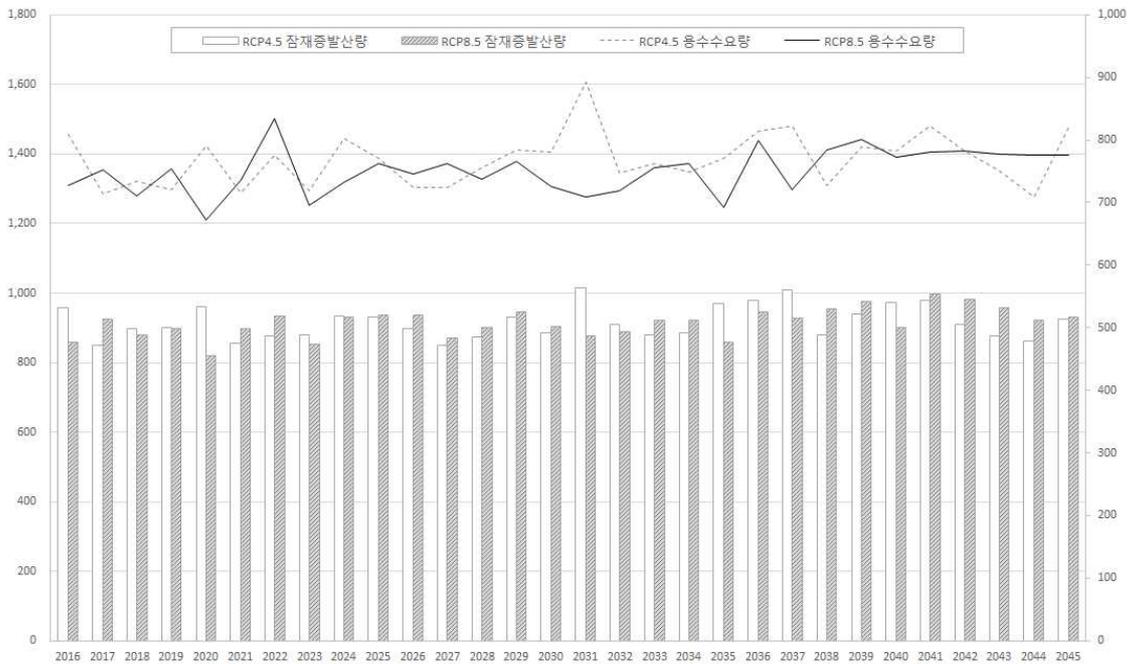


그림 2.10 참외의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.12 참외의 기후변화 시나리오별 농업용수 수요량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	958	396	566	809	857	357	509	728
2017	848	350	500	714	926	369	527	753
2018	897	360	514	735	881	348	497	710
2019	900	353	504	720	897	369	527	753
2020	960	388	554	791	820	330	471	673
2021	857	351	501	716	898	360	515	736
2022	878	381	544	777	934	409	584	835
2023	881	352	503	718	854	341	487	696
2024	933	393	562	803	930	359	513	733
2025	931	378	540	771	937	374	534	763
2026	897	355	507	724	937	366	523	746
2027	850	355	507	724	870	374	534	763
2028	875	370	529	756	902	362	517	738
2029	931	385	549	785	945	375	536	766
2030	887	383	547	781	903	355	508	725
2031	1,015	437	625	893	876	347	496	709
2032	910	366	523	747	890	352	503	719
2033	880	374	534	763	923	370	529	755
2034	887	367	524	749	923	374	534	762
2035	969	378	540	771	859	339	484	692
2036	978	399	570	814	947	392	560	800
2037	1,010	403	576	823	927	353	504	720
2038	880	357	509	728	955	384	548	783
2039	941	387	553	790	976	393	561	801
2040	972	384	548	783	901	379	541	773
2041	980	404	576	823	998	383	547	781
2042	909	383	548	782	981	383	548	782
2043	878	368	526	751	958	381	545	778
2044	861	348	497	710	922	380	543	776
2045	925	403	575	822	932	380	543	776

라. 토마토 농업용수 수요량 산정

토마토의 농업용수 수요량 산정을 위해 RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 향후 30년간 시기별 토마토의 잠재증발산량, 필요수량, 용수 수요량 등을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 1,177 mm, 온실증발산량 727 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30%)과 관개효율 70%를 적용하였을 때 용수 수요량은 1,483 mm가 된다. 2045년의 잠재증발산량은 1,161 mm, 온실증발산량 741 mm, 용수 수요량은 1,513 mm로 2016년에 비해 2% 증가한 것으로 나타났으며, 2045년의 용수 수요량이 가장 큰 것으로 나타났다.

RCP 8.5 시나리오를 기준으로 토마토의 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도의 잠재증발산량은 1,110 mm, 온실증발산량 659 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량의 30%)과 관개효율 70%를 적용하였을 때 용수 수요량은 2016년에 1,345 mm, 2045년에는 1,347 mm로 2016년과 차이가 미미했다. RCP 8.5 시나리오에서는 2040년에 1,522 mm로 용수 수요량이 가장 큰 것으로 산정되었다.



그림 2.11 토마토의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.13 토마토의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	1,177	727	1,038	1,483	1,100	659	942	1,345
2017	1,053	658	939	1,342	1,175	703	1,005	1,435
2018	1,096	654	935	1,335	1,092	697	996	1,423
2019	1,075	670	957	1,367	1,030	626	894	1,277
2020	1,176	694	991	1,416	1,037	626	895	1,278
2021	1,069	626	894	1,277	1,125	704	1,006	1,437
2022	1,088	703	1,004	1,435	1,158	699	998	1,426
2023	1,091	698	998	1,425	1,074	674	964	1,376
2024	1,086	720	1,028	1,469	1,217	700	999	1,428
2025	1,119	680	972	1,388	1,243	729	1,041	1,488
2026	1,084	592	846	1,208	1,149	691	988	1,411
2027	1,020	646	923	1,319	1,051	645	921	1,316
2028	1,077	673	961	1,373	1,069	625	893	1,275
2029	1,126	662	946	1,351	1,190	697	995	1,422
2030	1,131	732	1,046	1,494	1,145	667	952	1,360
2031	1,241	739	1,055	1,507	1,088	637	910	1,300
2032	1,142	663	948	1,354	1,085	649	927	1,324
2033	1,035	615	878	1,254	1,138	679	971	1,386
2034	1,108	671	958	1,369	1,157	605	865	1,236
2035	1,137	684	978	1,397	1,042	628	897	1,281
2036	1,090	667	953	1,361	1,090	678	968	1,383
2037	1,238	734	1,048	1,497	1,159	729	1,042	1,489
2038	1,092	645	922	1,317	1,168	701	1,002	1,431
2039	1,144	716	1,023	1,461	1,202	736	1,051	1,502
2040	1,153	711	1,016	1,451	1,210	746	1,065	1,522
2041	1,184	682	975	1,393	1,161	692	989	1,413
2042	1,053	677	966	1,381	1,135	655	936	1,337
2043	1,046	640	914	1,306	1,189	729	1,041	1,488
2044	1,063	670	957	1,367	1,028	637	910	1,300
2045	1,161	741	1,059	1,513	1,082	660	943	1,347

마. 오이 농업용수 수요량 산정

향후 30년간 RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 시기별 오이의 농업용수 수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도에는 잠재증발산량 921 mm, 온실증발산량 265 mm가 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 경우 용수 수요량은 540 mm가 된다. 2045년의 잠재증발산량은 900 mm, 온실증발산량 270 mm, 용수 수요량은 552 mm로 2016년에 비해 2 % 증가한 것으로 나타났다.

RCP 8.5 시나리오를 이용하여 오이의 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도의 잠재증발산량은 861 mm, 온실증발산량 248 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 경우 2016년의 용수 수요량은 507 mm, 2045년은 2016년에 비해 4 % 정도 감소한 487 mm로 나타났다.

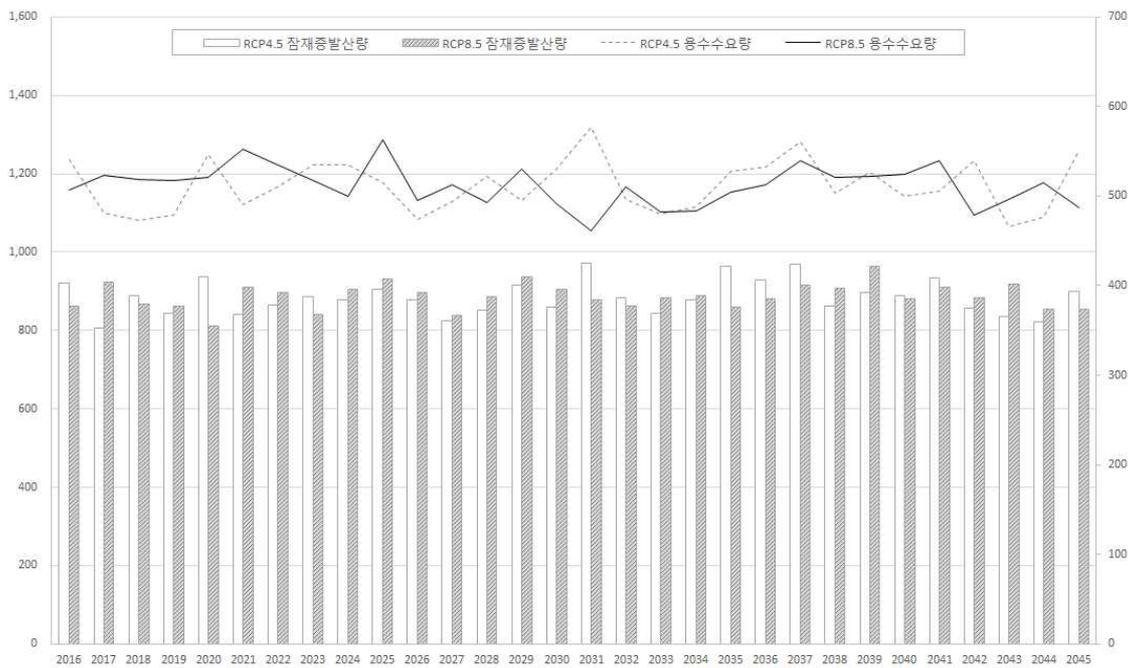


그림 2.12 오이의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.14 오이의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	921	265	378	540	861	248	355	507
2017	805	236	336	481	925	257	367	524
2018	888	232	331	474	867	254	363	518
2019	843	234	335	478	861	253	362	517
2020	936	268	382	546	812	255	365	521
2021	840	240	343	490	910	271	387	552
2022	865	250	357	510	896	262	375	535
2023	885	262	374	535	841	254	363	518
2024	878	262	375	535	904	245	350	500
2025	904	253	361	516	932	276	394	563
2026	879	232	332	474	896	242	346	495
2027	825	242	346	494	839	251	359	512
2028	851	256	365	522	887	241	345	493
2029	916	243	347	495	937	260	372	531
2030	859	260	371	530	904	241	344	492
2031	971	283	404	577	878	226	323	462
2032	885	243	348	497	861	250	357	511
2033	845	235	336	480	884	237	338	483
2034	879	239	342	489	890	237	338	484
2035	963	259	369	528	861	247	353	505
2036	930	261	373	532	881	251	359	512
2037	968	275	393	561	915	264	378	539
2038	862	247	353	504	906	255	365	521
2039	898	258	369	527	963	256	366	522
2040	890	245	350	500	880	257	367	524
2041	935	248	354	505	909	265	378	540
2042	858	264	378	539	884	235	335	479
2043	835	228	326	465	917	243	348	497
2044	822	233	333	476	854	252	360	515
2045	900	270	386	552	855	239	341	487

바. 상추 농업용수 수요량 산정

RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 향후 30년간 상추의 시기별 농업용수 수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 949 mm, 온실증발산량 395 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하면 용수 수요량은 805 mm로 산정되었다. 2045년의 잠재증발산량은 899 mm, 온실증발산량 367 mm, 용수 수요량은 748 mm로 2016년에 비해 7% 정도 감소한 것으로 나타났으며, 2031년의 용수 수요량이 892 mm로 가장 크게 산정되었다.

RCP 8.5 시나리오를 기준으로 상추의 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도의 잠재증발산량은 887 mm, 온실증발산량 371 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량의 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 경우 용수 수요량은 2016년에는 756 mm, 2045년에는 681 mm로 2016년에 비하여 10 % 감소한 것으로 나타났다. 용수 수요량의 경우 RCP 4.5 시나리오는 2031년 (892 mm), RCP 8.5 시나리오는 2022년 (855 mm)에 가장 큰 것으로 나타났다.

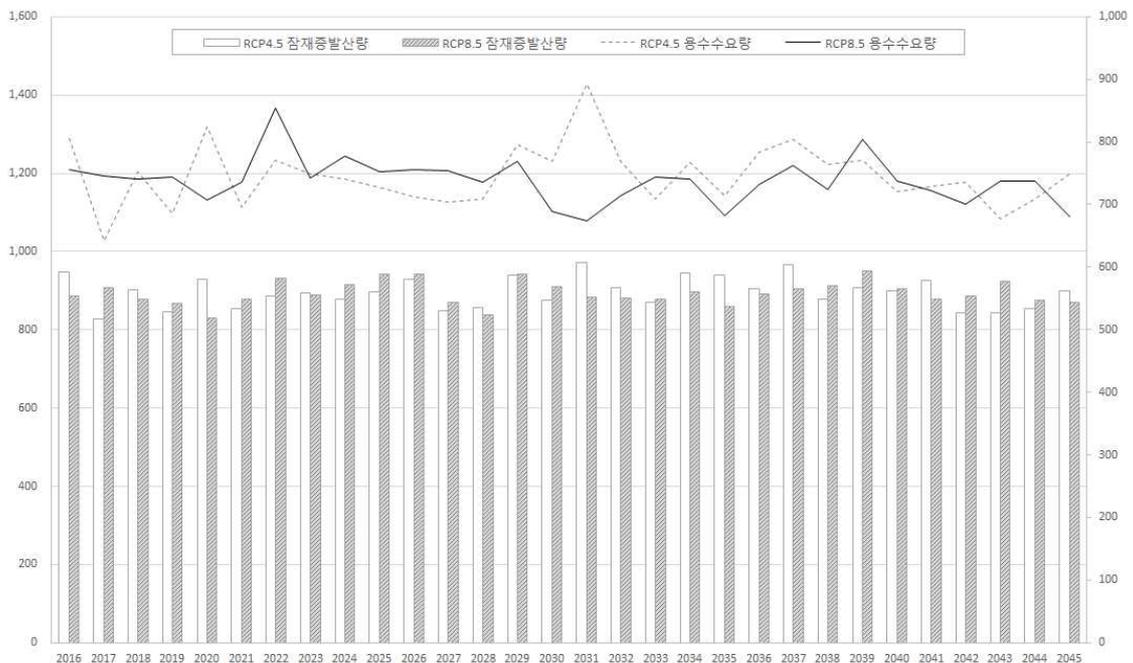


그림 2.13 상추의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.15 상추의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	949	395	564	805	887	371	530	756
2017	827	315	450	643	908	366	523	747
2018	902	369	527	753	879	363	518	741
2019	845	336	480	685	869	365	521	744
2020	928	404	577	824	829	347	495	708
2021	855	341	487	695	877	361	516	737
2022	887	378	540	771	932	419	599	855
2023	894	367	525	749	890	364	520	743
2024	877	363	519	742	917	381	545	778
2025	898	356	509	727	942	368	526	752
2026	929	349	499	712	941	371	529	756
2027	849	345	493	704	870	370	529	755
2028	857	348	497	710	837	361	515	736
2029	940	390	557	795	943	377	539	770
2030	875	377	538	769	910	338	483	690
2031	972	437	624	892	883	330	472	674
2032	907	377	539	770	880	350	500	714
2033	871	348	497	710	878	365	521	744
2034	946	376	538	768	896	363	519	741
2035	940	350	500	714	858	334	477	682
2036	904	385	550	785	893	359	513	733
2037	967	394	563	804	905	374	534	763
2038	879	374	535	764	913	355	507	725
2039	907	378	540	771	952	394	563	804
2040	900	353	504	720	905	362	517	738
2041	926	358	511	730	879	354	506	723
2042	843	361	515	736	887	343	491	701
2043	845	332	475	678	923	361	516	737
2044	855	347	496	709	875	361	516	737
2045	899	367	524	748	870	334	477	681

사. 고추 농업용수 수요량 산정

고추의 농업용수 수요량 산정을 위해 RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 향후 30년간 고추의 잠재증발산량, 필요수량 등을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 970 mm, 온실증발산량 664 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 때 용수 수요량은 1,355 mm가 된다. 2045년의 잠재증발산량은 941 mm, 온실증발산량 673 mm, 용수 수요량은 1,373 mm로 2016년에 비해 1 % 정도 증가한 것으로 나타났으며, RCP 4.5 시나리오가 기준이 되었을 때는 2031년의 용수 수요량이 1,466 mm로 가장 큰 것으로 산정되었다.

RCP 8.5 시나리오를 기준으로 고추의 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도의 잠재증발산량은 922 mm, 온실증발산량 597 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량의 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 때 용수 수요량은 2016년에 1,218 mm, 2045년에는 1,219 mm로 2016년과 차이가 미미했다. RCP 8.5 시나리오에서는 2022년에 1,425 mm로 용수 수요량이 가장 큰 것으로 나타났다.

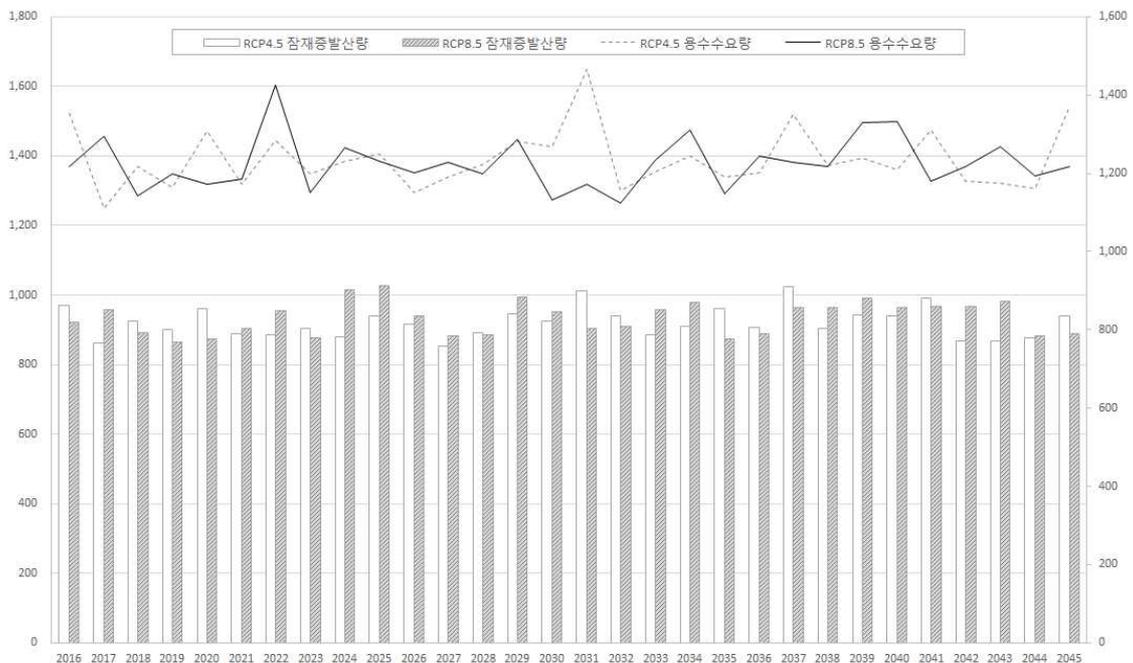


그림 2.14 고추의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.16 고추의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	970	664	948	1,355	922	597	853	1,218
2017	861	545	778	1,111	957	634	906	1,294
2018	926	597	853	1,218	893	560	800	1,143
2019	900	571	816	1,165	866	588	840	1,200
2020	962	641	916	1,308	874	574	820	1,171
2021	888	574	820	1,171	904	581	830	1,185
2022	887	629	899	1,285	956	698	997	1,425
2023	902	587	838	1,198	877	563	805	1,150
2024	880	604	862	1,232	1,015	621	887	1,267
2025	939	613	876	1,251	1,027	603	861	1,230
2026	915	563	805	1,150	941	589	842	1,203
2027	854	584	834	1,192	882	602	861	1,229
2028	891	600	856	1,224	886	587	839	1,199
2029	946	628	898	1,283	994	631	901	1,288
2030	923	622	888	1,269	952	554	792	1,131
2031	1,013	719	1,026	1,466	905	575	821	1,173
2032	939	567	809	1,156	910	550	786	1,123
2033	887	590	842	1,203	957	604	863	1,233
2034	911	609	870	1,243	978	643	918	1,312
2035	960	584	834	1,191	874	563	804	1,148
2036	907	589	841	1,201	889	609	870	1,243
2037	1,023	662	946	1,351	963	601	859	1,227
2038	903	598	855	1,221	964	596	852	1,217
2039	944	607	868	1,239	989	652	931	1,330
2040	939	593	848	1,211	963	653	933	1,333
2041	991	643	918	1,312	968	578	825	1,179
2042	867	578	826	1,180	968	596	852	1,217
2043	867	576	823	1,175	983	622	888	1,269
2044	878	569	812	1,161	883	585	836	1,194
2045	941	673	961	1,373	890	597	853	1,219

아. 시금치 농업용수 수요량 산정

향후 30년간 RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 시금치의 시기별 농업용수 수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도에는 잠재증발산량 875 mm, 온실증발산량 416 mm가 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 경우 용수 수요량은 848 mm가 된다. 2045년의 잠재증발산량은 802 mm, 온실증발산량 374 mm, 용수 수요량은 764 mm로 2016년 용수 수요량에 비해 10 % 정도 감소한 것으로 나타났다. RCP 4.5 시나리오가 기준이 되었을 때는 2035년의 용수 수요량이 873 mm로 가장 큰 것으로 산정되었다.

RCP 8.5 시나리오를 이용하여 시금치의 농업용수 수요량 산정결과, 2016년도 잠재증발산량은 798 mm, 온실증발산량 526 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 경우 2016년의 용수 수요량은 751 mm였으며, 2045년은 2016년에 비해 3 % 감소한 732 mm로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 2039년에 874 mm로 용수 수요량이 가장 큰 것으로 나타났다.

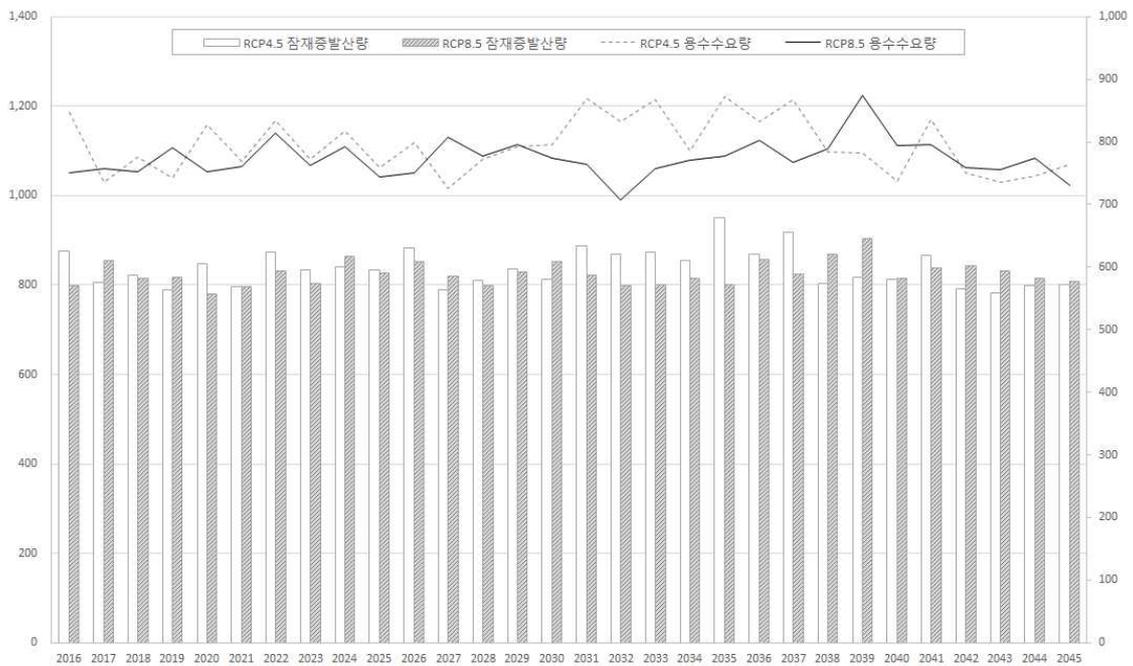


그림 2.15 시금치의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.17 시금치의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	875	416	594	848	798	368	526	751
2017	806	361	516	737	854	371	530	757
2018	822	380	543	775	815	368	526	752
2019	789	364	520	743	818	387	553	790
2020	847	405	579	828	779	369	527	753
2021	797	377	538	769	797	373	532	760
2022	874	409	585	835	831	399	571	815
2023	833	378	541	772	803	374	534	762
2024	841	401	573	818	864	389	555	793
2025	833	372	532	760	827	365	521	744
2026	883	392	560	800	852	368	526	751
2027	789	356	508	726	820	396	565	808
2028	809	378	540	772	798	381	545	778
2029	836	389	555	793	829	390	557	796
2030	813	390	557	795	852	380	542	775
2031	887	426	609	870	823	375	535	764
2032	870	408	583	832	798	347	496	708
2033	874	425	607	867	802	372	531	758
2034	854	386	551	787	816	377	539	770
2035	950	428	611	873	801	381	545	778
2036	870	408	583	833	858	393	562	803
2037	919	425	607	868	824	376	537	767
2038	804	384	549	784	869	386	552	789
2039	818	383	548	782	904	428	612	874
2040	812	362	517	738	816	389	556	795
2041	867	409	585	836	839	390	557	795
2042	791	368	526	752	843	372	532	760
2043	783	361	516	737	832	370	529	755
2044	798	365	522	746	815	379	542	774
2045	802	374	535	764	808	358	512	732

자. 방울토마토 농업용수 수요량 산정

RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~2045년)를 이용하여 향후 30년간 방울토마토의 시기별 농업용수 수요량을 산정한 결과는 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 949 mm, 온실증발산량 514 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하면 용수 수요량은 1,050 mm로 산정되었다. 2045년의 잠재증발산량은 899 mm, 온실증발산량 474 mm, 용수 수요량은 967 mm로 2016년에 비해 8% 정도 감소한 것으로 나타났으며, RCP 4.5 시나리오에서는 2031년의 용수 수요량이 1,053 mm로 가장 크게 나타났다.

RCP 8.5 시나리오를 기준으로 방울토마토의 시기별 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도 잠재증발산량은 887 mm, 온실증발산량은 468 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량의 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 경우 용수 수요량은 2016년에는 956 mm, 2045년에는 919 mm로 2016년에 비하여 4 % 정도 감소한 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 2037년의 용수 수요량이 1,008 mm로 가장 크게 나타났다.

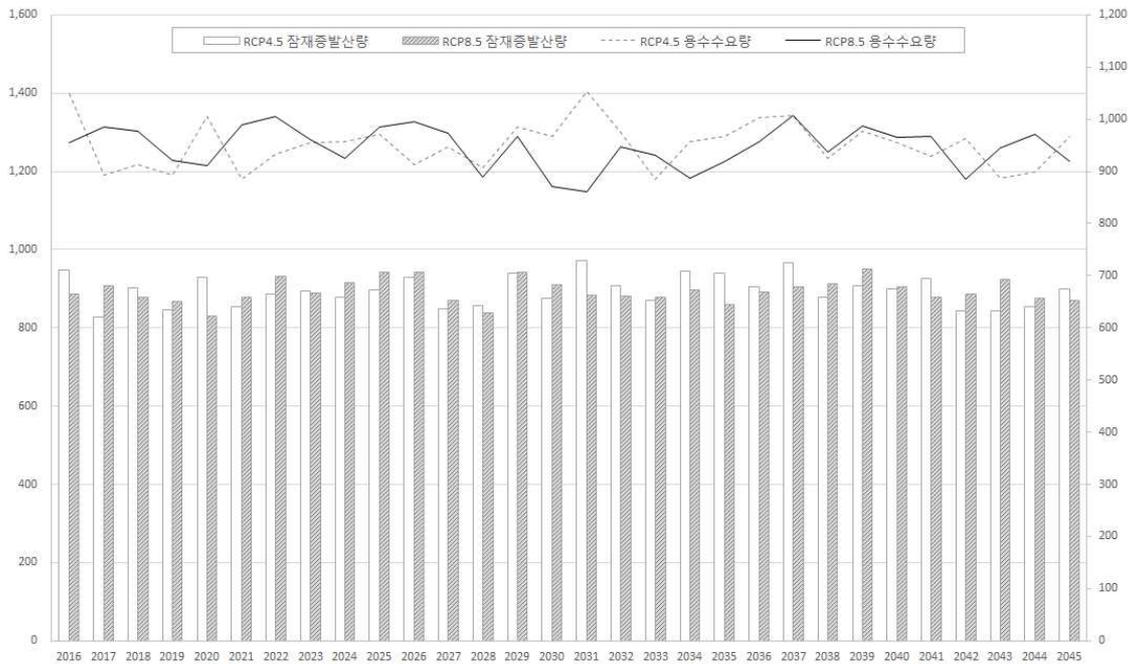


그림 2.16 방울토마토의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.18 방울토마토의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	949	514	735	1,050	887	468	669	956
2017	827	438	626	894	908	483	689	985
2018	902	448	640	914	879	479	684	978
2019	845	438	626	894	869	451	644	920
2020	928	492	703	1,005	829	446	637	911
2021	855	434	620	886	877	485	693	990
2022	887	457	653	932	932	492	703	1,005
2023	894	468	669	956	890	471	673	962
2024	877	469	670	958	917	453	647	924
2025	898	476	681	972	942	483	690	986
2026	929	448	640	914	941	488	697	996
2027	849	464	663	947	870	477	681	973
2028	857	444	635	907	837	435	622	889
2029	940	483	690	985	943	474	677	967
2030	875	474	677	967	910	427	610	871
2031	972	516	737	1,053	883	422	603	861
2032	907	478	683	975	880	464	663	948
2033	871	434	619	885	878	456	652	931
2034	946	469	671	958	896	435	622	888
2035	940	474	678	968	858	451	644	920
2036	904	492	702	1,003	893	469	670	958
2037	967	494	705	1,007	905	494	705	1,008
2038	879	453	647	925	913	460	657	938
2039	907	478	684	976	952	484	691	988
2040	900	469	669	956	905	473	675	964
2041	926	456	651	930	879	474	677	967
2042	843	472	674	963	887	433	619	884
2043	845	435	621	888	923	463	661	944
2044	855	441	630	900	875	476	680	971
2045	899	474	677	967	870	450	643	919

차. 열갈이배추 농업용수 수요량 산정

열갈이배추의 농업용수 수요량 산정을 위해 RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2016년~ 2045년)를 이용하여 향후 30년간 고추의 잠재증발산량, 필요수량 등을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 2016년도의 잠재증발산량은 875 mm, 온실증발산량 357 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 때 용수 수요량은 729 mm로 산정되었다. 2045년의 잠재증발산량은 802 mm, 온실증발산량 321 mm, 용수 수요량은 656 mm로 2016년에 비해 10 % 정도 감소한 것으로 나타났으며, RCP 4.5 시나리오가 기준이 되었을 때는 2031년의 용수 수요량이 795 mm로 가장 큰 것으로 나타났다.

RCP 8.5 시나리오를 기준으로 열갈이배추의 시기별 농업용수 수요량을 산정한 결과, 2016년도의 잠재증발산량은 798 mm, 온실증발산량 340 mm로 산정되었다. 재배관리용수량 (필요수량의 30 %)과 관개효율 70 %를 적용하였을 때 용수 수요량은 2016년에 694 mm, 2045년에는 2016년에 비해 12 % 정도 감소한 612 mm로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 2039년에 759 mm로 용수 수요량이 가장 큰 것으로 나타났다.

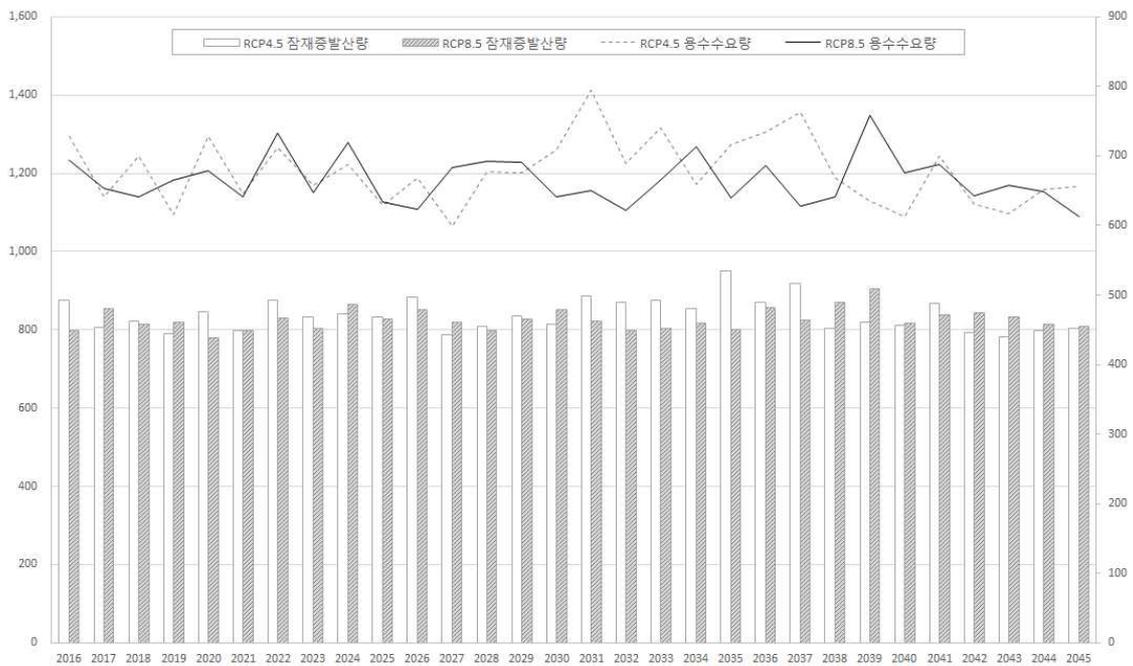


그림 2.17 열갈이배추의 시기별 농업용수 수요량 (2016~2045)

표 2.19 열갈이배추의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2016~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2016	875	357	510	729	798	340	486	694
2017	806	315	449	642	854	320	457	653
2018	822	343	490	700	815	314	449	641
2019	789	302	431	616	818	326	466	665
2020	847	357	510	728	779	333	475	679
2021	797	316	452	646	797	314	449	642
2022	874	349	499	712	831	359	513	732
2023	833	322	461	658	803	317	453	647
2024	841	337	482	688	864	352	503	719
2025	833	308	441	629	827	311	444	634
2026	883	328	468	669	852	305	436	623
2027	789	294	420	600	820	335	479	684
2028	809	332	474	677	798	340	485	693
2029	836	331	473	676	829	338	484	691
2030	813	347	496	709	852	314	449	642
2031	887	390	556	795	823	319	456	651
2032	870	338	483	690	798	305	435	621
2033	874	363	518	740	802	326	465	665
2034	854	323	462	660	816	349	499	713
2035	950	351	501	716	801	313	448	640
2036	870	360	514	734	858	336	480	686
2037	919	374	534	763	824	307	439	627
2038	804	327	468	668	869	314	448	641
2039	818	311	445	635	904	372	531	759
2040	812	300	429	613	816	332	474	677
2041	867	343	490	700	839	337	482	688
2042	791	309	441	631	843	315	450	643
2043	783	303	433	618	832	322	461	658
2044	798	320	457	652	815	318	455	649
2045	802	321	459	656	808	300	429	612

5. 기수담수화 시스템 현장지구의 농업용수 수요량 분석

가. 광양지구의 대상작물 및 작물계수

기수담수화 시스템을 설치·운영한 광양현장지구는 애호박을 재배하고 있으며, 일반적인 노지재배 형태의 시설재배방법을 적용하고 있었다. 작부체계는 10월에 파종하여, 11월부터 수확을 실시하며 다음해 6월까지 수확을 진행하는 것으로 조사되었다. 강수량이 풍부한 7월부터 9월까지는 시설재배지의 비닐멀칭을 걷어 주로 자연강우를 통해 시설재배지 토양의 염화를 방지하고자 하는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 10월 한 달을 작물생육 초기로 설정하고, 수확이 시작되는 11월부터 12월까지 2개월을 생장기로 가정하였다. 또한, 일정수준 이상의 수확량이 담보되고 작물생육이 가장왕성한 시기인 1월부터 4월까지 4개월 동안을 중기, 5월부터 6월까지 2개월을 작물생육 후기로 각각 가정하였다. 작부체계에 따른 작물계수는 FAO (1998)의 애호박에 대한 초기, 중기, 그리고 후기 작물계수를 적용하였으며, 생장기와 후기에는 선형보간을 통해 작물계수를 수정하여 적용하였다.

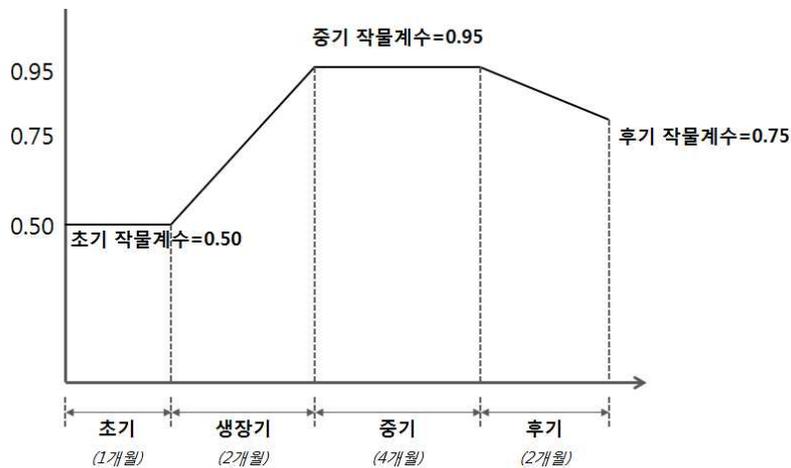


그림 2.18 광양지구의 애호박 작물계수

나. 실제 관측자료를 이용한 농업용수 수요량 산정

전남 광양시 진상면에 위치한 청암뜰의 애호박에 대한 잠재증발산량을 추정하기 위하여 인근 광양 기상관측소 자료를 이용하고자 하였으나, 2011년 3월부터 자료가 관측되어 관측 연수가 너무 부족하여, 그 다음으로 근접한 남해 기상관측소 자료 (1973년~)를 활용하였다. 최저기온, 최고기온, 평균기온, 강수량, 평균풍속, 상대습도, 일조시간 등의 기상자료를 이용하여 FAO Penman-Monteith 식으로부터 잠재증발산량을 산정하였으며, 이 때, 작물재배기간인 10월부터 이듬해 6월까지를 1년으로 하였다. 즉, 1973년 10월부터 1974년 6월까지를 1973년으로 표기, 2016년 10월부터 2017년 6월까지를 2016년으로 표기하였다.

1973년~2016년까지 애호박의 작물생육기간동안 잠재증발산량은 평균 2.21 mm/day 였으며, 평년의 기준인 과거 30년 (1987~2016년)동안 잠재증발산량은 평균 2.23 mm/day로 나타났다. 실측자료를 바탕으로 잠재증발산량 및 온실증발산량, 필요수량, 용수수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가장 최근인 2016년(2016년 10월~2017년 6월)의 잠재증발산량은 609 mm였으며, 재배관 리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용할 경우 용수 수요량은 888 mm로 산정되었다. 잠재증발산량의 경우 평년 (1987~2016) 603 mm 대비 약 6 mm 증가, 과거 44년 (1973~2016) 608 mm 대비 약 1 mm 증가하였으며, 용수수요량은 평년 (1987~2016) 869 mm 보다 약 19 mm 증가, 과거 44년 (1973~2016) 876 mm 보다 약 12 mm 증가된 것으로 나타났다.

표 2.20 애호박의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (1973~2016)

(단위: mm)

구분	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	구분	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
1973	618	435	622	888	1995	596	420	600	857
1974	605	428	612	874	1996	650	459	656	938
1975	581	407	581	830	1997	603	422	603	861
1976	580	410	586	837	1998	603	426	608	869
1977	636	451	644	920	1999	630	448	640	915
1978	584	412	588	841	2000	617	438	626	894
1979	586	409	584	834	2001	653	460	657	939
1980	551	391	559	798	2002	612	428	612	874
1981	578	408	583	833	2003	611	432	618	882
1982	593	418	598	854	2004	621	439	627	896
1983	592	418	598	854	2005	581	410	585	836
1984	576	407	581	830	2006	626	442	631	902
1985	618	437	624	892	2007	589	417	596	852
1986	605	427	609	871	2008	638	452	645	922
1987	624	439	627	896	2009	598	418	597	852
1988	638	448	640	914	2010	590	416	595	850
1989	644	453	647	924	2011	586	415	592	846
1990	577	403	575	821	2012	599	423	604	863
1991	571	403	575	822	2013	599	423	604	863
1992	606	426	609	870	2014	575	407	582	831
1993	601	424	606	866	2015	585	413	590	844
1994	618	435	622	888	2016	609	435	622	888

다. 기후변화 시나리오를 이용한 농업용수 수요량 산정

RCP 4.5, 8.5 시나리오 자료 (2017년~2046년)를 이용하여 향후 30년간의 시기별 애호박의 농업용수 수요량을 산정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, RCP 4.5 시나리오를 기준으로 시기별 농업용수 수요량을 산정한 결과를 살펴보면, 2017년(2017년 10월~2018년 6월)의 잠재증발산량은 1,009 mm, 온실증발산량은 474 mm로 산정되었으며, 재배관리용수량 (필요수량 30 %)과 관개효율 70 %를 적용할 경우 용수 수요량은 968 mm가 산정된다. 2045년 (2045년 10월~2046년 6월)의 잠재증발산량은 948 mm, 온실증발산량 447 mm로 산정되었으며, 913 mm의 용수 수요량이 산정되었다. RCP 4.5 시나리오의 경우 용수 수요량은 2030년 (2030년 10월~2031년 6월)의 용수 수요량이 1,048 mm로 가장 큰 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오를 기준으로 애호박의 농업용수 수요량을 산정하면, 2017년 (2017년 10월~2018년 6월)의 잠재증발산량은 1,024 mm, 온실증발산량 479 mm로 산정되었다. 용수 수요량의 경우 2017년 (2017년 10월~2018년 6월) 978 mm, 2045년 (2045년 10월~2046년 6월)에는 934 mm로 산정되었으며, 2021년 (2021년 10월~2022년 6월)의 용수 수요량이 1,042 mm로 가장 큰 것으로 산정되었다.

앞서 실제 관측자료를 이용하여 산정한 농업용수 수요량의 평년 (1987~2016)값과 비교해보면, 잠재증발산량의 경우 평년 608 mm보다 작을 것으로 예상되는 해는 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 모두 없었으며, 용수 수요량의 경우 RCP 4.5 시나리오의 2018년 (2018년 10월~2019년 6월) 856 mm, 2020년 (2020년 10월~2021년 6월) 847 mm로 2번을 제외한 나머지년도, RCP 8.5 시나리오의 2019년 (852 mm), 2029년 (862 mm)과 2030년 (853 mm), 2034년 (846 mm) 4번을 제외한 모든 년도에서 평년 869 mm보다 크게 산정되었다.

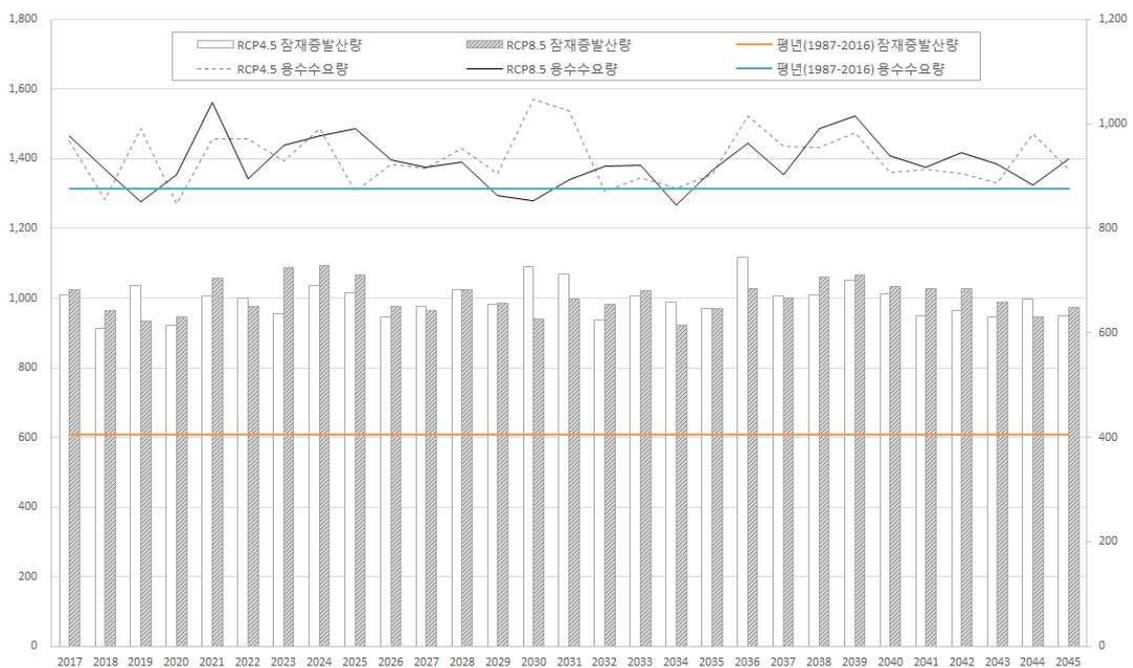


그림 2.19 애호박의 시기별 농업용수 수요량 (2017~2045)

표 2.21 애호박의 기후변화 시나리오별 용수량 산정결과 (2017~2045)

(단위: mm)

구분	RCP 4.5 시나리오				RCP 8.5 시나리오			
	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량	잠재 증발산량	온실 증발산량	필요수량	용수 수요량
2017	1,009	474	677	968	1,024	479	685	978
2018	914	419	599	856	963	447	639	913
2019	1,036	486	694	992	933	417	596	852
2020	922	415	593	847	945	443	633	904
2021	1,007	475	679	970	1,057	510	729	1,042
2022	1,000	476	680	972	975	438	626	895
2023	954	455	650	929	1,087	470	671	959
2024	1,037	486	694	992	1,094	479	685	978
2025	1,014	427	610	871	1,066	485	693	991
2026	945	452	646	923	975	457	652	932
2027	977	448	640	915	965	449	641	916
2028	1,025	467	668	954	1,023	455	650	928
2029	982	444	634	906	985	423	604	862
2030	1,089	513	733	1,048	938	418	597	853
2031	1,070	503	718	1,026	997	437	625	893
2032	936	427	610	872	981	450	643	919
2033	1,007	439	628	897	1,021	452	645	922
2034	988	430	614	878	922	414	592	846
2035	969	442	632	903	971	447	638	911
2036	1,118	497	710	1,015	1,028	472	674	963
2037	1,005	469	671	958	1,001	442	632	903
2038	1,008	468	669	955	1,061	486	694	991
2039	1,051	481	688	982	1,066	498	711	1,016
2040	1,012	445	636	908	1,032	460	658	939
2041	948	447	639	913	1,026	449	641	916
2042	965	443	633	905	1,028	463	662	945
2043	947	435	622	888	987	453	647	924
2044	998	481	687	981	947	433	619	884
2045	948	447	639	913	974	458	654	934

* 2017년 10월~2018년 6월을 2017년 ... 2045년 10월~2046년 6월을 2045년으로 표기

제3절 주요 시설원에 작물의 염도수준별 작물생육평가

작물생육에 큰 영향을 미치는 영농환경의 영향을 최소화하기 위해 시설재배방법이 광범위하게 이용되고 있다. 전 세계적으로 시설재배를 통한 작물생산은 증가추세에 있으며 온실면적이 405,000 ha에 이르는 것으로 추정되고 있다 (FAO, 2013). 우리나라의 시설작물 재배면적은 2013년 현재 86,795 ha이며, 시설채소용 온실면적은 60,226 ha, 화훼용 온실면적은 2,674 ha으로 시설재배가 활발히 이루어지고 있다 (농림축산식품부, 2014). 특히, 농림축산식품부는 미처분상태 및 공사 시행 중인 간척지 12개 지구에 대해 지구별 특성화 방향과 용도별 면적을 설정한 대규모 간척지 활용 기본구상을 통해 화용, 시화, 석문, 이원, 남포, 고흥, 영산강, 그리고 새만금 간척지에 대해 첨단수출원예단지 3,000 ha, 일반원예단지 2,185 ha 등 총 5,185 ha의 시설재배지 조성을 고시한 바 있다 (농림수산식품부, 2010).

간척지와 같은 염해우심지역은 토양 및 관개용수의 염도문제로 인해 채소작물 등 염해에 민감한 작물의 재배가 어렵다 (이슬비 등, 2008). 농업용수로서 적합한지를 결정하는 중요한 수질 항목인 염분은 작물의 생육을 저해하거나, 말라 죽게 하는 요소이다 (Grattan 등, 2002). 높은 염분은 토양수분포텐셜을 낮추어 작물이 수분과 영양분을 흡수하기 어렵게 만듦으로써 작물의 생산성을 저하시키기 때문에 1950년대부터 농업용수 수질의 적합성을 판단하는 가장 중요한 항목으로 사용되고 있다 (Beltran, 1999; Bauder 등, 2011). 따라서 상당 수준의 염분이 포함된 관개용수를 사용할 경우 대상작물의 내염성을 평가하고 적절한 관리방안을 마련할 필요가 있다.

관개용수의 염도수준에 따른 채소작물의 내염성에 대한 연구가 다양한 작물을 대상으로 수행된 바 있다 (Singh 등, 1992; Shannon과 Grieve, 1999; Tedeschi와 Dell'Aquila, 2005). Bustan 등 (2004)는 이스라엘에서 1992년부터 1997년까지 6년 동안의 감자생육 실험을 통해 염분을 포함한 관개용수의 감자 수확량에의 영향을 조사하였으며, 감자의 수확량은 관개용수 중 염분 농도의 영향뿐만 아니라 장기간의 무더위와 같은 기후와의 상호작용의 영향도 큰 것으로 평가하였다. 또한, Food and Agriculture Organization (FAO)에서는 채소작물의 내염성 실험결과로부터 채소작물별 관개용수의 염도 임계치 (threshold)와 염도 수준에 따른 예상되는 수확량을 제시한 바 있으며, 채소작물이 재배되는 기후와 토양 등의 영농조건에 따라 다른 생육반응을 보일 수 있음을 언급한 바 있다 (Ayers와 Westcot, 1985). 우리나라의 경우 작물의 염해에 대한 연구가 많이 수행되지 않았으며, 수행된 연구의 경우에도 벼와 보리 등과 같은 곡류작물 위주의 연구가 수행된 바 있다 (심상인 등, 1998). 시설재배지의 경우, 일반 노지와 달리 온실 피복재에 의한 강수의 차단으로 관개용수 중 염분의 토양축적이 용이하고 작물의 증산활동을 포함한 작물생육환경에 차이가 있기 때문에 (FAO, 2013), 관개용수의 염도 수준에 대한 별도의 작물생육실험이 필요하다. 따라서 본 절에서는 주요 시설 원예작물들을 대상으로 염도수준에 따른 작물생육 실험을 통해 생육과정 모니터링 및 수질·토양 환경 등을 분석하였다.

1. 실험설계

가. 실험온실

염도수준에 따른 작물생육 실험을 위해 서울대학교 평창캠퍼스의 온실시설을 임대하였으며, 온실 면적은 259.2m², 정량펌프 (50 ml/분)를 활용한 점적관개시스템이 설치되어 있다.



그림 3.1 실험온실 전경

나. 대상작물

관개용수의 염도수준에 따른 작물생육 실험을 위한 대상작물은 1) 실제 시설재배지에서 많이 재배되는 작물⁶⁾이며, 2) 재배가 용이하고, 3) 내염성 (salt tolerance)이 높은 것 작물과 낮은 작물 모두 포함되어야 하며, 4) 생육기간이 비교적 짧은 작물을 기준으로 선정하였다. 기존의 연구결과를 참고하여 위의 기준들에 적합한 상추, 당근, 20일무, 얼갈이배추, 아스파라거스, 딸기, 시금치 총 7가지의 채소작물을 선정하였다.

내염성 기준으로 내염성이 큰 작물인 아스파라거스 (*A. plumosus var. nanus*, 아시아종묘, 아틀란틱 아스파라거스), 내염성이 보통인 상추 (*Lactuca sativa L.*, 권농종묘, 선풍포참적축면 상추)와 시금치 (*Spinacia oleracea L.*, 아시아종묘, 수시로 시금치), 얼갈이배추 (*Brassica campestris ssp. pekinensis*, ㈜신젠타코리아, 삼보엿갈이)와 20일무 (*Raphanus sativus L.*, 아시아종묘, 20일무·코메트), 내염성이 작은 당근 (*Daucus carota L.*, ㈜농우바이오, 선홍봄5촌)과 딸기 (*Fragaria spp.*, 도시농부, 레드문)로 나눌 수 있다. 얼갈이배추나 20일무는 기존의 연구결과가 없어 양배추와 무의 임계수준을 적용하여 실험을 실시하였다.

6) 상추는 전체 시설재배면적 89,541 ha 중 3,519 ha에 재배되고 있으며 (3.9%), 전체 작물 중 6번째로 많이 재배되는 작물이다. 수박 (14.2%), 토마토(7.1%), 딸기(7.0%), 참외(6.3%), 풋고추(5.6%), 상추 순으로 재배되고 있다.

표 3.1 염도수준이 다른 관개용수의 장기적인 관개에 따른 수확량 예측결과 (Mass 와 Grattan, 1999) (Unit: EC_w)

채소 및 줄뿌림 작물	100% 수확량	90% 수확량	75% 수확량	50% 수확량	민감도분류
아스파라거스 (Asparagus)	2.7	6.1	11.1	19.4	T
서양호박(주키니) (Zucchini)	3.1	3.8	4.9	6.7	MT
사탕무 (Beet, red)	2.7	3.4	4.5	6.4	MT
브로콜리 (Broccoli)	1.9	2.6	3.7	5.5	MS
꽃양배추 (Cauliflower)	1.9	2.6	3.7	5.5	MS
오이 (Cucumber)	1.7	2.2	2.9	4.2	MS
토마토 (Tomato)	1.7	2.3	3.4	5.0	MS
시금치 (Spinach)	1.3	2.2	3.5	5.7	MS
셀러리 (Celery)	1.2	2.3	3.9	6.6	MS
양배추 (Cabbage)	1.2	1.9	2.9	4.6	MS
감자 (Potato)	1.1	1.7	2.5	3.9	MS
사탕옥수수 (Corn, sweet)	1.1	1.7	2.5	3.9	MS
후추 (Pepper)	1.0	1.5	2.2	3.4	MS
고구마 (Sweet potato)	1.0	1.6	2.5	4.0	MS
상추 (Lettuce)	0.9	1.4	2.1	3.4	MS
무 (Radish)	0.8	1.3	2.1	3.4	MS
가지 (Eggplant)	0.7	1.7	3.1	5.6	MS
순무 (Turnip)	0.6	1.3	2.5	4.3	MS
양파 (Onion)	0.8	1.2	1.8	2.9	S
당근 (Carrot)	0.7	1.1	1.9	3.0	S
콩 (Bean)	0.7	1.0	1.5	2.4	S
딸기 (Strawberry)	0.7	0.9	1.2	1.7	S

* Sensitive (S), moderately sensitive (MS), moderately tolerant (MT), tolerant (T)

다. 고랑실험

작물생육 실험은 고랑실험과 포트실험 2가지로 나누어 진행하였으며, 고랑실험은 다음 그림과 같이 실험고랑을 4처리 2반복 형태로 설계하였다. 고랑실험은 생육기간이 매우 짧고, 재배가 용이한 상추를 대상으로 2회 수행하였다. 상추는 권농종묘의 선풍포집적축면 상추를 파종하여 각 염도별 관개용수로 육묘(포트육묘)하였으며, 4주가 지난 뒤 모종을 정식하였다. 고랑에는 (주)서울바이오에서 판매하는 바로커 상토로 고랑 당 400 L를 채워 재배하였으며, 모종 간격은 점적관개호스의 이미터 간격인 30 cm를 따랐다.

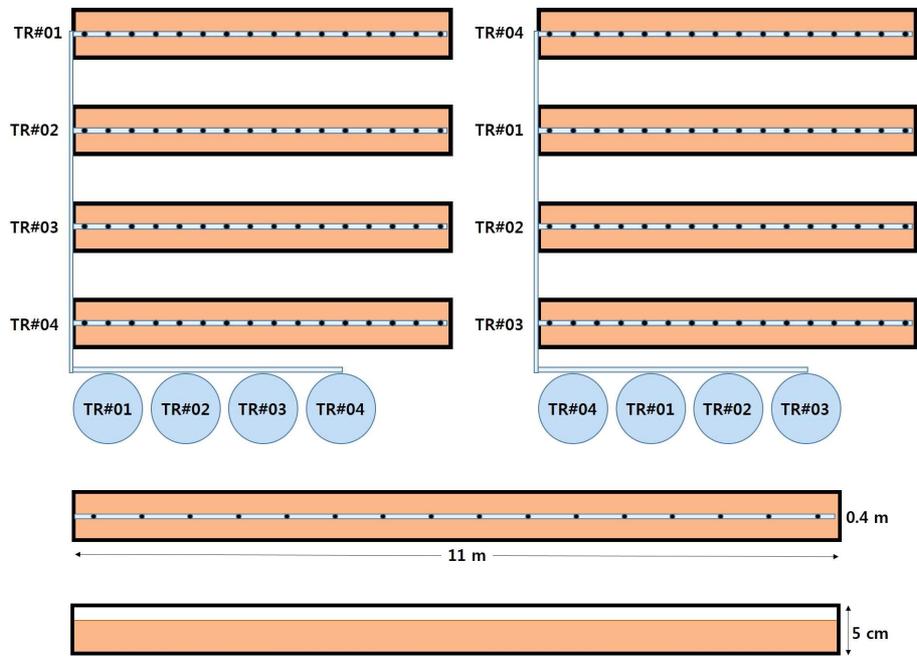


그림 3.2 실험온실 전경



그림 3.3 실험고랑



그림 3.4 온실 관개시스템

라. 포트실험

포트실험은 고랑실험에서 수행했던 상추를 포함하여 총 7개 작물별로 5처리 3반복으로 진행하였으며, 작물별 관개용수의 염도수준은 기존 연구들의 작물별 염도 한계수준 (threshold)을 참고하여 이에 전후한 농도수준을 결정하였다.

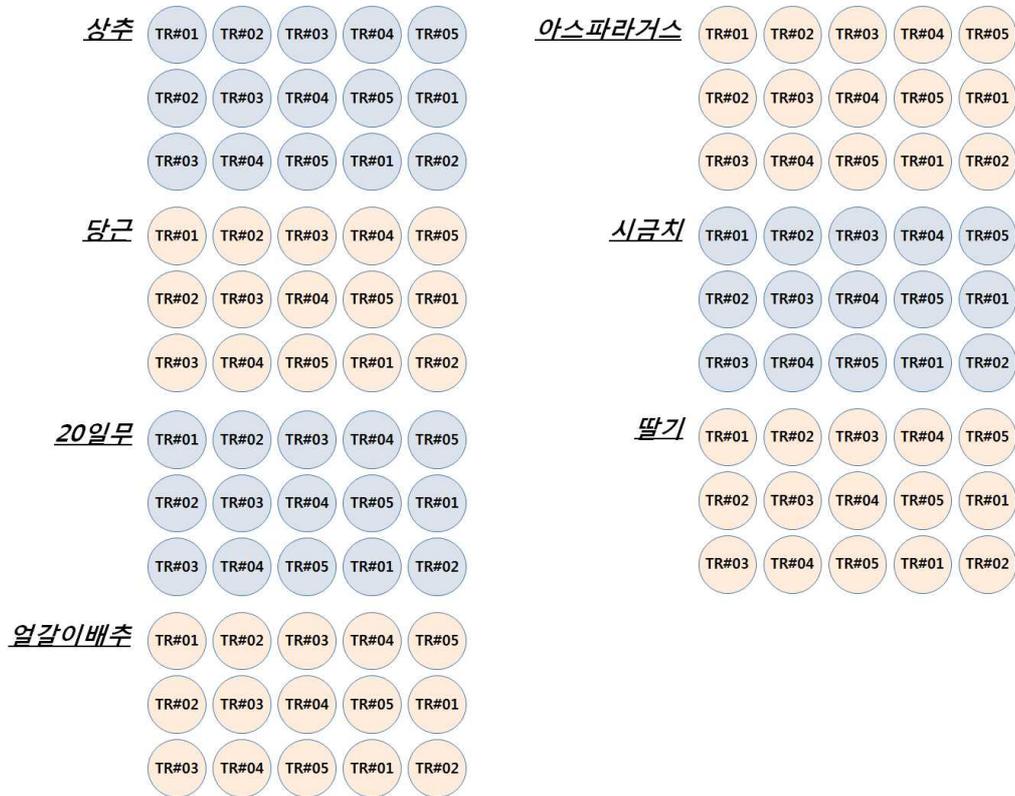


그림 3.5 포트실험 설계

마. 염도설정

염도수준은 Ayers와 Westcot (1985)에서 관개용수의 염도에 대해 제안한 바 있는 수질기준과 관개용수 염도에 따른 작물생육 연구결과를 참고하여 고랑 및 포트실험의 관개용수 염도를 설정하였다. 고랑실험의 경우 0.3 dS/m 정도 수준의 상수도물과 기존 연구에서 제안된 상추의 100% 수확량 임계수준인 0.9 dS/m, 75% 수확량 임계수준인 2.1 dS/m, 50% 수확량 임계수준인 3.4 dS/m를 대상염도로 설정하였으며, 포트실험의 경우에는 기존 고랑실험과는 달리 100% 수확량 임계수준과 90% 수확량 임계수준을 기준으로 염도에 대한 수확량 감소기울기 수준을 고려하여 설정하였다.

표 3.2 관개용수 수질지침 (Ayers와 Westcot, 1985)

Irrigation problem	Degree of problem			
	No problem	Increasing problem	Severe problem	
Salinity (affects crop water availability)				
EC_w (dS/m)	<0.75	0.75-3.0	>3.0	
Permeability (affects infiltration rate into soil)				
EC_w (dS/m)	>0.5	0.5-0.2	<0.2	
adjusted SAR	Montmorillonite	<6	6-9	>9
	Illite-Vermiculite	<8	8-16	>16
	Kaolinite-sesquioxides	<16	16-24	>24

표 3.3 관개용수 및 토양 염도수준에 따른 작물생육 영향 (Ayers와 Westcot, 1985)

Vegetable crops	100% yield		90% yield		75% yield		50% yield		0% yield	
	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w	EC_e	EC_w
서양호박 (Zucchini)	4.7	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10
사탕무 (Beet, red)	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
브로콜리 (Broccoli)	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
토마토 (Tomato)	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
오이 (Cucumber)	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
시금치 (Spinach)	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10
셀러리 (Celery)	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
양배추 (Cabbage)	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
감자 (Potato)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
고구마 (Sweet potato)	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
후추 (Pepper)	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
상추 (Lettuce)	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
무 (Radish)	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
딸기 (Strawberry)	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4.0	2.7
양파 (Onion)	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
당근 (Carrot)	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
콩 (Bean)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
순무 (Turnip)	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12	8.0

설계한 실험설계 방법에 따라 수행한 상추, 당근, 20일무, 열갈이배추, 아스파라거스, 시금치, 딸기 총 7개 채소작물의 실험조건 및 처리구별 염도기준은 다음과 같다.

표 3.4 각 작물별 실험조건 및 처리구별 염도기준

실험방식 구분		실험작물		실험조건				처리구별 염도기준 (EC, unit: dS/m)				
실험구분	관개방식	대상작물	염도민감도*	처리구	반복수	총작물수	실험회수	처리구 1	처리구 2	처리구 3	처리구 4	처리구 5
고랑실험	점적관개	상추	MS	4	2	40	2	0.29 (물,상수도)	0.9 (100%수확량)	2.1 (75%수확량)	3.4 (50%수확량)	
포트실험	지표관개	상추	MS	5	3	15	3	0.31 (물,상수도)	0.7	0.9 (100%수확량)	1.1	1.4 (90%수확량)
	지표관개	당근	S	5	3	15	1	0.29 (물,상수도)	0.5	0.7 (100%수확량)	0.9	1.1 (90%수확량)
	지표관개	20일무	MS	5	3	15	2	0.31 (물,상수도)	0.6	0.8 (100%수확량)	1	1.3 (90%수확량)
	지표관개	얼갈이배추	MS	5	3	15	2	0.31 (물,상수도)	0.9	1.2 (100%수확량)	1.5	1.9 (90%수확량)
	지표관개	당근	S	5	3	15	1	0.29 (물,상수도)	0.5	0.7 (100%수확량)	0.9	1.1 (90%수확량)
	지표관개	아스파라거스	MT	5	3	15	1	0.34 (물,상수도)	1.5	2.7 (100%수확량)	4	6.1 (90%수확량)
	지표관개	딸기	S	5	3	15	1	0.30 (물,상수도)	0.6	0.7 (100%수확량)	0.8	0.9 (90%수확량)
	지표관개	시금치	MS	5	3	15	2	0.28 (물,상수도)	0.9	1.3 (100%수확량)	1.7	2.2 (90%수확량)

* Sensitive (S), moderately sensitive (MS), moderately tolerant (MT), tolerant (T)

2. 작물생육 모니터링

가. 관개량

먼저, 고랑실험의 관개용수 공급은 정량펌프를 사용하여 이루어졌으며, 관개시간을 모니터링하여 매일 기록하였다. 기록된 일별 관개시간을 바탕으로 정량펌프의 용량 50 ml/분을 고려하여 일별 관개량을 산정하였다. 포트실험의 경우 관개할 때마다 500 ml 비커를 사용하여 관개를 실시하고 관개량을 기록하였다.



그림 3.6 포트실험 관개용수



그림 3.7 포트실험 관개 모습

나. 수질환경

관개용수 수질 중 염도수준은 EC측정기 (HI-98192)를 사용하여 매주 EC를 측정하여 각 작물별로 설정한 관개용수의 염도가 유지될 수 있도록 하였다. 또한, 관개용수는 모두 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM, national instrumentation center for environmental management)에서 수질오염공정시험기준 (환경부, 2014)을 준용하여 pH, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, SS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-N , Fe 등 16개 항목을 대상으로 분석하였다.

다. 토양환경

토양은 작물생육시기를 고려하여 처리구별 파종일과 수확일 총 2회에 걸쳐 실시하였다. 토양성분 분석항목은 pH, EC, CEC, T-N, T-P, P_2O_5 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , 유기물함량 등 11개 항목을 대상으로 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)에서 ASA (american society of agronomy)와 SSSA (soil science society of america) 토양분석방법 (Chapman과 Pratt, 1961)에 준용하여 분석하였다.

라. 생육환경

작물생육조사는 매주 실험 작물별로 이루어졌으며, 상추와 얼갈이배추의 경우 엽수, 엽장, 엽폭, 당근과 20일무는 엽수와 엽장, 아스파라거스는 가지수와 가지길이, 시금치는 초장, 엽수, 엽장, 엽폭, 딸기는 초장과 엽수 및 엽장, 엽병장, 꽃수에 대한 생육조사를 실시하였다.



그림 3.8 고랑실험(상추 예) 생육조사



그림 3.9 포트실험(상추 예) 생육조사

마. 수확량

수확량은 수확 후 생체중량을 중심으로 조사하였다. 상추와 얼갈이배추, 아스파라거스, 시금치, 딸기는 전체중량과 뿌리를 제외한 상부 생체중량에 대해 조사 및 분석하였으며, 20일 무와 당근은 전체중량과 상부를 제외한 뿌리 생체중량에 대한 조사 및 분석을 실시하였다.

바. 식물체 성분

식물체 성분 분석은 염도에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na^+ 에 대해 수확한 작물들을 대상으로 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM)에서 토양 및 식물체 분석법(농업과학기술원, 2010)을 준용하여 분석하였다.

위에서 설계한 실험설계 방법에 따라 상추, 당근, 20일무, 얼갈이배추, 아스파라거스, 시금치, 딸기 7개 채소작물을 대상으로 생육 및 수질·토양 모니터링을 실시하였다. 각 작물별 파종 및 수확시기는 다음과 같으며, 생육전경의 모습은 아래 그림들과 같다.

표 3.5 작물별 파종 및 수확시기

실험구분	작물	1차		2차		3차	
		파종일	수확일	파종일	수확일	파종일	수확일
고랑실험	상추	2015/03/13	2015/04/10	2015/04/24	2015/05/21		
포트실험	상추	2015/03/13	2015/05/08	2015/06/19	2015/08/04	2015/08/07	2015/09/24
	당근	2015/03/13	2015/06/08	2015/06/12	2015/09/04		
	20일무	2015/06/05	2015/07/10	2015/07/24	2015/08/28		
	얼갈이배추	2015/06/05	2015/07/10	2015/07/24	2015/08/28		
	아스파라거스	2015/05/22	2015/12/18				
	딸기	2016/03/24	2016/07/01				
	시금치	2016/03/24	2016/5/13	2016/05/13	2016/07/01		



(a) 고랑 상추 1차 파종 (15/03/13)



(b) 고랑 상추 1차 수확 (15/04/10)



© 고랑 상추 2차 파종 (15/04/24)



(d) 고랑 상추 2차 수확 (15/05/21)

그림 3.10 상추(고랑실험) 생육 전경



(a) 상추 1차 수확 (15/05/08)



(b) 상추 2차 수확 (15/08/04)



(c) 상추 3차 수확 (15/09/24)

그림 3.11 상추(포트실험) 실험의 생육 전경



(a) 20일무 1차 수확 (15/07/10)



(b) 20일무 2차 수확 (15/08/28)



그림 3.12 20일무 실험의 생육 전경



(a) 얼갈이배추 1차 수확 (15/07/10)



(b) 얼갈이배추 2차 수확 (15/08/28)

그림 3.13 얼갈이배추 실험의 생육 전경



(a) 당근 1차 수확 (15/06/08)



(b) 당근 2차 수확 (15/09/04)

그림 3.14 당근 실험의 생육 전경



그림 3.15 아스파라거스 실험의 생육 전경(15/12/18)



(a) 시금치 1차 수확 (16/05/13)



(b) 시금치 2차 수확 (16/07/01)



그림 3.16 시금치 실험의 생육 전경



그림 3.17 딸기 실험의 생육 전경 (16/07/01)

3. 염도수준별 작물 생육 평가

가. 상추(고랑실험)

(1) 관개량

고랑실험을 통한 상추 (*Lactuca sativa* L) 작물재배는 4주 동안 4개의 처리구 2반복으로 2차례 이루어졌다. 관개용수 공급은 정량펌프를 사용하여 이루어졌으며 1차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 18회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 100 L로 측정되었다. 2차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 17회이였으며, 처리구당 총 관개용수 공급량은 117.5 L로 측정되었다. 실험고랑 관개용수의 공급은 아래와 같이 이행하였다.

표 3.6 상추(고랑실험) 생육실험 관개량 (1차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/03/13	11:30	6.0	15/03/28	10:00	4.0
15/03/14	13:40	6.0	15/03/30	10:00	7.0
15/03/16	10:00	3.0	15/04/01	10:00	4.0
15/03/18	10:00	3.5	15/04/02	10:00	6.0
15/03/19	10:00	7.0	15/04/04	10:00	7.5
15/03/21	10:00	6.5	15/04/05	10:00	3.0
15/03/23	10:00	6.5	15/04/06	10:00	4.0
15/03/25	10:00	10.0	15/04/08	10:00	3.0
15/03/27	10:00	6.0	15/04/09	10:00	7.0
총계	100.0				

표 3.7 상추(고랑실험) 생육실험 관개량 (2차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/04/23	11:30	20.0	15/05/09	10:00	9.5
15/04/25	13:40	3.0	15/05/11	10:00	6.0
15/04/27	10:00	9.0	15/05/13	10:00	9.0
15/04/28	10:00	6.0	15/05/15	10:00	9.0
15/04/30	10:00	3.0	15/05/17	10:00	6.0
15/05/02	10:00	6.0	15/05/19	10:00	6.0
15/05/04	10:00	6.0	15/05/20	10:00	1.0
15/05/06	10:00	6.0	15/05/21	10:00	3.0
15/05/07	10:00	9.0			
총계	117.5				

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

상추의 1, 2차 생육기간동안 처리구별로 염도를 매주 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다. 1차 고랑실험 TR#01의 관개용수 염도수준은 0.3 dS/m로 나타났으며 나머지 관개용수는 염도에 대한 작물 수확량 감소 수준을 고려하여 EC 0.9 dS/m (TR#02, 100% 수확량 임계수준), 2.1 dS/m (TR#03, 75% 수확량 임계수준), 3.4 dS/m (TR#04, 50% 수확량 임계수준)가 되도록 염도수준을 유지시켜 주었다.

표 3.8 상추(고랑실험) 관개용수 염도 모니터링 (1차)

반복구	일자	EC _w			
		TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
1	15/03/19	0.342	0.931	2.199	3.120
	15/03/26	0.337	0.873	2.196	3.613
	15/04/02	0.313	0.827	2.118	3.329
	15/04/09	0.305	0.918	2.003	3.277
	평균	0.324	0.887	2.129	3.408
2	15/03/19	0.321	0.876	2.012	3.234
	15/03/26	0.343	0.905	2.114	3.410
	15/04/02	0.319	0.886	2.097	3.271
	15/04/09	0.357	0.970	2.076	3.376
	평균	0.335	0.909	2.075	3.323

2차 생육기간 TR#01의 염도수준은 EC 0.2 dS/m로 측정되었으며 다른 관개용수의 염도수준은 평균 0.9 dS/m (TR#02), 2.1 dS/m (TR#03), 3.4 dS/m (TR#04)로 유지되었다.

표 3.9 상추(고랑실험) 관개용수 염도 모니터링 (2차)

반복구	일자	EC _w			
		TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
1	15/04/23	0.241	0.894	2.111	3.412
	15/04/30	0.240	0.880	2.073	3.278
	15/05/07	0.243	0.920	2.061	3.435
	15/05/14	0.254	0.905	2.080	3.398
	15/05/21	0.245	0.871	2.098	3.506
	평균	0.245	0.894	2.085	3.406
2	15/04/23	0.237	0.894	2.187	3.436
	15/04/30	0.248	0.905	2.098	3.378
	15/05/07	0.248	0.927	2.160	3.501
	15/05/14	0.256	0.893	2.087	3.392
	15/05/21	0.236	0.905	2.085	3.447
	평균	0.245	0.905	2.123	3.431

처리구별 관개용수 수질을 평가하기 위하여 생육기간별 처리구 및 반복구당 2회 샘플링하여 분석하였다. pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온 그리고 음이온 등 16항목에 대하여 분석하였다.

1차 생육실험에 사용된 관개용수 수질 분석결과 pH는 1, 2반복구의 모든 처리구에서 평균 7.5~8.1로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5~8.5를 만족하는 것으로 나타났다. 영양염류 T-N의 경우 모든 처리구에서 4.4~4.7 mg/L 수준으로 나타났으며, T-P의 경우 모든 처리구에서 0.009 mg/L이하 수준의 값이 나타났다. 양이온 Na^+ 의 경우 TR#01에서 평균 9.9 mg/L로 나타났으며, TR#02 106.0 mg/L, TR#03 310.6 mg/L, TR#04 520.9 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 음이온 Cl^- 의 경우, TR#01에서 평균 23.0 mg/L로 나타났으며 최고 염도수준인 TR#04에서 842.2 mg/L로 나타나 염도수준이 높아질수록 Na^+ 와 비슷하게 값이 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

2차 생육실험에 사용된 관개용수 수질 분석결과 pH는 7.5~8.4로 나타났다. COD의 경우 TR#01, TR#02가 평균 0.9 mg/L로 큰 차이를 보이지 않았지만, TR#03 2.2 mg/L, TR#04 3.3 mg/L로 나타나 염도가 높을수록 COD 값이 증가하는 경향을 보였다. 영양염류 T-N의 경우 모든 처리구에서 3.8~4.0 mg/L 수준으로 나타났으며, T-P의 경우 모든 처리구에서 0.008 mg/L 이하 수준의 값이 나타났다. 양이온 Na^+ 의 경우 TR#01에서 9.68 mg/L로 나타났으며, TR#02 142.5 mg/L, TR#03 686.1 mg/L로 1차 결과와 마찬가지로 염도수준이 높아질수록 Na^+ 값이 높게 나타났다. 음이온 Cl^- 의 경우, TR#01에서 평균 18.8 mg/L로 나타났으며 최고 염도수준인 TR#05에서 1059.9 mg/L로 나타나 염도수준이 높아질수록 Na^+ 와 비슷하게 값이 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

표 3.10 상추(고랑실험) 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	EC	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	Fe	SAR
			dS/m	mg/L														
초기수질	15/03/05	7.5	0.27	11.1	0.5	0.8	4.69	ND	ND	36.71	6.37	6.38	1.64	-	-	-	-	0.18
TR#01-1	15/03/13	7.9	0.28	9.8	0.6	0.7	4.68	0.006	ND	36.74	6.33	8.37	1.67	-	-	-	-	0.24
	15/04/03	7.9	0.29	10.8	0.5	0.6	4.40	ND	ND	35.57	6.28	10.99	2.37	23.0	11.9	4.18	ND	0.32
TR#02-1	15/03/13	7.8	0.77	10.0	0.6	0.7	4.66	0.009	2.0	36.62	6.32	101.35	1.71	-	-	-	-	2.88
	15/04/03	8.0	0.76	10.4	0.6	0.6	4.41	ND	ND	35.83	6.32	108.22	2.55	168.4	11.9	4.18	ND	3.10
TR#03-1	15/03/13	7.7	1.76	10.1	0.7	0.8	4.71	0.005	3.0	36.76	6.34	298.96	1.73	-	-	-	-	8.47
	15/04/03	8.0	1.83	10.7	1.0	1.5	4.36	ND	2.0	35.79	6.32	333.71	2.60	526.5	11.9	4.16	ND	9.55
TR#04-1	15/03/13	7.8	2.72	10.8	0.9	2.0	4.63	0.009	5.0	36.82	6.36	495.36	1.74	-	-	-	-	14.01
	15/04/03	8.1	2.86	10.9	1.0	1.4	4.40	ND	2.0	35.89	6.33	559.32	2.41	851.3	11.9	4.19	ND	15.99
TR#01-2	15/03/13	7.9	0.28	10.1	0.6	0.7	4.74	0.005	1.0	36.61	6.31	9.02	1.66	-	-	-	-	0.26
	15/04/03	7.9	0.28	11.3	0.6	0.6	4.36	ND	1.0	35.35	6.24	11.19	2.67	23.1	11.9	4.17	ND	0.32
TR#02-2	15/03/13	7.8	0.79	10.4	0.6	0.7	4.69	0.008	2.0	36.51	6.29	101.39	1.71	-	-	-	-	2.88
	15/04/03	8.0	0.79	11.8	0.5	0.6	4.38	ND	ND	35.67	6.29	113.22	2.41	182.9	11.9	4.16	ND	3.25
TR#03-2	15/03/13	7.8	1.69	10.0	0.7	1.0	4.58	0.015	2.0	36.76	6.34	283.12	1.76	-	-	-	-	8.02
	15/04/03	8.0	1.81	11.6	0.8	1.0	4.44	ND	2.0	35.72	6.30	326.78	2.42	505.7	11.9	4.16	ND	9.36
TR#04-2	15/03/13	7.8	2.67	10.0	0.8	1.2	4.67	ND	7.0	36.49	6.30	482.01	1.74	-	-	-	-	13.70
	15/04/03	8.0	2.80	11.4	0.8	1.1	4.52	ND	3.0	35.70	6.30	546.97	2.50	833.0	11.9	4.13	ND	15.68

표 3.11 상추(고랑실험) 관개용수 수질 모니터링 결과 (2차)

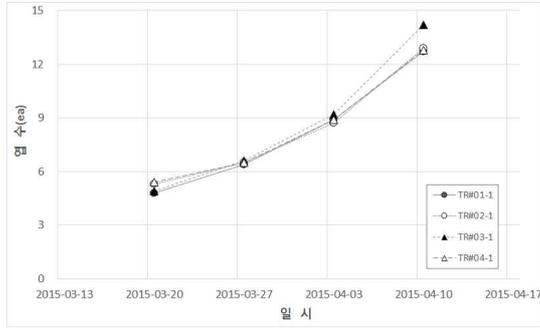
처리구	일자	pH	EC	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	Fe	SAR
			dS/m	mg/L														
TR#01-1	15/04/24	7.8	0.24	11.1	0.7	0.7	3.85	0.003	ND	29.60	5.25	9.87	1.84	19.5	10.5	3.61	ND	0.31
	15/05/21	8.5	0.24	9.3	0.7	0.8	3.75	0.004	ND	29.50	5.33	9.48	2.31	18.0	10.5	3.34	ND	0.29
TR#02-1	15/04/24	7.8	0.90	12.5	0.8	0.9	3.84	0.005	ND	29.81	5.29	144.94	1.92	225.9	10.5	3.59	ND	4.54
	15/05/21	8.3	0.87	9.9	0.8	0.8	3.82	ND	2.0	29.91	5.38	135.40	2.25	208.3	10.5	3.31	ND	4.23
TR#03-1	15/04/24	7.8	2.09	10.7	0.8	0.9	3.75	0.007	2.0	29.83	5.30	400.46	1.95	622.7	10.5	3.59	ND	12.55
	15/05/21	8.1	2.03	9.7	1.8	3.4	3.83	0.004	5.0	30.09	5.40	389.63	2.37	597.3	10.6	3.32	ND	12.14
TR#04-1	15/04/24	7.8	3.35	10.8	1.2	2.6	3.94	0.005	3.0	29.96	5.33	679.11	2.07	1,050.3	10.6	3.60	ND	21.23
	15/05/21	8.2	3.44	9.1	2.5	4.8	3.72	ND	11.0	30.27	5.44	689.32	2.51	1,067.0	10.5	3.35	ND	21.41
TR#01-2	15/04/24	7.8	0.24	10.6	1.1	1.6	3.86	0.005	ND	29.57	5.25	9.88	1.93	19.5	10.5	3.59	ND	0.31
	15/05/21	8.5	0.24	9.3	0.7	0.8	3.75	0.004	ND	29.50	5.33	9.48	2.31	18.0	10.5	3.34	ND	0.30
TR#02-2	15/04/24	7.8	0.91	10.9	0.7	0.8	3.81	0.007	1.0	29.75	5.28	148.07	1.90	227.8	10.5	3.59	ND	4.65
	15/05/21	8.3	0.89	9.6	0.8	0.9	3.85	ND	1.0	29.89	5.37	141.49	2.34	219.5	10.6	3.35	ND	4.42
TR#03-2	15/04/24	7.8	2.17	11.2	1.2	2.1	4.03	0.008	2.0	29.91	5.31	419.27	1.97	643.1	10.5	3.60	ND	13.12
	15/05/21	8.1	2.03	9.5	1.4	2.5	3.91	ND	9.0	30.11	5.42	386.38	2.38	592.2	10.7	3.36	ND	12.03
TR#04-2	15/04/24	7.7	3.46	11.6	1.0	1.6	3.86	ND	3.0	29.95	5.33	693.57	1.86	1,065.2	10.6	3.60	ND	21.68
	15/05/21	8.1	3.34	9.7	2.1	4.0	3.85	ND	10.0	29.91	5.38	682.16	2.43	1,053.4	10.8	3.35	ND	21.31

(3) 관개량

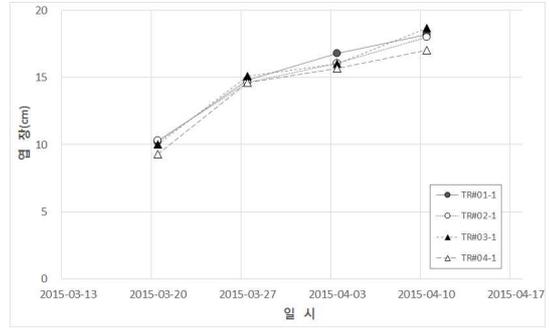
처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 2반복당 10개의 개체를 임의로 선정하여 매주 엽수, 엽장, 엽폭 생육모니터링을 2차에 걸쳐 실시하였다. 1차 생육기간동안 관개용수 처리수준에 따른 엽수, 엽장, 엽폭 측정값의 평균값을 아래 그림과 표에 나타내었다. 또한 수확 전 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0을 사용하여 분산분석(Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다. 5% 유의수준에서 처리구별 분산분석 결과를 보여주고 있으며 방법은 던컨의 다중범위검정을 사용하였다.

1차 1반복구 생육 결과 처리구별 엽수 ($p < 0.05$), 엽장 ($p < 0.05$), 엽폭 ($p < 0.001$) 모두 유의한 차이를 보였다. 엽수의 경우 TR#03 (14 ea)가 다른 처리구에 비해 가장 많이 나타났으며 다른 처리구들은 12.8 ea 수준으로 비슷하게 나타났다. 엽장과 엽폭의 경우 TR#04 처리구가 다른 처리구에 비해 생육이 유의하게 낮게 나타났다.

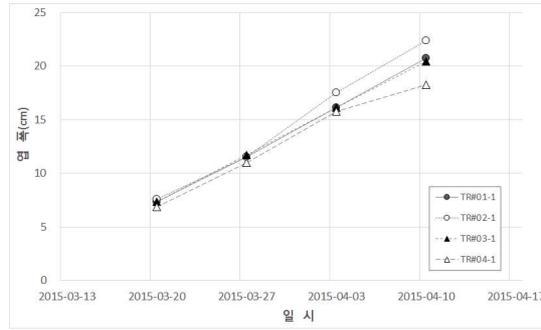
1차 2반복구 생육 결과 엽수($p < 0.01$), 엽장($p < 0.05$)에서는 유의한 차이가 나타났으나 엽폭 ($p > 0.05$)에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 엽수의 경우 TR#03 (14 ea)가 다른 엽수에 비해 많이 나타났다. 엽장의 경우 TR#01 (17.3 cm)가 다른 처리구에 비해 높게 나타났으며 TR#04 (16.2 cm), TR#03 (16.1 cm) 순으로 생육이 유의한 차이가 나타났다. 엽폭의 경우 유의한 차이는 나타나지 않았지만, TR#01 (20.6 cm)에서 가장 높게 나타났으며 TR#04 (18.2 cm)에서 가장 낮게 나타났다.



(a) 엽수

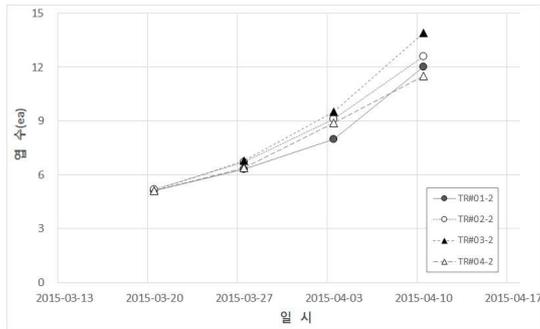


(b) 묘장

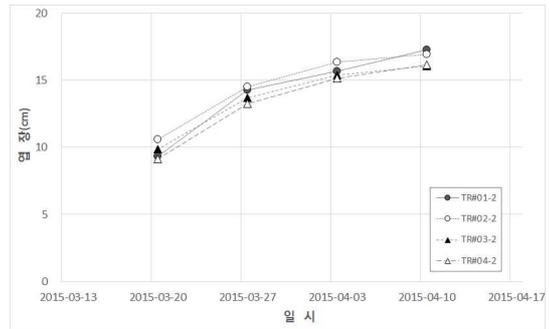


(c) 엽폭

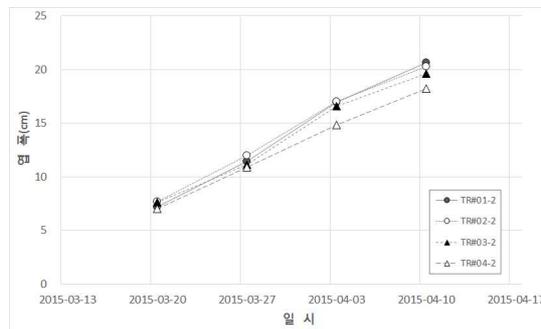
그림 3.18 상추(고랑실험) 처리구별 생육변화 (1차 1반복구)



(a) 엽수



(b) 묘장



(c) 엽폭

그림 3.19 상추(고랑실험) 처리구별 생육변화 (1차 2반복구)

표 3.12 상추(고랑실험) 처리구별 생육변화 (1차)

일시 (1반복구)	TR#01-1			TR#02-1			TR#03-1			TR#04-1		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
03/20	4.8	10.2	7.4	5.3	10.3	7.6	4.9	10.0	7.4	5.4	9.3	6.9
03/27	6.4	4.8	11.5	6.5	14.6	11.5	6.6	15.1	11.7	6.5	14.6	11.0
04/03	8.9	16.8	16.1	8.7	16.1	17.5	9.2	16.0	16.1	8.9	15.7	15.8
04/10	12.7	18.2	20.7	12.9	18.0	22.4	14.2	18.7	20.5	12.8	17.1	18.2
일시 (2반복구)	TR#01-2			TR#02-2			TR#03-2			TR#04-2		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
03/20	5.1	9.3	7.2	5.2	10.6	7.7	5.1	9.9	7.6	5.1	9.2	7.0
03/27	6.3	14.3	11.4	6.7	14.5	12.0	6.8	13.7	11.2	6.4	13.3	10.9
04/03	8.0	15.7	17.0	9.1	16.3	17.0	9.5	15.4	16.6	8.9	15.1	14.8
04/10	12.0	17.3	20.6	12.6	16.9	20.3	13.9	16.1	19.6	11.5	16.2	18.2

표 3.13 상추(고랑실험) 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

반복구	처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
1	TR#01-1	12.7±1.1b	18.2±1.3a	20.7±1.9b
	TR#02-1	12.9±1.7b	18.0±1.1ab	22.4±1.7a
	TR#03-1	14.2±1.0a	18.7±0.9a	20.5±1.5b
	TR#04-1	12.8±1.2b	17.1±0.9b	18.2±1.9c
	F-value	3.072	3.999	9.075
	p	0.040	0.015	0.000
2	TR#01-2	12.0±1.2b	17.3±1.2a	20.6±2.2a
	TR#02-2	12.6±1.9b	16.9±1.3ab	20.3±1.6a
	TR#03-2	13.9±1.1a	16.1±0.8b	19.6±2.5ab
	TR#04-2	11.5±1.2b	16.2±0.6b	18.2±1.7b
	F-value	5.536	3.253	2.706
	p	0.003	0.033	0.060

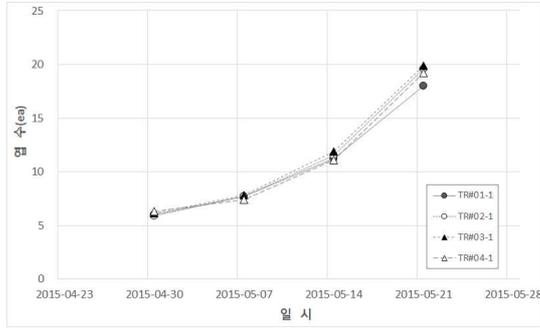
*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

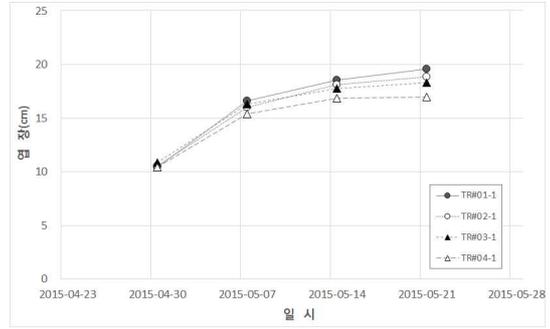
2차 생육기간동안 관개용수 처리수준에 따른 엽수, 엽장, 엽폭 측정값을 평균하여 아래 그림과 표에 나타내었다. 또한 수확 전 처리구별 생육을 5% 유의수준에서 분산분석하여 나타내었으며 방법은 던컨의 다중범위검정을 사용하였다.

2차 1반복구 생육 결과 처리구별 엽수는 유의한 차이를 보이지 않았지만 ($P>0.05$), 엽장 ($p<0.001$), 엽폭 ($p<0.001$)에서 모두 유의한 차이를 보였다. 엽수의 경우 유의한 차이는 나타나지 않았지만 TR#03 (19.9 ea)에서 가장 높게 나타났으며, TR#02 (19.6 ea), TR#04 (19.2 ea), TR#01 (18.0 ea) 순으로 조사되었다. 엽장의 경우 TR#01에서 (19.6 cm) 가장 높게 나타났으며 TR#04에서 (17.0 cm) 가장 낮게 나타나 EC값이 높을수록 생육이 낮아지는 것으로 나타났다. 엽폭의 경우 TR#04에서 (20.5 cm) 다른 처리구에 비해 생육이 가장 낮게 나타났다.

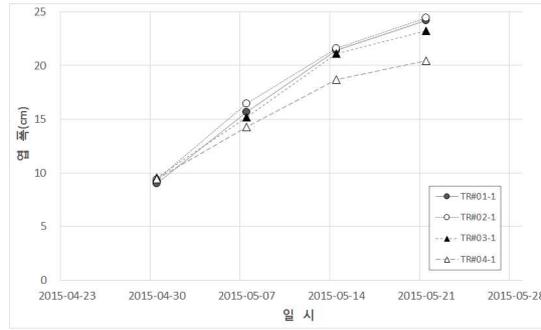
2차 2반복구 생육 결과 엽수 ($P<0.05$), 엽장 ($P<0.001$), 엽폭 ($P<0.001$) 모두 유의한 차이가 나타났으며 엽수는 TR#01 (20.9 ea), TR#02 (20.5 ea) 처리구에서 다른 처리구에 비해 높게 나타났다. 엽장의 경우 TR#01 (18.9 cm) 처리구가 TR#04 (16.4 cm)보다 높게 나타났으며 엽폭 또한 TR#01 (25.2 cm)이 다른 처리구에 비해 가장 높게 나타났으며 TR#04 (21.0 cm) 처리구가 다른 처리구에 비해 생육이 유의하게 낮게 나타났다.



(a) 엽수

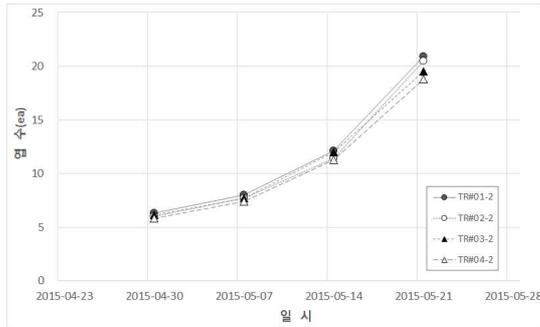


(b) 엽장

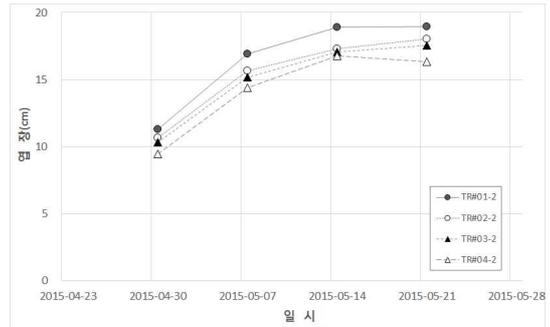


(c) 엽폭

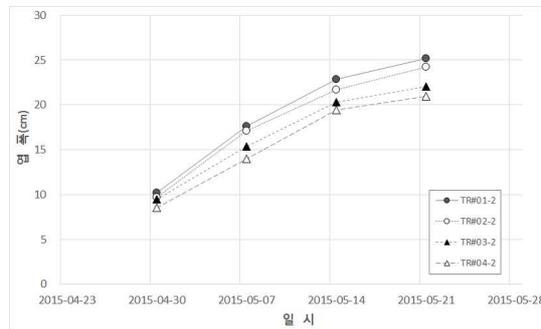
그림 3.20 상추(고랑실험) 처리구별 생육변화 (2차 1반복구)



(a) 엽수



(b) 엽장



(c) 엽폭

그림 3.21 상추(고랑실험) 처리구별 생육변화 (2차 2반복구)

표 3.14 상추(고랑실험) 처리구별 생육변화 (2차)

일시 (1반복구)	TR#01-1			TR#02-1			TR#03-1			TR#04-1		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
04/30	6.0	10.4	9.0	5.9	10.6	9.4	6.1	10.9	9.5	6.3	10.5	9.4
05/07	7.7	16.6	15.7	7.7	16.0	16.5	7.8	16.3	15.2	7.4	15.4	14.3
05/14	11.2	18.5	21.5	11.5	18.2	21.6	11.9	17.8	21.1	11.1	16.8	18.7
05/21	18.0	19.6	24.2	19.6	18.9	24.5	19.9	18.3	23.3	19.2	17.0	20.5
일시 (2반복구)	TR#01-2			TR#02-2			TR#03-2			TR#04-2		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
04/30	6.3	11.3	10.2	6.0	10.7	9.7	6.1	10.4	9.5	5.8	9.5	8.6
05/07	8.0	16.9	17.6	7.7	15.7	17.1	7.7	15.2	15.3	7.4	14.4	14.0
05/14	12.1	18.9	22.9	11.4	17.3	21.7	12.0	17.1	20.3	11.3	16.8	19.4
05/21	20.9	18.9	25.2	20.5	18.0	24.2	19.5	17.6	22.1	18.8	16.4	21.0

표 3.15 상추(고랑실험) 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

반복구	처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
1	TR#01-1	18.0±1.2b	19.6±0.8a	24.2±1.3a
	TR#02-1	19.6±1.6ab	18.9±1.0ab	24.5±1.8a
	TR#03-1	19.9±2.0a	18.3±1.4b	23.3±1.6a
	TR#04-1	19.2±2.1ab	17.0±1.1c	20.5±1.7b
	F-value	2.259	9.464	12.785
	p	0.098	0.000	0.000
2	TR#01-2	20.9±1.3a	18.9±1.2a	25.2±1.5a
	TR#02-2	20.5±1.7a	18.0±1.2ab	24.2±2.7a
	TR#03-2	19.5±1.4ab	17.6±0.7b	22.1±2.0b
	TR#04-2	18.8±2.3b	16.4±1.2c	21.0±2.4b
	F-value	3.102	9.729	7.570
	p	0.039	0.000	0.000

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

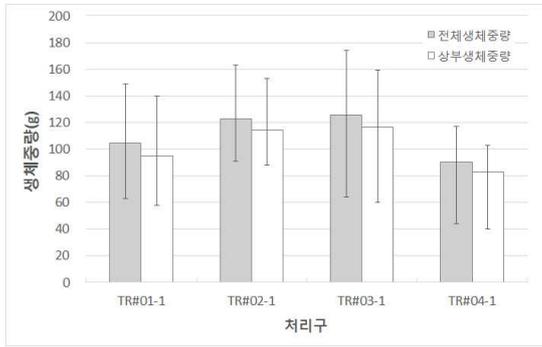
**Mean±deviation(n=10)

(4) 수확량

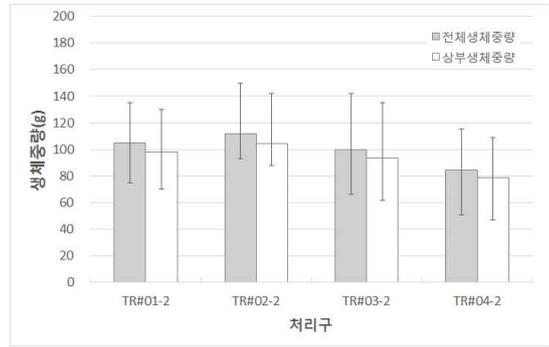
생체중량은 1차 4월 10일, 2차 5월 21일에 처리구별 반복구당 임의로 10개의 개체를 선정하여 조사하여 아래 그림과 표에 나타내었다. 자료분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였다. 집단 간의 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다.

1차 1반복구 생체중량 분석결과 뿌리를 포함한 전체생체중량은 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), TR#02 (123.0 g), TR#03 (125.5 g) 처리구에서 TR#04 (90.3 g)보다 높은 값을 보였다. 뿌리를 제외한 상부 생체중량 또한 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), TR#02 (114.4 g), TR#03 (116.6 g) 처리구가 TR#01 (95.1 g), TR#04 (83.0 g) 보다 높은 값을 보였다. 1차 2반복구의 경우 전체생체중량과 뿌리 제외 생체중량에서 모두 TR#02 처리구 값이 가장 높게 나타났지만 처리구별 유의한 차이를 보이지는 않았다 ($p > 0.05$).

2차 1반복구 생체중량 분석결과 전체 생체중량은 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.001$), TR#02 (244.3 g) 처리구에서 가장 높은 값이, TR#04 (163.6 g)에서 다른 처리구에 비해 가장 낮은 값이 나타났다. 뿌리제외 생체중량 또한 TR#02 (224.1 g)에서 가장 높은 값을, TR#04 (145.5 g) 에서 가장 낮은 값을 보였다. 2차 2반복구의 경우 전체생체중량은 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), TR#04 (172.5 g)에서 다른 처리구에 비해 가장 낮은 값을 보였으며, 뿌리제외 상체생체중량의 경우 TR#01 (217.4 g), TR#02 (214.2 g)에서 높은 값을 보였으며 TR#04 (154.1 g)에서 낮은 값을 보였다.



(a) 1차 1반복구



(b) 1차 2반복구

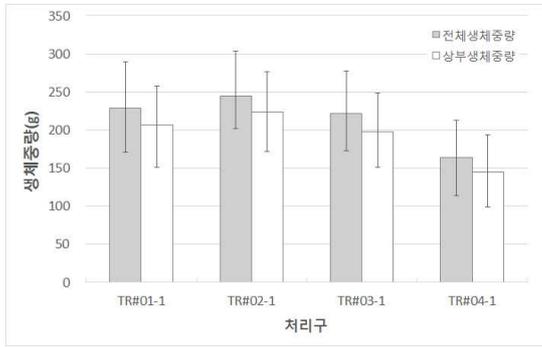
그림 3.22 상추(고랑실험) 처리구별 생체중량 (1차)

표 3.16 상추(고랑실험) 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

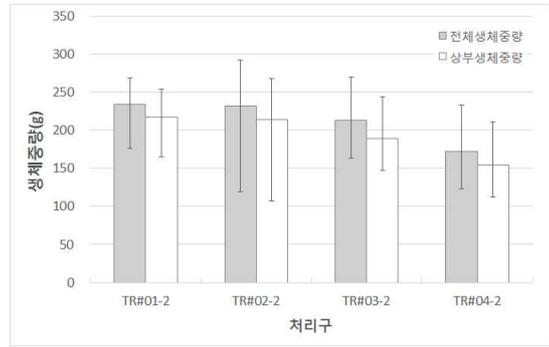
반복구	처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
1	TR#01-1	104.4±30.8ab	95.1±28.8ab
	TR#02-1	123.0±23.1a	114.4±20.2a
	TR#03-1	125.5±31.4a	116.6±29.8a
	TR#04-1	90.3±22.5b	83.0±17.8b
	F-value	3.707	4.108
	p	0.020	0.013
2	TR#01-2	105.0±18.6ab	98.2±18.8ab
	TR#02-2	111.6±17.8a	104.2±17.1a
	TR#03-2	99.9±31.3ab	93.6±29.1ab
	TR#04-2	84.6±22.8b	78.9±21.5b
	F-value	2.445	2.383
	p	0.080	0.085

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)



(a) 2차 1반복구



(b) 2차 2반복구

그림 3.23 상추(고랑실험) 처리구별 생체중량 (2차)

표 3.17 상추(고랑실험) 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

반복구	처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
1	TR#01-1	228.5±32.3a	207.3±28.0a
	TR#02-1	244.3±34.1a	224.1±33.3a
	TR#03-1	222.1±36.2a	197.5±34.8a
	TR#04-1	163.6±35.4b	145.4±32.0b
	F-value	10.433	11.157
	p	0.000	0.000
2	TR#01-2	233.8±31.0a	217.4±29.3a
	TR#02-2	231.8±58.2a	214.2±55.8a
	TR#03-2	212.7±38.5a	189.4±37.0ab
	TR#04-2	172.5±34.7b	154.1±32.7b
	F-value	4.598	5.347
	p	0.008	0.004

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺에 대해 임의로 선정된 5개의 상추개체를 대상으로 수확 후 분석하였다. 생체중량과 동일하게 1차 4월 10일, 2차 5월 20일에 수확하여 조사하였으며, 자료 분석은 처리구별 상추개체의 평균값을 구하여 분석하였으며 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 하여 아래 표에 나타내었다.

1차 처리구별 식물체 성분 Na⁺분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.001), TR#01 (3161.0 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 TR#04에서 15628.9 mg/kg으로 TR#01 대비 4.9배 높게 분석되었다.

2차 처리구별 또한 식물체 성분 Na⁺분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.001), TR#01 (443.1 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 TR#04에서 1881.4 mg/kg로 나타나 TR#01 대비 4.2배 높게 분석되었다.

표 3.18 상추(고랑실험) 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)			
	TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
15/04/10	3161.0 ±357.0c	6521.9 ±1456.8c	11311.6 ±1893.7b	15628.9 ±4655.9a
F-value	21.688			
p	0.000			

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=5)

표 3.19 상추(고랑실험) 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)			
	TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
15/05/20	443.1 ±27.2d*	851.8 ±67.9c**	1403.2 ±39.5b	1881.4 ±155.8a
F-value	253.799			
p	0.000			

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=5)

(6) 토양환경 조사 분석

처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 작물 재배 전과 후에 각 처리구의 토양을 샘플링 하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였으며, 샘플링한 처리구별 토양의 화학적 성분 분석결과를 정리한 표는 다음과 같다.

1차 토양의 성분을 분석한 결과 작물재배 전 pH는 5.6으로 나타났으며 수확 후 토양의 경우 모든 처리구에서 5.9 수준으로 비슷하게 나타났다. EC는 상추 재배 전 8.43 dS/m으로 나타났으나 수확 후 토양에서는 TR#01 (10.25 dS/m)를 포함하여 모든 처리구에서 높게 나타났으며 TR#04 (21.3 dS/m)에서 가장 높게 나타났다. T-P는 모든 처리구에서 상추 재배 전보다 수확 후의 값이 점차적으로 감소하는 것으로 나타났으며 유기물 함량 또한 감소하는 것으로 나타났다. 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높은 TR#04 (1445.5 mg/kg)를 제외한 처리구에서 상추 재배 전 (1042.4 mg/kg)보다 값이 감소하였으며, 다른 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)에서는 모든 처리구에서 재배 전보다 값이 감소하는 것으로 나타났다.

2차 토양의 성분을 분석한 결과 작물재배 전 pH는 평균 5.4으로 나타났으며 수확 후 토양의 경우 5.1 수준으로 나타났다. EC의 경우 TR#01은 재배 전과 수확 후 차이가 크게 나타나지 않았지만, TR#02의 경우 수확 후 토양의 EC (15.21 dS/m)가 재배 전 (19.05 dS/m)보다 낮게 나타났다. 그러나 TR#03과 TR#04에서는 수확 후 토양의 EC값이 재배 전보다 높게 나타났다. T-P는 모든 처리구에서 상추 재배 전보다 수확 후의 값이 점차적으로 감소하는 것으로 나타났으며 유효인산 또한 수확 후 모든 처리구에서 값이 감소하는 경향을 보였다. 유기물 함량은 재배 전보다 증가하는 것으로 나타났으며, 양이온 Na⁺의 경우 TR#01를 제외한 모든 처리구에서 상추 재배 전 보다 값이 증가하였으며, TR#04 (8225.07 mg/kg)에서 가장 큰 값이 나타났다. K⁺의 경우 모든 처리구에서 재배 전보다 값이 감소하였으나 다른 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺)은 TR#02를 제외한 모든 처리구에서 재배 전보다 값이 증가하는 것으로 나타났다.

표 3.20 상추(고랑실험) 토양의 화학적 성분분석 결과 (1차)

구분	재배 전 (15/03/13)	수확 후 (15/04/10)			
		TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
pH	5.6	5.8	6.0	5.8	5.9
EC(ds/m)	8.43	10.25	10.94	18.45	21.3
CEC(cmol/kg)	73.2	65.63	70.44	70.1	65.53
T-N(%)	0.596	0.603	0.557	0.579	0.45
T-P(mg/kg)	1676.04	956.86	655.58	1025.37	678.55
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1521.47	660.85	450.11	733.93	486.36
Ca ²⁺ (mg/kg)	4534.83	1712.25	1714.67	1815.76	1631.50
Mg ²⁺ (mg/kg)	1935.54	584.52	589.97	641.00	409.60
Na ⁺ (mg/kg)	1042.14	260.85	616.30	956.54	1445.50
K ⁺ (mg/kg)	5478.84	1364.93	1152.07	1372.77	1354.55
유기물함량(%)	65.46	56.32	57.90	57.70	61.16
SAR	2.308	0.981	2.314	3.474	5.857

표 3.21 상추(고랑실험) 토양의 화학적 성분분석 결과 (2차 파종 전)

구분	수확 후 (15/04/24)			
	TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
pH	5.4	5.3	5.4	5.4
EC(ds/m)	15.41	19.05	20.55	24.95
CEC(cmol/kg)	72.02	76.49	72.21	69.46
T-N(%)	0.515	0.659	0.596	0.677
T-P(mg/kg)	1288.19	1539.14	1548.49	1542.49
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1275.72	1239.64	1158.85	1311.66
Ca ²⁺ (mg/kg)	4632.07	5045.08	4230.28	4562.05
Mg ²⁺ (mg/kg)	1482.61	1478.67	1255.74	1382.54
Na ⁺ (mg/kg)	1001.26	1307.24	1861.18	2112.87
K ⁺ (mg/kg)	4402.62	4309.38	5691.48	4503.81
유기물함량(%)	38.62	51.85	45.64	53.03
SAR	2.317	2.941	4.563	4.972

표 3.22 상추(고랑실험) 토양의 화학적 성분분석 결과 (2차 수확 후)

구분	수확 후 (15/05/21)			
	TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
pH	5.0	5.2	5.1	5.0
EC(ds/m)	14.33	15.12	30.75	34.80
CEC(cmol/kg)	62.98	72.31	74.13	75.31
T-N(%)	0.575	0.634	0.603	0.551
T-P(mg/kg)	1269.38	1032.37	934.71	955.22
P ₂ O ₅ (mg/kg)	873.23	593.57	768.36	809.55
Ca ²⁺ (mg/kg)	5712.24	4749.03	6078.54	5562
Mg ²⁺ (mg/kg)	1562.14	1245.23	1594.83	1400.86
Na ⁺ (mg/kg)	783.95	1434.42	5482.92	8225.07
K ⁺ (mg/kg)	2910.64	3227.31	3033.99	2785.87
유기물함량(%)	58.57	64.38	65.22	66.19
SAR	1.676	3.385	11.434	18.041

(7) 생육환경 조사 분석

(가) 온도

고랑실험의 작물생육기간 동안 유리온실의 온도를 날짜별로 도시화하였다. 1차 작물재배 기간 (3월 13일~4월 10일)동안 유리온실의 평균온도는 30.8 °C였으며 최고온도는 37.2 °C, 최저온도는 22.5 °C로 조사되었다. 2차 작물재배 기간 (4월 24일~5월 21일)동안 유리온실 평균온도는 32.2 °C였으며 최고온도는 38.9 °C, 최저온도는 23.9 °C로 조사되었다. 1차 재배 기간보다 2차 재배기간의 온도가 약 1.4 °C정도 높아진 것으로 조사되었다.

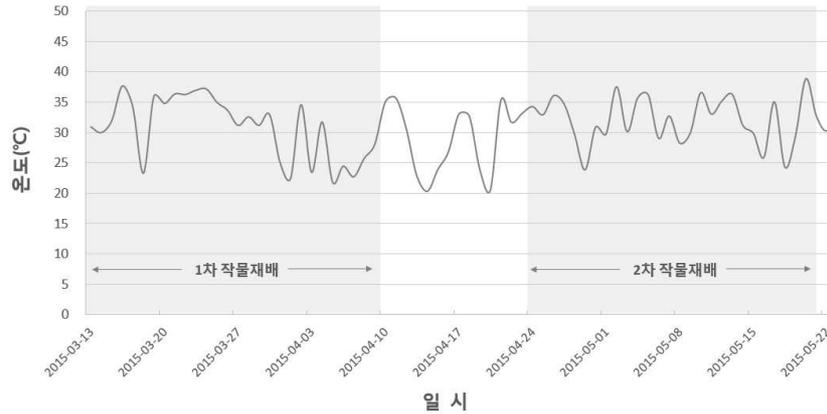


그림 3.24 상추(고랑실험) 작물생육기간 온실 내부 온도

(나) 습도

작물 생육기간동안 유리온실의 습도를 날짜별로 도시화하였다. 1차 재배기간 (3월 13일~4월 10일)동안 유리온실의 평균습도는 18.4 %였으며 최고습도는 40.6 %, 최저습도는 6.4 %로 조사되었다. 2차 재배기간 (4월 24일~5월 21일) 동안 평균습도는 22.8 %, 최고습도는 40.7 %, 최저습도는 11.8 %로 조사되었다.

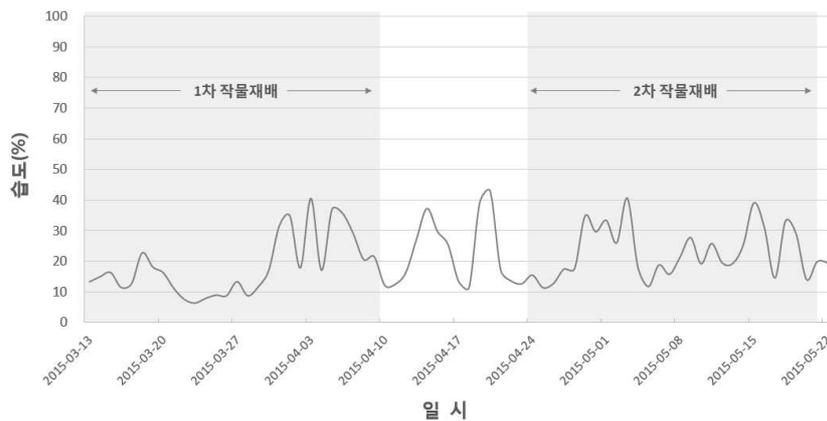


그림 3.25 상추(고랑실험) 작물생육기간 온실 내부 습도

나. 상추(포트실험)

(1) 관개량

포트실험의 상추 (*Lactuca sativa* L) 작물재배는 약 7~8주 동안 5개의 처리구 3반복으로 이루어졌다. 재배기간 동안 필요시마다 관개하였으며 1차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 27회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 9.2 L로 측정되었다. 2차 재배기간 동안에는 처리구별 관개용수 공급 횟수 총 17회, 처리구당 총 관개용수 공급량이 5.6 L였으며, 3차 재배기간 동안에는 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 18회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 5.9 L로 측정되었다. 관개용수의 공급은 아래 표에 나타난 바와 같이 이행하였으며, 생육말기에 관개용수의 공급이 많이 이루어진 것을 볼 수 있다.

표 3.23 상추(포트실험) 생육실험 관개량 (1차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/03/13	11:30	0.5	15/04/12	10:00	0.3
15/03/15	10:00	0.3	15/04/17	10:00	0.3
15/03/17	10:00	0.3	15/04/21	10:00	0.3
15/03/19	10:00	0.3	15/04/23	10:00	0.3
15/03/21	10:00	0.3	15/04/25	10:00	0.3
15/03/23	10:00	0.3	15/04/26	10:00	0.5
15/03/25	10:00	0.3	15/04/28	10:00	0.5
15/03/27	10:00	0.3	15/04/30	10:00	0.5
15/03/29	10:00	0.3	15/05/02	10:00	0.5
15/04/01	10:00	0.3	15/05/04	10:00	0.5
15/04/04	10:00	0.3	15/05/06	10:00	0.3
15/04/06	10:00	0.3	15/05/07	10:00	0.5
15/04/08	10:00	0.3	15/05/08	10:00	1.0
15/04/10	10:00	0.3			
총계	9.2				

표 3.24 상추(포트실험) 생육실험 관개량 (2차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/06/19	9:30	0.5	15/07/15	10:00	0.3
15/06/20	10:00	0.2	15/07/18	10:00	0.3
15/06/21	10:00	0.2	15/07/20	10:00	0.3
15/06/23	10:00	0.2	15/07/22	10:00	0.3
15/06/26	9:30	0.2	15/07/26	10:00	0.5
15/06/28	10:00	0.3	15/07/28	10:00	0.5
15/07/01	10:00	0.2	15/07/31	10:00	0.5
15/07/04	10:00	0.3	15/08/02	10:00	0.5
15/07/10	10:00	0.3			
총계	5.6				

표 3.25 상추(포트실험) 생육실험 관개량 (3차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/08/07	10:00	0.5	15/08/31	10:00	0.3
15/08/08	10:00	0.2	15/09/04	10:00	0.3
15/08/10	10:00	0.2	15/09/07	10:00	0.3
15/08/12	10:00	0.2	15/09/09	10:00	0.3
15/08/14	10:00	0.2	15/09/12	10:00	0.5
15/08/16	10:00	0.3	15/09/15	10:00	0.5
15/08/22	10:00	0.2	15/09/17	10:00	0.5
15/08/24	10:00	0.3	15/09/20	10:00	0.5
15/08/28	10:00	0.3	15/09/22	10:00	0.5
총계	5.9				

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

상추 생육기간동안 처리구별로 염도의 지표인 EC를 매주 측정하였으며 측정결과는 다음 표와 같다. 전체 생육기간동안 L-TR#01의 염도수준은 평균 0.3 dS/m로 나타났으며, 처리구는 임계수준 전후로 각각 0.7 dS/m (L-TR#02), 0.9 dS/m (L-TR#03, FAO 임계수준), 1.1 dS/m (L-TR#04), 그리고 1.4 dS/m (L-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 유지시켜주었다.

표 3.26 상추(포트실험) 관개용수 염도 모니터링 (1차)

일자	EC _w				
	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
15/03/19	0.331	0.726	0.939	1.075	1.442
15/03/26	0.333	0.693	0.896	1.102	1.396
15/04/02	0.306	0.635	0.832	1.017	1.239
15/04/09	0.259	0.542	0.736	0.867	1.128
15/04/23	0.279	0.721	0.925	1.138	1.41
15/04/30	0.298	0.707	0.887	1.057	1.359
15/05/07	0.285	0.933	1.116	1.475	1.907
평균	0.299	0.708	0.904	1.104	1.412

표 3.27 상추(포트실험) 관개용수 염도 모니터링 (2차)

일자	EC _w				
	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
15/06/19	0.311	0.703	0.902	1.106	1.411
15/06/25	0.335	0.699	0.915	1.118	1.454
15/07/02	0.318	0.691	0.911	1.094	1.376
15/07/09	0.311	0.704	0.912	1.103	1.398
15/07/16	0.268	0.680	0.896	1.077	1.406
15/07/23	0.278	0.694	0.910	1.089	1.412
15/07/30	0.298	0.707	0.885	1.078	1.387
평균	0.303	0.697	0.904	1.095	1.406

표 3.28 상추(포트실험) 관개용수 염도 모니터링 (3차)

일자	EC _w				
	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
15/08/06	0.327	0.702	0.901	1.102	1.408
15/08/13	0.325	0.700	0.902	1.105	1.397
15/08/20	0.311	0.704	0.905	1.088	1.387
15/08/27	0.330	0.667	0.872	1.003	1.364
15/09/03	0.349	0.708	0.880	1.112	1.386
15/09/10	0.329	0.673	0.876	1.080	1.384
15/09/17	0.390	0.810	1.040	1.213	1.573
평균	0.337	0.709	0.911	1.100	1.414

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 상추(포트실험) 재배기간 동안 관개용수를 3회 샘플링하여 pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온, 그리고 음이온 등 17항목에 대하여 분석하였다. 작물 재배에 사용된 관개용수의 수질분석 결과 pH는 모든 처리구에서 평균 7.8~8.5 수준으로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5~8.5를 만족하는 것으로 나타났다.

1차 생육기간에는 2회 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 4.4~4.7 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P 또한 모든 처리구에서 0.01 mg/L이하의 비슷한 수준으로 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺는 L-TR#01에서 7.58 mg/L로 나타났으며 다른 처리구는 평균 L-TR#02 73.12 mg/L, L-TR#03 107.26 mg/L, L-TR#04 150.57 mg/L, L-TR#05 193.03 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na⁺값이 높게 나타났다. Na⁺를 제외한 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 L-TR#01에서 평균 0.20, L-TR#02 (2.08), L-TR#03 (3.06), L-TR#04 (4.29), 그리고 L-TR#05에서 5.5로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다. 3차 생육기간에는 수확 후 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 2.0~2.8 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P는 모든 처리구에서 검출되지 않았다. 치환성 양이온 Na⁺는 L-TR#01에서 8.23 mg/L로 나타났으며 L-TR#02 71.70 mg/L, L-TR#03 108.13 mg/L, L-TR#04 144.13 mg/L, L-TR#05 204.31 mg/L로 염도수준이 높아질수록 Na⁺ 값이 높게 나타났다. Na⁺를 제외한 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 음이온 Cl⁻의 경우, L-TR#01에서 17.0 mg/L로 나타났으며 염도수준이 높아질수록 Na⁺와 비슷하게 값이 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 L-TR#01에서 0.214, L-TR#02 (2.18), L-TR#03 (3.32), L-TR#04 (4.40), 그리고 L-TR#05에서 6.25로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

표 3.29 상추(포트실험) 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	mg/L								EC	SAR
											SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
초기수질	15/03/05	7.5	11.1	0.5	0.8	4.69	ND	ND	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27	0.180
L-TR#01	15/03/13	7.8	9.7	0.6	0.9	4.68	0.009	ND	ND	-	-	-	-	-	36.99	6.36	7.58	1.66	0.27	0.214
L-TR#02	15/03/13	7.8	9.7	0.7	0.9	4.63	0.011	1.00	ND	-	-	-	-	-	37.10	6.39	71.65	1.77	0.61	2.020
	15/04/03	8.0	11.2	0.6	0.8	4.47	ND	1.00	-	117.8	11.9	4.22	-	ND	35.59	6.28	74.59	2.63	0.60	2.141
L-TR#03	15/03/13	7.9	10.2	0.7	0.9	4.64	0.012	2.00	ND	-	-	-	-	-	36.78	6.33	105.79	1.68	0.80	2.995
	15/04/03	7.9	10.9	0.5	0.6	4.43	ND	ND	-	169.5	11.9	4.21	-	ND	35.68	6.29	108.73	2.46	0.78	3.117
L-TR#04	15/03/13	8.0	9.6	0.6	0.8	4.71	0.01	2.00	ND	-	-	-	-	-	36.83	6.34	157.44	1.69	1.06	4.455
	15/04/03	8.0	11	0.5	0.6	4.37	ND	1.00	-	221.1	11.8	4.19	-	ND	35.6	6.28	143.7	2.54	0.92	4.124
L-TR#05	15/03/13	7.9	10	0.6	0.6	4.47	0.013	2.00	ND	-	-	-	-	-	36.98	6.37	188.00	1.71	1.20	5.308
	15/04/03	8.0	11.1	0.5	0.6	4.47	ND	1.00	-	302.5	11.9	4.21	-	ND	35.62	6.29	198.06	2.52	1.21	5.682

표 3.30 상추(포트실험) 관개용수 수질 모니터링 결과 (3차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	mg/L								EC	SAR
											SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
L-TR#01	15/10/12	8.5	8.2	0.8	0.6	2.75	ND	2.00	ND	17.00	10.2	2.3	120.78	ND	34.08	5.79	8.23	1.84	0.26	0.242
L-TR#02	15/10/12	8.3	7.9	0.9	2.0	2.03	ND	12.00	ND	108.9	9.7	1.8	123.83	ND	32.04	5.35	71.70	2.09	0.57	2.182
L-TR#03	15/10/12	8.4	8.1	0.7	1.4	2.21	ND	5.00	ND	161.1	9.8	1.7	123.83	ND	31.45	5.23	108.13	2.14	0.73	3.323
L-TR#04	15/10/12	8.4	8.2	1.1	1.5	2.00	ND	5.00	ND	209.5	9.6	1.6	118.95	ND	31.95	5.24	144.13	2.21	0.87	4.401
L-TR#05	15/10/12	8.3	7.9	1.0	2.2	2.30	ND	18.00	ND	291.0	9.7	1.8	112.24	ND	31.81	5.23	204.31	2.39	1.14	6.251

(3) 작물생육

상추의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 5개 처리구 및 3반복구에 대하여 매주 엽수, 엽장, 엽폭에 대해 생육 모니터링을 3차에 걸쳐 실시하였다. 또한 수확 전 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0 (SPSS, Inc., 2012)를 사용하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 터키 검증(Tukey's HSD)을 사용하였다.

먼저 1차 상추의 작물생육 결과, 상추의 작물생육 결과, 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장, 그리고 엽폭의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수의 경우 L-TR#03 (24.0 ea)이 가장 많았으며, 다음으로 L-TR#04 (23.7 ea), L-TR#01 (22.3 ea), L-TR#02 (21.3 ea), L-TR#05 (21.0 ea) 순으로 나타났지만 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 엽장의 경우 L-TR#03 (18.6 cm)에서 가장 높게 나타났으나 다른 처리구들 또한 비슷한 수준으로 나타났으며 엽폭 또한 L-TR#03 (23.7 cm)에서 다른 처리구에 비해 가장 높게 나타났으나 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).

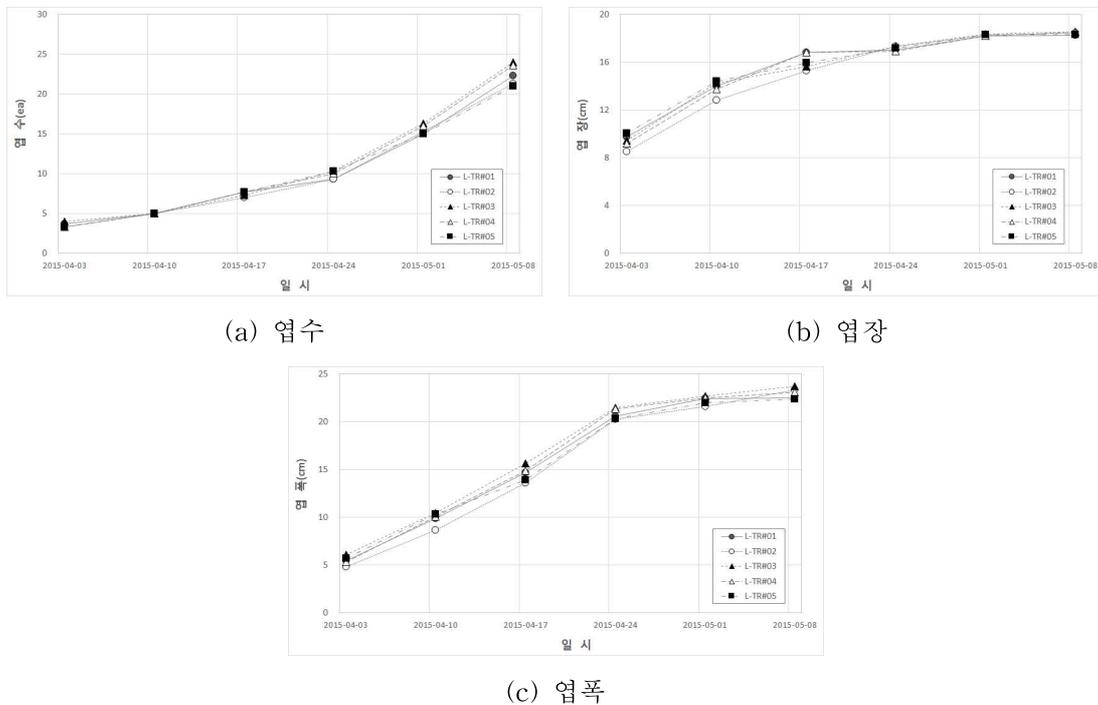


그림 3.26 상추(포트실험) 처리구별 생육변화 (1차)

표 3.31 상추(포트실험) 처리구별 생육변화 (1차)

일시	L-TR#01			L-TR#02			L-TR#03		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)
15/04/03	3.7	9.7	5.4	3.3	8.5	4.8	4.0	9.4	6.1
15/04/10	5.0	14.0	9.9	5.0	12.8	8.7	5.0	14.3	10.5
15/04/17	7.7	16.8	14.7	7.0	15.3	13.6	7.3	15.7	15.7
15/04/24	9.3	17.0	20.6	9.3	17.4	20.3	10.3	17.4	21.5
15/05/01	15.0	18.2	22.4	15.3	18.3	21.6	16.3	18.4	22.7
15/05/08	22.3	18.3	22.5	21.3	18.5	23.4	24.0	18.6	23.7
일시	L-TR#04			L-TR#05			-		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)			
15/04/03	3.3	9.2	5.3	3.3	10.0	5.7			
15/04/10	5.0	13.8	10.1	5.0	14.4	10.3			
15/04/17	7.7	16.8	14.9	7.7	16.0	13.9			
15/04/24	10.0	16.6	21.3	10.3	17.2	20.3			
15/05/01	16.0	18.2	22.5	15.0	18.3	22.0			
15/05/08	23.7	18.5	23.1	21.0	18.3	22.4			

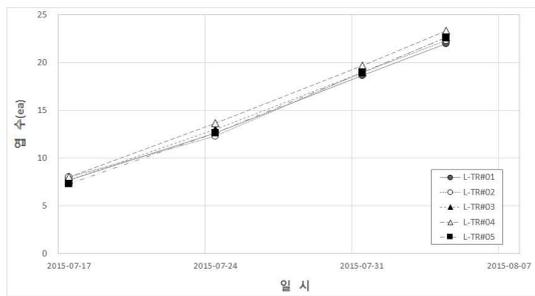
표 3.32 상추(포트실험) 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
L-TR#01	22.3±1.5a	17.9±0.3a	22.5±1.3a
L-TR#02	21.3±1.2a	18.5±0.2a	23.4±0.5a
L-TR#03	24.0±1.0a	18.6±0.6a	23.7±1.5a
L-TR#04	23.7±0.6a	18.5±0.5a	23.1±1.2a
L-TR#05	21.0±1.7a	18.3±0.8a	22.4±0.9a
F-value	3.396	0.545	0.743
p	0.053	0.707	0.584

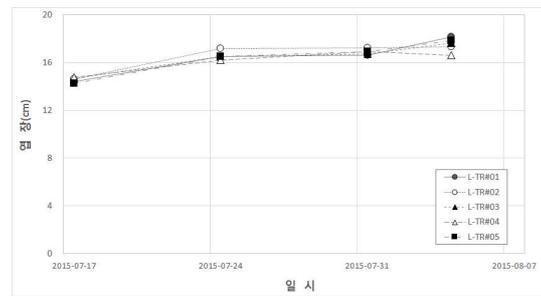
*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

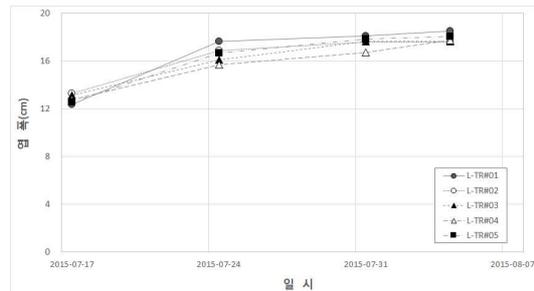
2차 상추 생육결과, 1차 생육결과와 마찬가지로 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장, 그리고 엽폭의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수의 경우 L-TR#04 (23.3 ea)이 가장 많았으며, 다음으로 L-TR#03, L-TR#05 (22.7 ea), L-TR#02 (22.3 ea), L-TR#01 (22.0 ea) 순으로 나타났지만 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 엽장의 경우 L-TR#01 (18.2 cm)에서 가장 높게 나타났으며 L-TR#04 (16.6 cm)의 경우 가장 낮은 값이 나타나 엽수와 대비되는 결과를 보였다. 엽폭 또한 L-TR#01 (18.5 cm)에서 다른 처리구에 비해 가장 높게 나타났으나 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).



(a) 엽수



(b) 엽장



(c) 엽폭

그림 3.27 상추(포트실험) 처리구별 생육변화 (2차)

표 3.33 상추(포트실험) 처리구별 생육변화 (2차)

일시	L-TR#01			L-TR#02			L-TR#03		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)
15/07/17	7.7	14.4	12.4	8.0	14.6	13.3	7.7	14.7	13.1
15/07/24	12.7	16.5	17.7	12.3	17.2	16.9	13.0	16.5	16.1
15/07/31	18.7	16.6	18.1	19.0	17.2	17.6	19.0	16.7	17.6
15/08/04	22.0	18.2	18.5	22.3	17.3	17.6	22.7	17.7	17.6
일시	L-TR#04			L-TR#05			-		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)			
15/07/17	8.0	14.8	12.8	7.3	14.3	12.6	-		
15/07/24	13.7	16.2	15.7	12.7	16.5	16.7			
15/07/31	19.7	16.9	16.7	19.0	16.9	17.8			
15/08/04	23.3	16.6	17.7	22.7	17.9	18.1			

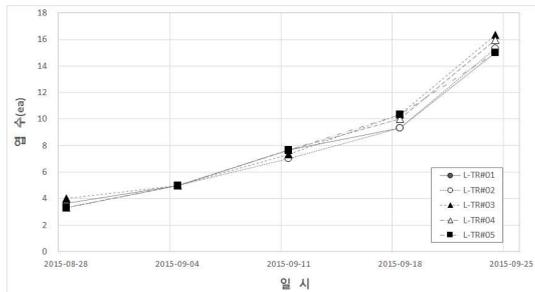
표 3.34 상추(포트실험) 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
L-TR#01	22.0±1.0a	18.2±2.1a	18.5±0.5a
L-TR#02	22.3±0.6a	17.3±0.3a	17.6±1.4a
L-TR#03	22.7±1.5a	17.7±0.8a	17.6±1.3a
L-TR#04	23.3±1.5a	16.6±0.7a	17.7±2.0a
L-TR#05	22.7±0.6a	17.9±1.8a	18.1±0.6a
F-value	0.579	0.590	0.281
p	0.685	0.677	0.884

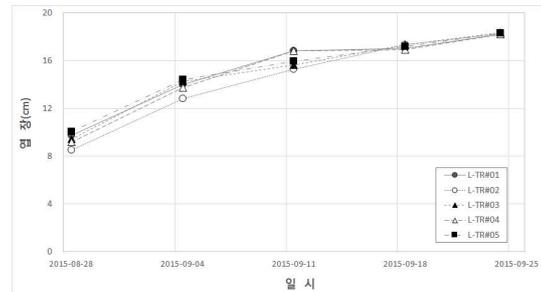
*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

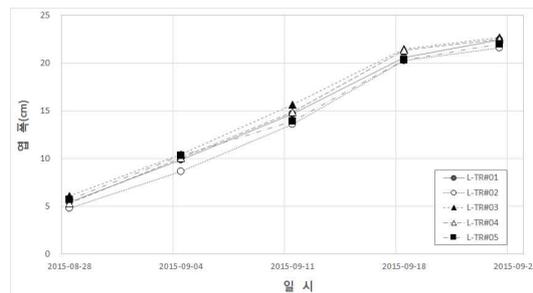
3차 상추 생육결과도 앞선 1, 2차 생육결과와 마찬가지로 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장, 그리고 엽폭의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수의 경우 L-TR#03 (19.3 ea)이 가장 많았으며, 다음으로 L-TR#02 (19.0 ea), L-TR#01, L-TR#04 (18.3 ea), L-TR#05 (18.0 ea) 순으로 나타났지만 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 엽폭 또한 L-TR#03 (20.6 cm)에서 다른 처리구에 비해 가장 높게 나타났으나 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).



(a) 엽수



(b) 엽장



(c) 엽폭

그림 3.28 상추(포트실험) 처리구별 생육변화 (3차)

표 3.35 상추(포트실험) 처리구별 생육변화 (3차)

일시	L-TR#01			L-TR#02			L-TR#03		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)
15/08/28	4.00	8.73	5.70	4.00	8.37	5.50	4.00	8.93	5.57
15/09/04	6.00	12.57	10.37	6.00	12.50	10.10	6.33	13.20	10.10
15/09/11	8.67	16.47	15.27	8.67	15.60	15.23	9.00	15.57	16.33
15/09/18	12.00	16.77	18.67	12.67	17.50	18.63	13.67	17.00	18.33
15/09/24	18.33	18.13	20.07	19.00	17.60	20.17	19.33	17.97	20.63
일시	L-TR#04			L-TR#05			-		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)			
15/08/28	4.00	8.93	6.17	4.00	8.57	5.50			
15/09/04	6.33	12.83	10.80	6.00	12.57	10.53			
15/09/11	9.33	15.00	15.63	8.67	15.33	14.83			
15/09/18	12.33	17.27	18.37	12.00	17.17	18.37			
15/09/24	18.33	17.80	19.30	18.00	17.23	20.23			

표 3.36 상추(포트실험) 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (3차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
L-TR#01	18.3±1.2a	18.1±0.8a	20.1±1.2a
L-TR#02	19.0±1.7a	17.6±0.8a	20.2±1.5a
L-TR#03	19.3±2.1a	18.0±0.6a	20.6±1.0a
L-TR#04	18.3±1.2a	17.8±0.5a	19.3±1.0a
L-TR#05	18.0±0.0a	17.0±0.6a	20.2±1.1a
F-value	0.450	1.329	0.519
p	0.770	0.324	0.724

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(4) 생체중량

상추의 생체중량은 1차 5월 8일, 2차 8월 4일, 3차 9월 24일에 처리구별 3반복구의 작물을 수확하여 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다.

1차 전체 생체중량 분석 결과 L-TR#01 (241.0 g)과 L-TR#03 (268.3 g)에서 다른 처리구에 비해 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), 나머지 3개의 처리구 사이에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 뿌리를 제외한 상부 생체중량은 L-TR#03 (249.7g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으며, L-TR#01 (217.3 g), L-TR#05 (226.0 g)와 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).

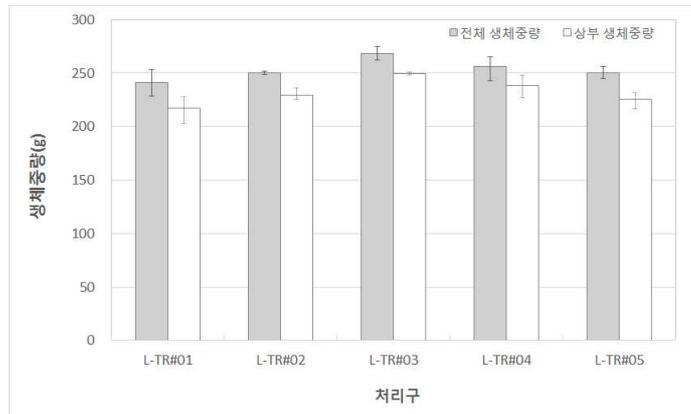


그림 3.29 상추(포트실험) 처리구별 생체중량 (1차)

표 3.37 상추(포트실험) 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
L-TR#01	241.0±12.0a	217.3±12.9b
L-TR#02	250.7±1.5ab	229.7±5.5ab
L-TR#03	268.3±6.5b	249.7±1.5a
L-TR#04	256.0±11.5ab	238.0±10.5ab
L-TR#05	250.7±5.5ab	226.0±7.9b
F-value	4.245	6.078
p	0.029	0.010

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

2차 전체 생체중량 분석 결과 L-TR#03 (141.7 g)에서 가장 높게 나타났으며 L-TR#01 (133.3 g)에서 다른 처리구에 비해 낮게 나타났으나 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P>0.05$). 뿌리를 제외한 상부 생체중량 또한 L-TR#03 (128.7 g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으며, L-TR#01 (120.3 g) 처리구에서 가장 낮게 나타났으나 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P>0.05$).

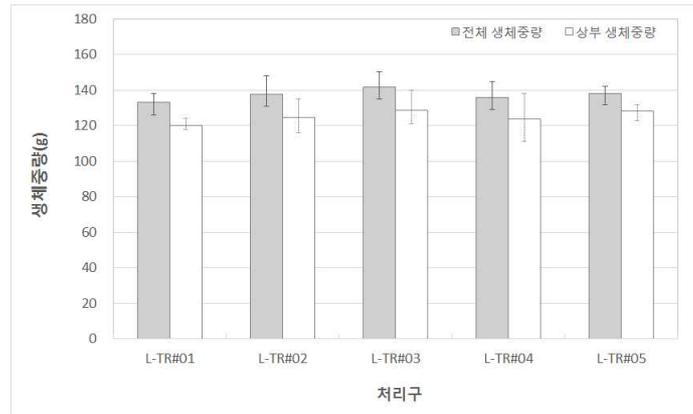


그림 3.30 상추(포트실험) 처리구별 생체중량 (2차)

표 3.38 상추(포트실험) 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
L-TR#01	133.3±6.4a	120.3±3.2a
L-TR#02	137.7±9.1a	124.7±9.6a
L-TR#03	141.7±7.6a	128.7±10.0a
L-TR#04	136.0±8.2a	123.7±13.6a
L-TR#05	138±5.3a	128.3±4.7a
F-value	0.502	0.441
p	0.735	0.777

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

3차 전체 생체중량 분석 결과 L-TR#02 (146.7 g), L-TR#03 (146.0 g)에서 높게 나타났으며 L-TR#05 (131.7 g)에서 다른 처리구에 비해 낮게 나타났으나 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P>0.05$). 뿌리를 제외한 상부 생체중량의 경우 L-TR#03 (129.3 g), L-TR#02 (127.0 g) 순으로 값이 나타났으며, L-TR#04 (116.3 g) 처리구에서 가장 낮게 나타났다.

분석결과, 전반적으로 Ayers와 Westcot (1985)에서 제시한 관개용수 100% 수확량 임계수 준인 0.9 dS/m (L-TR#03)에서 생육이 가장 활발하게 일어나는 것으로 나타났으며 L-TR#01과 최고 염도수준인 L-TR#05에서 생육이 낮게 나타났다.

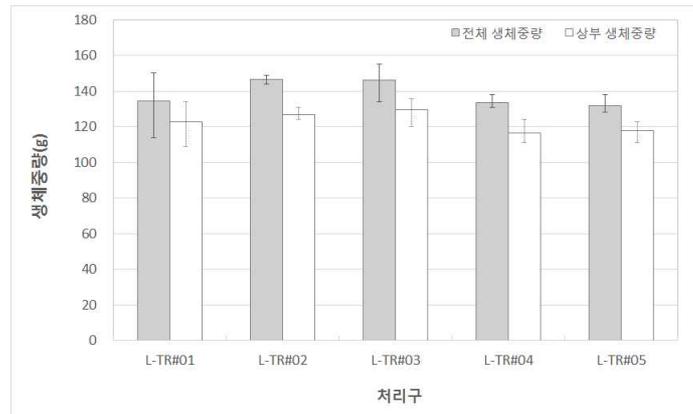


그림 3.31 상추(포트실험) 처리구별 생체중량 (3차)

표 3.39 상추(포트실험) 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (3차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
L-TR#01	134.3±18.4	123.00±12.8
L-TR#02	146.7±2.5	127.0±3.6
L-TR#03	146.0±10.8	129.3±8.3
L-TR#04	133.7±3.8	116.3±6.8
L-TR#05	131.7±5.5	117.7±6.1
F-value	1.552	1.464
p	0.261	0.284

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺에 대해 수확한 상추개체를 대상으로 분석하였다. 생체중량과 동일하게 1차 5월 8일, 2차 8월 4일, 3차 9월 24일에 수확하여 조사하였으며 처리구별 3반복 구에 대하여 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 1차 처리구별 식물체 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.05), L-TR#01 (3,713.2 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 L-TR#05에서 12,448.6 mg/kg으로 분석되었다. 2차 분석결과에서는 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으나 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았으며, 3차 분석결과는 1차와 마찬가지로 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.05), L-TR#01 (7,457.0 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나며 최고 염도 수준인 L-TR#05에서 13,689.1 mg/kg으로 분석되었다.

표 3.40 상추(포트실험) 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
15/05/08	3713.2 ±303.5d	7872.3 ±1555.4c	9146.9 ±776.3bc	11030.6 ±875.3ab	12448.6 ±321.3a
F-value	42.490				
p	0.000				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

표 3.41 상추(포트실험) 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
15/08/04	7398.7 ±2467.8a*	8508.9 ±3391.8a**	8928.0 ±3463.0a	9476.2 ±3075.2a	9646.1 ±1147.7a
F-value	0.301				
p	0.871				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

표 3.42 상추(포트실험) 처리구별 식물체 성분 분석결과 (3차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
15/09/25	7457.0 ±383.5c	10679.2 ±1242.4b	12214.4 ±1218.4ab	13513.9 ±589.1a	13689.1 ±1090.5a
F-value	20.995				
p	0.000				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(6) 토양환경 조사 분석

상추(포트실험)의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 1차 상추 수확 후와 3차 상추 수확 후 각 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다. 먼저, 1차 상추 수확 후 처리구별 토양의 화학적 성분 분석결과, pH의 경우 모든 처리구에서 5.2 수준으로 비슷하게 나타났다. EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 값이 높게 나타났으며 L-TR#04 (20.51 dS/m) 에서 가장 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 L-TR#05 (2805.58 mg/kg)에서 L-TR#01 (531.34 mg/kg)에 비해 5배 가량 높은 값이 나타났으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

2차와 3차 2차례에 걸친 상추(포트실험)는 최종적인 3차 상추 수확 후 각 처리구별 토양의 화학적 성분을 분석하였다. pH의 경우 모든 처리구에서 6.2 수준으로 비슷하게 나타났으며, EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 높게 나타났고 L-TR#04 (18.21 dS/m) 에서 가장 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 L-TR#01 (1414.89 mg/kg)에 비해 L-TR#05 (3775.17 mg/kg)가 2.7배 가량 높았으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

표 3.43 상추(포트실험) 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과 (1차)

구분	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
pH	5	5.2	5.2	5.1	5.3
CEC(cmol/kg)	77.32	90.29	83.51	79.68	78.35
T-N(%)	0.601	0.614	0.556	0.509	0.6
T-P(mg/kg)	687.54	1066.36	639.72	686.55	718.98
P ₂ O ₅ (mg/kg)	277.5	605.1	354.76	405.08	315.44
Ca ²⁺ (mg/kg)	4719.37	4727.44	4844.35	4870.21	4238.65
Mg ²⁺ (mg/kg)	1265.47	1383.64	1401.5	1427.45	1129.79
Na ⁺ (mg/kg)	531.34	1461.48	2151.77	2408.78	2805.58
K ⁺ (mg/kg)	1620.38	2014.52	1846.1	1957.27	1694.24
유기물함량(%)	59.75	59.68	58.71	64.78	54.31
EC(dS/m)	6.38	12.42	15.15	20.51	20.16
SAR	1.25	3.40	4.95	5.52	7.00

표 3.44 상추(포트실험) 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과 (3차)

구분	L-TR#01	L-TR#02	L-TR#03	L-TR#04	L-TR#05
pH	6.1	6.3	6.1	6.1	6.4
CEC(cmol/kg)	72.95	73.34	76.83	78.84	79.88
T-N(%)	0.627	0.663	0.693	0.629	0.592
T-P(mg/kg)	905.87	748.93	659.17	867.4	767.1
P ₂ O ₅ (mg/kg)	434.78	344.56	284.79	435.6	303.74
Ca ²⁺ (mg/kg)	7154.25	7570.83	7688.73	7093.77	7647.57
Mg ²⁺ (mg/kg)	2074.11	1990.77	2085.51	1956.78	1949.4
Na ⁺ (mg/kg)	1414.89	1836.78	2544.09	3031.32	3775.17
K ⁺ (mg/kg)	1963.74	2118.81	2336.58	2253.69	2274.39
유기물 함량(%)	59.71	45.57	67.74	61.56	65.39
EC(dS/m)	6.77	8.01	17.72	18.21	16.94
SAR	2.68	3.43	4.69	5.81	7.05

다. 당근

(1) 관개량

당근 (*Daucus carota* L.) 작물재배는 약 12~15주 동안 5개의 처리구 3반복으로 이루어졌다. 재배기간 동안 필요시마다 관개하였으며 1차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 44회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 17.2 L로 측정되었다. 2차 재배기간 동안에는 처리구별 관개용수 공급 횟수 총 33회, 처리구당 총 관개용수 공급량이 12.2 L로 측정되었다. 관개용수의 공급은 다음 표에 나타난 바와 같이 수행하였으며, 생육말기에 관개용수의 공급이 많이 이루어진 것을 볼 수 있다.

표 3.45 당근 생육실험 관개량 (1차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/03/13	11:30	0.5	15/05/04	10:00	0.3
15/03/15	10:00	0.3	15/05/06	10:00	0.4
15/03/17	10:00	0.3	15/05/08	10:00	0.5
15/03/19	10:00	0.3	15/05/09	10:00	0.5
15/03/21	10:00	0.3	15/05/11	10:00	0.5
15/03/23	10:00	0.3	15/05/12	10:00	0.5
15/03/25	10:00	0.3	15/05/14	10:00	0.5
15/03/27	10:00	0.3	15/05/16	10:00	0.5
15/03/29	10:00	0.3	15/05/18	10:00	0.5
15/04/01	10:00	0.3	15/05/20	10:00	0.5
15/04/04	10:00	0.3	15/05/21	10:00	0.5
15/04/06	10:00	0.3	15/05/23	10:00	0.5
15/04/08	10:00	0.3	15/05/24	10:00	0.5
15/04/12	10:00	0.2	15/05/26	10:00	0.5
15/04/17	10:00	0.3	15/05/27	10:00	0.5
15/04/21	10:00	0.3	15/05/29	10:00	0.5
15/04/23	10:00	0.3	15/05/31	10:00	0.5
15/04/25	10:00	0.3	15/06/02	10:00	0.5
15/04/27	10:00	0.3	15/06/03	10:00	0.5
15/04/29	10:00	0.3	15/06/04	10:00	0.5
15/05/01	10:00	0.3	15/06/07	10:00	0.5
15/05/03	10:00	0.3	15/06/08	10:00	0.3
총계			17.2		

표 3.46 당근 생육실험 관개량 (2차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/06/12	10:00	0.5	15/08/01	10:00	0.3
15/06/13	10:00	0.2	15/08/04	10:00	0.5
15/06/15	10:00	0.3	15/08/06	10:00	0.5
15/06/16	10:00	0.2	15/08/08	10:00	0.5
15/06/17	10:00	0.2	15/08/10	10:00	0.3
15/06/21	10:00	0.3	15/08/12	10:00	0.3
15/06/23	10:00	0.3	15/08/14	10:00	0.5
15/06/28	10:00	0.3	15/08/16	10:00	0.5
15/07/02	10:00	0.3	15/08/20	10:00	0.5
15/07/08	10:00	0.3	15/08/22	10:00	0.5
15/07/11	10:00	0.3	15/08/24	10:00	0.5
15/07/15	10:00	0.3	15/08/27	10:00	0.5
15/07/18	10:00	0.3	15/08/28	10:00	0.3
15/07/21	10:00	0.3	15/08/30	10:00	0.5
15/07/26	10:00	0.3	15/09/01	10:00	0.5
15/07/28	10:00	0.3	15/09/03	10:00	0.5
15/07/30	10:00	0.3			
총계	12.2				

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

당근 생육기간동안 처리구별로 염도의 지표인 EC를 매주 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다. 1차 생육기간동안 C-TR#01의 염도수준은 평균 0.285 dS/m로 나타났으며, 처리구는 임계수준 전후로 각각 0.5 dS/m (C-TR#02), 0.7 dS/m (C-TR#03, FAO 임계수준), 0.9 dS/m (C-TR#04), 그리고 1.1 dS/m (C-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 유지시켜주었다. 2차 생육기간동안 C-TR#01의 염도수준은 평균 0.292 dS/m로 나타났으며, 처리구는 임계수준 전후로 각각 0.5 dS/m (C-TR#02), 0.7 dS/m (C-TR#03, FAO 임계수준), 0.9 dS/m (C-TR#04), 그리고 1.1 dS/m (C-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 유지시켜 주었다.

표 3.47 당근 관개용수 염도 모니터링 (1차)

일자	EC _w				
	C-TR#01	C-TR#02	C-TR#03	C-TR#04	C-TR#05
15/03/19	0.336	0.561	0.741	0.964	1.10
15/03/26	0.331	0.5	0.656	0.885	1.07
15/04/02	0.294	0.465	0.625	0.787	0.982
15/04/09	0.26	0.4	0.548	0.719	0.867
15/04/23	0.278	0.51	0.723	0.927	1.124
15/04/30	0.313	0.495	0.692	0.907	1.094
15/05/07	0.292	0.525	0.746	0.964	1.167
15/05/14	0.26	0.58	0.892	1.06	1.373
15/05/21	0.257	0.584	0.898	1.098	1.392
15/05/28	0.25	0.597	0.903	1.081	1.382
15/06/04	0.267	0.53	0.754	0.959	1.197
평균	0.285	0.522	0.743	0.941	1.159

표 3.48 당근 관개용수 염도 모니터링 (2차)

일자	EC _w				
	C-TR#01	C-TR#02	C-TR#03	C-TR#04	C-TR#05
15/06/12	0.267	0.53	0.754	0.959	1.197
15/06/18	0.298	0.524	0.713	0.903	1.111
15/06/25	0.278	0.512	0.699	0.893	1.054
15/07/02	0.281	0.503	0.688	0.895	1.085
15/07/09	0.303	0.514	0.703	0.897	1.087
15/07/16	0.269	0.442	0.651	0.802	1.08
15/07/23	0.278	0.502	0.731	0.912	1.094
15/07/30	0.284	0.505	0.721	0.934	1.112
15/08/06	0.292	0.512	0.723	0.905	1.1
15/08/13	0.297	0.51	0.732	0.905	1.098
15/08/20	0.303	0.502	0.698	0.88	1.086
15/08/27	0.321	0.479	0.654	0.862	1.073
15/09/03	0.322	0.517	0.693	0.901	1.077
평균	0.292	0.504	0.705	0.896	1.096

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 당근 재배기간 동안 관개용수를 3회 샘플링 하여 pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온, 그리고 음이온 등 17항목에 대하여 분석하였다. 작물 재배에 사용된 관개용수의 수질분석 결과 pH는 모든 처리구에서 평균 7.8~8.0 수준으로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5~8.5를 만족하는 것으로 나타났다.

1차 생육기간에는 2회 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 4.3~4.7 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P 또한 모든 처리구에서 0.02 mg/L이하의 비슷한 수준으로 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺는 C-TR#01에서 6.96 mg/L로 나타났으며 다른 처리구는 평균 C-TR#02 40.02 mg/L, C-TR#03 69.7 mg/L, C-TR#04 108.27 mg/L, C-TR#05 139.19 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na⁺값이 높게 나타났다. Na⁺를 제외한 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 C-TR#01에서 평균 0.20, C-TR#02 (1.14), C-TR#03 (1.99), C-TR#04 (3.08), 그리고 C-TR#05에서 3.96으로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

표 3.49 당근 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	mg/L										EC	SAR
											SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	dS/m			
초기수질	15/03/05	7.5	11.1	0.5	0.8	4.69	ND	ND	ND	-	-	-	-	-	36.71	6.37	6.38	1.642	0.27	0.181		
C-TR#01	15/03/13	7.8	10.2	0.6	0.8	4.51	0.015	ND	0.004	-	-	-	-	-	36.52	6.28	6.96	1.63	0.28	0.198		
C-TR#02	15/03/13	7.9	10	0.6	0.6	4.65	0.02	1.00	ND	-	-	-	-	-	36.61	6.30	40.29	1.66	0.45	1.143		
	15/04/03	7.9	10.6	0.4	0.6	4.36	ND	ND	-	67.7	11.9	4.21	-	ND	35.36	6.24	39.75	2.38	0.43	1.145		
C-TR#03	15/03/13	7.9	11.4	0.5	0.7	4.54	0.009	1.00	ND	-	-	-	-	-	36.64	6.30	70.92	1.67	0.61	2.012		
	15/04/03	7.9	11.8	0.5	0.6	4.34	ND	ND	-	110.8	11.9	4.21	-	ND	35.68	6.29	68.48	2.43	0.58	1.963		
C-TR#04	15/03/13	7.8	9.8	0.6	0.8	4.60	0.008	2.00	ND	-	-	-	-	-	36.98	6.37	108.46	1.71	0.80	3.062		
	15/04/03	7.9	10.8	0.7	0.8	4.32	ND	1.00	-	175.1	11.9	4.21	-	ND	35.49	6.26	108.08	2.48	0.76	3.107		
C-TR#05	15/03/13	7.8	10.2	0.7	0.9	4.66	0.014	1.00	ND	-	-	-	-	-	37.00	6.37	137.84	1.70	0.95	3.891		
	15/04/03	8	11	0.6	0.8	4.4	ND	1.00	-	235.2	11.9	4.2	-	ND	35.55	6.27	140.53	2.43	0.92	4.036		

(3) 작물생육

당근의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 5개 처리구 및 3반복구에 대하여 매주 엽수, 엽장에 대해 생육모니터링을 2차에 걸쳐 실시하였다. 또한 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0 (SPSS, Inc., 2012)를 사용하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 터키 검증 (Tukey's HSD)을 사용하였다.

먼저 1차 당근의 작물생육 결과, 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장의 변화는 유사하며 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수의 경우 C-TR#03 (17.67 ea)이 가장 많았으며, 다음으로 C-TR#02 (15.67 ea), C-TR#05 (14.67 ea), C-TR#04 (14.33 ea), C-TR#01 (13.67 ea) 순으로 나타났지만 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 엽장의 경우 C-TR#03 (46.97 cm)에서 가장 높게 나타났으며, 다른 처리구들에서는 유사한 수준으로 나타났으며 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).

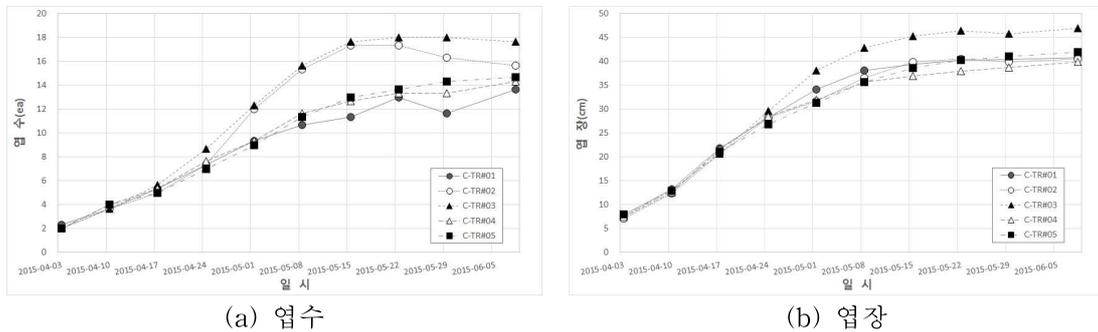


그림 3.32 당근 처리구별 생육변화 (1차)

표 3.50 당근 처리구별 생육변화 (1차)

일시	C-TR#01		C-TR#02		C-TR#03		C-TR#04		C-TR#05	
	엽수 (ea)	엽장 (cm)								
15/04/03	2.3	7.8	2.0	7.1	2.0	7.5	2.0	7.5	2.0	7.9
15/04/10	3.7	13.2	3.7	12.4	3.7	13.1	4.0	12.5	4.0	12.8
15/04/17	5.3	21.8	5.0	20.6	5.7	20.6	5.3	21.5	5.0	21.0
15/04/24	7.3	28.2	7.3	28.2	8.7	29.6	7.7	28.4	7.0	26.9
15/05/01	9.3	34.1	12.0	31.7	12.3	38.1	9.3	31.9	9.0	31.3
15/05/08	10.7	38.1	15.3	36.6	15.7	42.9	11.7	35.6	11.3	35.6
15/05/15	11.3	39.4	17.3	39.9	17.7	45.3	12.7	37.0	13.0	38.6
15/05/22	13.0	40.3	17.3	40.6	18.0	46.5	13.3	37.9	13.7	40.3
15/05/29	11.7	40.5	16.3	39.9	18.0	45.8	13.3	38.8	14.3	41.1
15/06/08	13.7	40.7	15.7	40.5	17.7	47.0	14.3	39.8	14.7	42.0

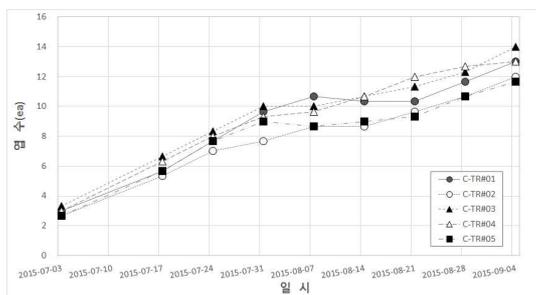
표 3.51 당근 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)
C-TR#01	13.7±2.1a	40.7±3.3a
C-TR#02	15.7±3.8a	4.05±3.5a
C-TR#03	17.7±8.1a	47.0±8.2a
C-TR#04	14.3±1.5a	39.8±4.2a
C-TR#05	14.7±0.6a	42.0±2.6a
F-value	0.414	1.079
p	0.795	0.417

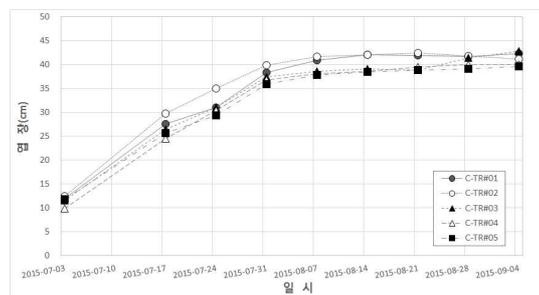
*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

2차 당근 생육결과, 1차 생육결과와 마찬가지로 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수의 경우 C-TR#03 (14.0 ea)이 가장 많았으며, 다음으로 C-TR#01, C-TR#04 (13.0 ea), C-TR#02 (12.0 ea), C-TR#05 (11.67 ea) 순으로 나타났지만 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 (P>0.05). 엽장의 경우 전체적으로 39.67cm ~ 42.87cm로 차이가 크게 나타나지 않았으며, 처리구간의 차이는 유의성은 없는 것으로 나타났다 (p>0.05).



(a) 엽수



(b) 엽장

그림 3.33 당근 처리구별 생육변화 (2차)

표 3.52 당근 처리구별 생육변화 (2차)

일시	C-TR#01		C-TR#02		C-TR#03		C-TR#04		C-TR#05	
	엽수 (ea)	엽장 (cm)								
15/07/03	3.0	12.0	2.7	12.4	3.3	11.6	3.0	9.8	2.67	11.8
15/07/17	5.7	27.5	5.3	29.8	6.7	26.4	6.3	24.5	5.67	25.7
15/07/24	7.7	31.0	7.0	35.1	8.3	31.1	8.0	30.4	7.67	29.4
15/07/31	9.7	38.3	7.7	39.9	10.0	37.5	9.3	36.9	9.00	35.9
15/08/07	10.7	40.9	8.7	41.7	10.0	38.6	9.7	38.1	8.67	37.8
15/08/14	10.3	42.1	8.7	42.0	10.7	39.1	10.7	38.6	9.00	38.5
15/08/21	10.3	41.9	9.7	42.4	11.3	38.9	12.0	39.5	9.33	38.8
15/08/28	11.7	41.7	10.7	41.9	12.3	41.5	12.7	40.0	10.67	39.2
15/09/04	13.0	42.4	12.0	41.2	14.0	42.9	13.0	40.0	11.67	39.67

표 3.53 당근 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)
C-TR#01	13.0±3.5a	42.4±7.5a
C-TR#02	12.0±3.6a	41.2±4.5a
C-TR#03	14.0±2.0a	42.9±3.6a
C-TR#04	13.0±0.0a	40.0±5.8a
C-TR#05	11.7±1.5a	39.7±5.5a
F-value	0.410	0.193
p	0.798	0.936

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

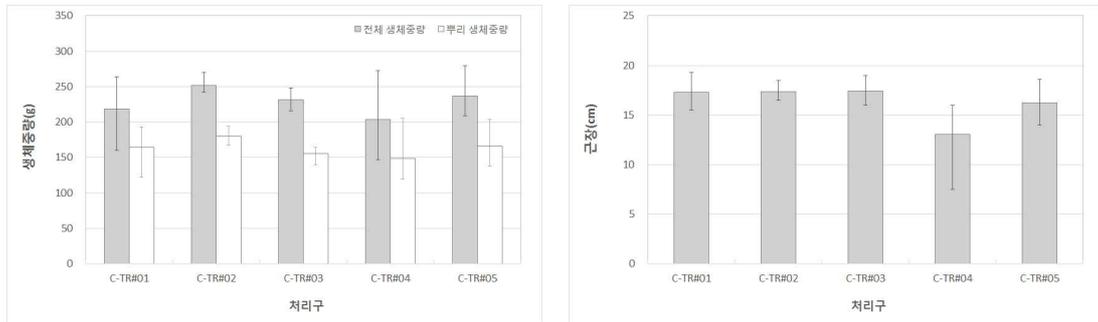
**Mean±deviation(n=3)

(4) 생체중량 및 당도

당근의 생체중량은 1차 2015년 6월 8일, 2차 9월 4일에 처리구별 3반복구의 작물을 수확하여 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다.

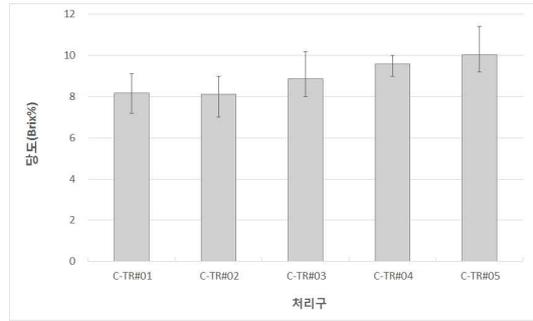
뿌리를 포함한 1차 전체 생체중량 분석 결과 C-TR#02 (251.7 g)에서 가장 높게 나타났으며, C-TR#04 (204.0 g)에서 다른 처리구에 비해 낮게 나타났으나 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($p>0.05$). 뿌리 생체중량 또는 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았지만($p>0.05$) C-TR#02 (180.3g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으며, C-TR#04 (148.3g)으로 가장 낮은 값이 나타났다. 당도의 경우에도 C-TR#05에서 가장 큰 값을 나타냈으나 통계적으로 유의한 차이가 나타나지는 않았다.

뿌리를 포함한 2차 전체 생체중량 분석 결과 C-TR#04 (163.7 g)에서 가장 높게 나타났으며, C-TR#05 (121.7 g)에서 다른 처리구에 비해 낮게 나타났으나 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($p>0.05$). 뿌리 생체중량 또는 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았지만($p>0.05$) C-TR#04 (111.0 g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으며, C-TR#05 (84.0g)으로 가장 낮은 값이 나타났다. 당도의 경우에는 1차 실험 결과와는 반대로 C-TR#05에서 가장 낮은 값을 나타냈으나 통계적으로 유의한 차이가 나타나지는 않았다.



(a) 생체중량

(b) 근장



(c) 당도

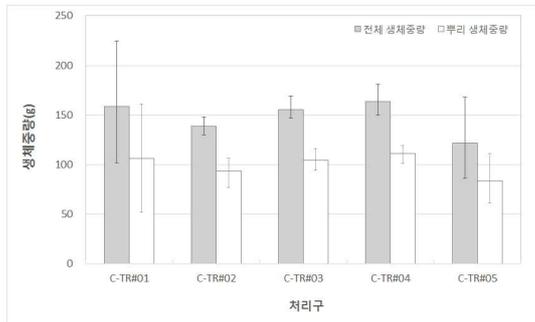
그림 3.34 당근 처리구별 생체중량 및 당도 (1차)

표 3.54 당근 처리구별 생체중량 및 당도 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

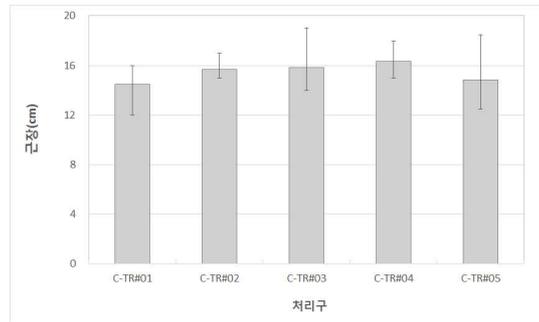
처리구	전체 생체중량(g)	뿌리 생체중량(g)	근장(cm)	당도(Brix%)
C-TR#01	218.3±53.1a	164.3±37.4a	17.3±1.9a	8.2±1.0a
C-TR#02	251.7±15.9a	180.3±13.1a	17.3±1.0a	8.1±1.0a
C-TR#03	231.3±16.0a	155.3±13.3a	17.4±1.5a	8.9±1.2a
C-TR#04	204.0±63.9a	148.3±49.1a	13.1±4.8a	9.6±0.5a
C-TR#05	237.0±37.8a	166.3±34.0a	16.2±2.3a	10.0±1.2a
F-value	0.560	0.415	1.448	2.148
p	0.697	0.795	0.289	0.149

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

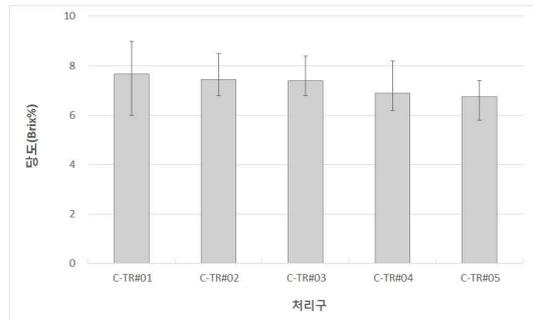
**Mean±deviation(n=3)



(a) 생체중량



(b) 근장



(c) 당도

그림 3.35 당근 처리구별 생체중량 및 당도 (2차)

표 3.55 당근 처리구별 생체중량 및 당도 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	전체 생체중량(g)	뿌리 생체중량(g)	근장 (cm)	당도 (Brix%)
C-TR#01	158.3±62.1a	106.0±54.4a	14.5±2.2a	7.7±1.5a
C-TR#02	138.7±9.0a	93.7±15.3a	15.7±1.2a	7.4±0.9a
C-TR#03	155.7±11.7a	104.0±11.1a	15.8±2.8a	7.4±0.9a
C-TR#04	163.7±15.8a	111.0±9.2a	16.3±1.5a	6.9±1.1a
C-TR#05	121.7±42.0a	84.0±25.2a	14.8±3.2a	6.7±0.8a
F-value	0.732	0.434	0.321	0.390
p	0.590	0.781	0.857	0.811

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na^+ 에 대해 수확한 당근을 대상으로 분석하였다. 생체중량과 동일하게 1차 6월 8일, 2차 9월 4일에 수확하여 조사하였으며 처리구별 3반복구에 대하여 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다.

1차 처리구별 식물체 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), C-TR#01 (2572.8 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na^+ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 C-TR#05에서 8161.9 mg/kg으로 분석되었다. 2차 처리구별 식물체 성분 Na^+ 분석 결과 최고 염도수준인 C-TR#05에서 8967.0 mg/kg으로 가장 큰 값을 나타내었으나 유의한 차이는 나타나지 않았다.

표 3.56 당근 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na^+ (mg/kg)				
	C-TR#01	C-TR#02	C-TR#03	C-TR#04	C-TR#05
15/06/08	2572.8 ±77.1a	4469.6 ±685.6ab	5662.2 ±2068.4ab	5533.7 ±1438.9ab	8161.9 ±2769.5b
F-value	4.269				
p	0.029				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

표 3.57 당근 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na^+ (mg/kg)				
	C-TR#01	C-TR#02	C-TR#03	C-TR#04	C-TR#05
15/09/04	8355.3 ±2651.9a	5280.5 ±588.1a	6979.5 ±2503.5a	8640.9 ±1405.6a	8967.0 ±1338.1a
F-value	1.998				
p	0.171				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(6) 토양환경 조사 분석

당근의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 1차 당근 수확 후 각 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다.

먼저, 1차 당근 수확 후 처리구별 토양의 화학적 성분 분석결과를 정리하여 나타내었다. pH의 경우 모든 처리구에서 5.2 수준으로 비슷하게 나타났다. EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 값이 높게 나타났으며 C-TR#05 (23.96 dS/m) 에서 가장 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 C-TR#05 (5281.2 mg/kg)에서 C-TR#01 (703.68 mg/kg)에 비해 7배 가량 높은 값이 나타났으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

표 3.58 당근 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과 (1차)

구분	C-TR#01	C-TR#02	C-TR#03	C-TR#04	C-TR#05
pH	5.2	5.3	5.2	5.1	5.2
CEC(cmol/kg)	71.03	76.39	89.85	85.57	82.53
T-N(%)	0.587	0.591	0.585	0.562	0.568
T-P(mg/kg)	537.05	559.77	434.42	462.33	555
P ₂ O ₅ (mg/kg)	150.83	228.78	216	177.08	247.1
Ca ²⁺ (mg/kg)	4855.1	5700.86	5009.96	5306.54	4748.3
Mg ²⁺ (mg/kg)	1477.69	1582.43	1218.12	1458.13	1197.14
Na ⁺ (mg/kg)	703.68	2122.25	3317.79	4990.02	5281.2
K ⁺ (mg/kg)	1924.06	1985.18	2232.46	2351.46	2005.65
유기물함량(%)	61.19	67	68.18	69.42	64.85
EC(dS/m)	5.42	10.68	13.46	23.72	23.96
SAR	1.604	4.531	7.707	11.059	12.535

라. 아스파라거스

(1) 관개량

아스파라거스 (*Asparagus officinalis*) 작물재배는 약 28주 동안 5개의 처리구 3반복으로 이루어졌다. 재배기간 동안 필요시마다 관개하였으며 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 72회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 29.0 L로 측정되었다. 관개용수의 공급은 다음 표에 나타낸 바와 같이 이루어졌으며, 생육말기로 갈수록 관개용수의 공급이 많이 이루어진 것을 볼 수 있다.

표 3.59 아스파라거스 생육실험 관개량

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/05/22	10:00	0.5	15/08/06	10:00	0.5	15/10/07	10:00	0.3
15/05/23	10:00	0.5	15/08/08	10:00	0.3	15/10/12	10:00	0.5
15/05/25	10:00	0.5	15/08/11	10:00	0.2	15/10/15	10:00	0.3
15/05/28	10:00	0.3	15/08/13	10:00	0.3	15/10/17	10:00	0.3
15/05/31	10:00	0.3	15/08/15	10:00	0.3	15/10/18	10:00	0.5
15/06/02	10:00	0.3	15/08/17	10:00	0.3	15/10/20	10:00	0.5
15/06/04	10:00	0.3	15/08/22	10:00	0.5	15/10/22	10:00	0.3
15/06/07	10:00	0.3	15/08/24	10:00	0.3	15/10/25	10:00	0.5
15/06/08	10:00	0.3	15/08/28	10:00	0.5	15/10/28	10:00	0.5
15/06/11	10:00	0.2	15/08/30	10:00	0.3	15/11/01	10:00	0.5
15/06/13	10:00	0.2	15/09/02	10:00	0.5	15/11/03	10:00	0.5
15/06/15	10:00	0.3	15/09/04	10:00	0.3	15/11/05	10:00	0.5
15/06/17	10:00	0.2	15/09/07	10:00	0.5	15/11/08	10:00	0.5
15/06/21	10:00	0.3	15/09/09	10:00	0.5	15/11/12	10:00	0.5
15/06/23	10:00	0.3	15/09/12	10:00	0.5	15/11/15	10:00	0.5
15/06/28	10:00	0.3	15/09/15	10:00	0.5	15/11/18	10:00	0.5
15/07/03	10:00	0.3	15/09/17	10:00	0.5	15/11/21	10:00	0.5
15/07/08	10:00	0.3	15/09/19	10:00	0.5	15/11/25	10:00	0.5
15/07/12	10:00	0.3	15/09/21	10:00	0.5	15/11/29	10:00	0.5
15/07/15	10:00	0.3	15/09/23	10:00	0.5	15/12/04	10:00	0.5
15/07/21	10:00	0.3	15/09/25	10:00	0.5	15/12/07	10:00	0.5
15/07/26	10:00	0.3	15/09/27	10:00	0.5	15/12/10	10:00	0.5
15/07/30	10:00	0.3	15/09/30	10:00	0.5	15/12/13	10:00	0.5
15/08/03	10:00	0.3	15/10/05	10:00	0.5	15/12/17	10:00	0.5
총계	29.0							

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

아스파라거스 생육기간동안 처리구별로 염도의 지표인 EC를 매주 측정하였으며 측정결과는 다음과 같다. 전체 생육기간동안 A-TR#01의 염도수준은 평균 0.34dS/m로 나타났으며, 처리구는 임계수준 전후로 각각 1.5 dS/m (A-TR#02), 2.7 dS/m (A-TR#03, FAO 임계수준), 4.0 dS/m (A-TR#04), 그리고 6.1 dS/m (A-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 유지시켜 주었다.

표 3.60 아스파라거스 관개용수 염도 모니터링

일자	EC _w				
	A-TR#01	A-TR#02	A-TR#03	A-TR#04	A-TR#05
15/05/22	0.321	1.52	3.184	4.404	6.372
15/05/28	0.235	1.447	2.737	4.063	5.931
15/06/04	0.283	1.452	2.848	4.096	6.225
15/06/11	0.279	1.452	2.896	4.22	6.216
15/06/18	0.3	1.485	2.713	3.987	6.094
15/06/25	0.311	1.425	2.706	3.972	6.061
15/07/02	0.311	1.435	2.708	4.006	6.169
15/07/09	0.33	1.414	2.696	3.989	6.057
15/07/16	0.302	1.452	2.838	4.08	6.176
15/07/23	0.321	1.497	2.711	4.02	6.124
15/07/30	0.311	1.506	2.698	4.042	6.103
15/08/06	0.318	1.523	2.728	4.007	6.113
15/08/13	0.327	1.516	2.689	4.006	6.061
15/08/20	0.319	1.504	2.676	4.065	6.076
15/08/27	0.318	1.438	2.565	4.014	6.007
15/09/03	0.336	1.54	2.766	4.078	6.128
15/09/10	0.32	1.537	2.811	4.01	6.107
15/09/17	0.381	1.572	2.865	4.054	6.078
15/09/24	0.387	1.497	2.721	4.012	6.121
15/10/01	0.43	1.472	2.578	4.015	6.104
15/10/07	0.395	1.498	2.721	4.009	6.096
15/10/21	0.396	1.491	2.582	4.054	5.911
15/10/30	0.385	1.485	2.561	4.078	6.028
15/11/06	0.381	1.502	2.697	4.041	6.076
15/11/13	0.386	1.411	2.717	4.023	6.105
15/11/20	0.387	1.521	2.72	4.043	6.187
15/11/27	0.379	1.532	2.714	4.078	6.176
15/12/04	0.395	1.531	2.722	3.998	6.158
15/12/11	0.386	1.524	2.704	4.033	6.117
평균	0.342	1.489	2.734	4.052	6.110

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 포트 아스파라거스 재배기간 동안 관개용수를 3회 샘플링하여 pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온, 그리고 음이온 등 17항목에 대하여 분석하였다. 작물 재배에 사용된 관개용수의 수질분석 결과 pH는 모든 처리구에서 평균 7.5~8.9 수준으로 나타났다.

1차 생육기간에는 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 2.8~4.7 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P는 모든 처리구에서 검출되지 않았다. 치환성 양이온 Na^+ 는 A-TR#01에서 8.14~8.75 mg/L로 나타났으며 다른 처리구는 A-TR#02 189.83~181.75 mg/L, A-TR#03 346.58~389.97 mg/L, A-TR#04 596.5~618.91 mg/L, A-TR#05 937.12~949.67 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 A-TR#01에서 평균 0.26, A-TR#02 (5.60), A-TR#03 (14.38), A-TR#04 (18.61), 그리고 A-TR#05에서 28.77로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

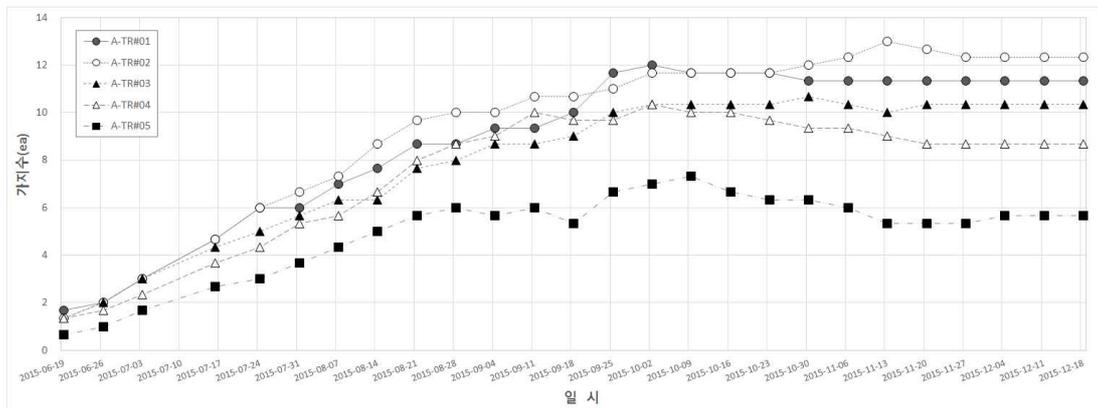
표 3.61 아스파라거스 관개용수 수질 모니터링 결과

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	EC	SAR
초기수질	15/03/05	7.5	11.1	0.5	0.8	4.69		ND	ND	ND	-	-	-	-	36.709	6.366	6.38	1.642	0.27	0.181
A-TR#01	15/07/01	8.6	8.5	0.5	0.7	3.36	ND	3	ND	16.1	10.8	3.02	92.72	ND	29.54	5.47	8.14	1.98	0.24	0.26
	15/10/12	8.4	7.3	0.1	0.7	2.85	ND	ND	ND	17.7	10.2	2.5	64.66	ND	35.16	6.12	8.75	1.94	0.26	0.25
A-TR#02	15/07/01	8.5	8.8	0.8	1.0	3.13	ND	6.00	ND	304.2	10.8	2.85	96.38	ND	30.71	5.67	189.83	1.89	1.15	5.84
	15/10/12	8.3	7.7	0.5	0.6	2.85	ND	ND	ND	279.5	10.4	2.5	128.1	ND	34.25	5.73	181.75	2.54	1.11	5.35
A-TR#03	15/07/01	8.5	9.2	0.9	1.1	3.27	ND	8.00	ND	624.7	10.9	2.93	94.55	ND	31.02	5.71	389.97	2	2.14	11.93
	15/10/12	8.1	7.5	0.3	0.5	2.84	ND	ND	ND	495.6	10.3	2.5	134.2	ND	33.03	5.54	346.58	2.79	1.86	10.38
A-TR#04	15/07/01	8.9	8.6	1.1	1.8	3.10	ND	13.00	ND	956.2	10.9	2.77	93.94	ND	30.49	5.71	596.5	2.05	3.10	18.37
	15/10/12	8.1	7.5	0.3	0.9	2.91	ND	ND	ND	841.4	10.4	2.5	125.05	ND	32.04	5.34	618.91	3.02	2.94	18.84
A-TR#05	15/07/01	8.5	8.2	1.3	2.0	3.3	ND	18.00	ND	1,525	11	2.94	92.11	ND	31.00	5.73	949.67	2.06	4.72	29.05
	15/10/12	8	7.6	0.4	2.4	2.93	ND	1.00	ND	1,315	10.3	2.5	134.2	ND	32.27	5.25	937.12	3.26	4.33	28.50

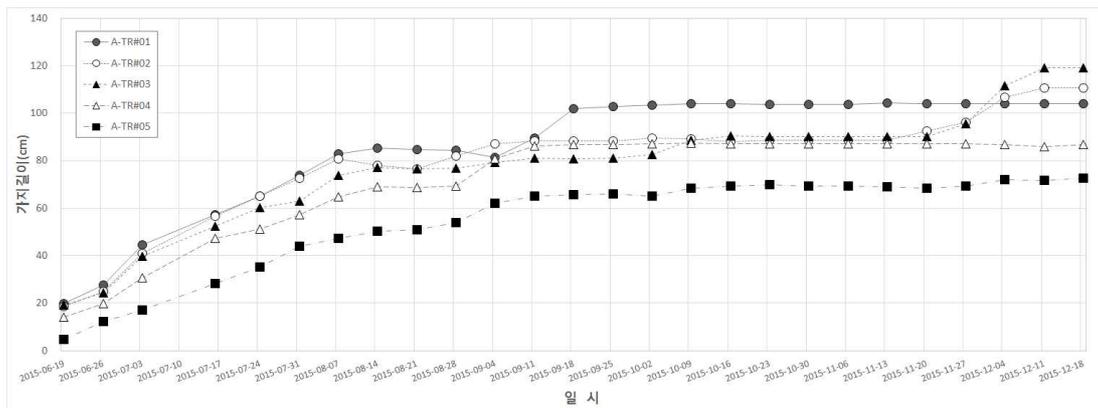
(3) 작물생육

아스파라거스의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 5개 처리구 및 3반복구에 대하여 매주 가지수, 가지길이에 대해 생육 모니터링을 실시하였다. 또한 수확 전 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0 (SPSS, Inc., 2012)를 사용하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 터키 검증(Tukey's HSD)을 사용하였다.

먼저 아스파라거스의 작물생육 결과, 시기별 처리구에 따른 가지수, 가지길이에서 뚜렷한 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 수확 후 처리구별 평균 가지수의 경우 A-TR#02 (12.3 ea)이 가장 많았으며, 다음으로 A-TR#01 (11.3 ea), A-TR#03 (10.3 ea), A-TR#04 (8.7 ea), A-TR#05 (5.7 ea) 순으로 나타났지만 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 가지길이의 경우 A-TR#03 (119.0 cm)에서 가장 높게 나타났으며, 가지수와 비슷하게 A-TR#02, A-TR#01, A-TR#04, A-TR#05 (72.7cm) 순으로 나타났다. 처리구간 통계적 유의성은 가지수, 가지길이 모두 나타나지 않았다 ($p>0.05$).



(a) 가지수



(b) 가지길이

그림 3.36 아스파라거스 처리구별 생육변화 (1차)

표 3.62 아스파라거스 처리구별 생육변화

일시	A-TR#01		A-TR#02		A-TR#03		A-TR#04		A-TR#05	
	가지수 (ea)	가지 길이 (cm)								
15/06/19	1.7	19.8	1.3	18.7	1.3	19.1	1.3	14.1	0.7	4.6
15/06/26	2.0	27.8	2.0	25.0	2.0	24.4	1.7	19.8	1.0	12.2
15/07/03	3.0	44.6	3.0	40.9	3.0	39.9	2.3	30.7	1.7	17.2
15/07/16	4.7	57.2	4.7	56.7	4.3	52.3	3.7	47.2	2.7	28.4
15/07/24	6.0	65.2	6.0	65.0	5.0	60.2	4.3	51.3	3.0	35.3
15/07/31	6.0	73.9	6.7	72.6	5.7	63.0	5.3	57.2	3.7	43.9
15/08/07	7.0	82.7	7.3	80.8	6.3	73.8	5.7	64.8	4.3	47.3
15/08/14	7.7	85.4	8.7	78.0	6.3	77.1	6.7	68.9	5.0	50.3
15/08/21	8.7	84.7	9.7	76.7	7.7	76.7	8.0	68.7	5.7	51.0
15/08/28	8.7	84.5	10.0	82.0	8.0	76.8	8.7	69.2	6.0	53.9
15/09/04	9.3	81.3	10.0	87.1	8.7	79.3	9.0	80.7	5.7	62.0
15/09/11	9.3	89.4	10.7	88.4	8.7	81.0	10.0	86.3	6.0	65.2
15/09/18	10.0	101.7	10.7	88.2	9.0	80.9	9.7	86.9	5.3	65.6
15/09/25	11.7	102.7	11.0	88.4	10.0	81.2	9.7	86.8	6.7	65.8
15/10/02	12.0	103.3	11.7	89.5	10.3	82.5	10.3	87.2	7.0	65.0
15/10/09	11.7	104.0	11.7	89.3	10.3	88.5	10.0	87.3	7.3	68.5
15/10/16	11.7	104.0	11.7	88.0	10.3	90.5	10.0	87.0	6.7	69.3
15/10/23	11.7	103.8	11.7	88.7	10.3	90.0	9.7	87.0	6.3	69.8
15/10/30	11.3	103.8	12.0	88.7	10.7	90.0	9.3	87.0	6.3	69.3
15/11/06	11.3	103.8	12.3	88.7	10.3	90.0	9.3	87.0	6.0	69.3
15/11/13	11.3	104.2	13.0	88.7	10.0	90.0	9.0	87.0	5.3	69.0
15/11/20	11.3	104.0	12.7	92.7	10.3	90.0	8.7	87.0	5.3	68.3
15/11/27	11.3	104.0	12.3	96.2	10.3	95.7	8.7	87.0	5.3	69.3
15/12/04	11.3	104.0	12.3	106.7	10.3	111.7	8.7	86.7	5.7	72.0
15/12/11	11.3	104.0	12.3	110.7	10.3	119.0	8.7	86.0	5.7	71.7
15/12/18	11.3	104.0	12.3	110.7	10.3	119.0	8.7	86.7	5.7	72.7

표 3.63 아스파라거스 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과

처리구	가지수(ea)	가지 길이(cm)
A-TR#01	11.3±4.9a	104.0±32.0a
A-TR#02	12.3±4.9a	110.7±27.0a
A-TR#03	10.3±0.6a	119.0±59.6a
A-TR#04	8.7±2.3a	86.7±22.7a
A-TR#05	5.7±2.5a	72.7±21.7a
F-value	1.690	0.839
p	0.228	0.531

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(4) 생체중량

아스파라거스의 생체중량은 2015년 12월 18일에 처리구별 3반복구의 작물을 수확하여 전체 생체중량, 상부 생체중량, 근장에 대해 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산 분석을 실시하였다. 전체 생체중량 분석 결과 A-TR#01 (223.7 g)에서 가장 큰 값을 나타내었으며, A-TR#05 (27.3 g)에서 가장 낮은 값을 나타내었다. ANOVA 분석결과 처리구별로 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 뿌리를 제외한 상부 생체중량의 경우에는 A-TR#01 (183.3g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으며, 전체 생체중량과 마찬가지로 A-TR#05 (21.0 g)에서 가장 낮은 값을 나타내었으며, 통계적으로도 A-TR#05는 타 처리구에 비해 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 근장의 경우에는 모든 처리구에서 비슷하게 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 분석결과, 전반적으로 Ayers와 Westcot (1985)에서 제시한 관개용수 100% 수확량 임계수준인 2.7 dS/m (A-TR#03)까지는 생육이 원활하게 이루어 졌으나, 염도가 높아질수록 생체중량이 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.

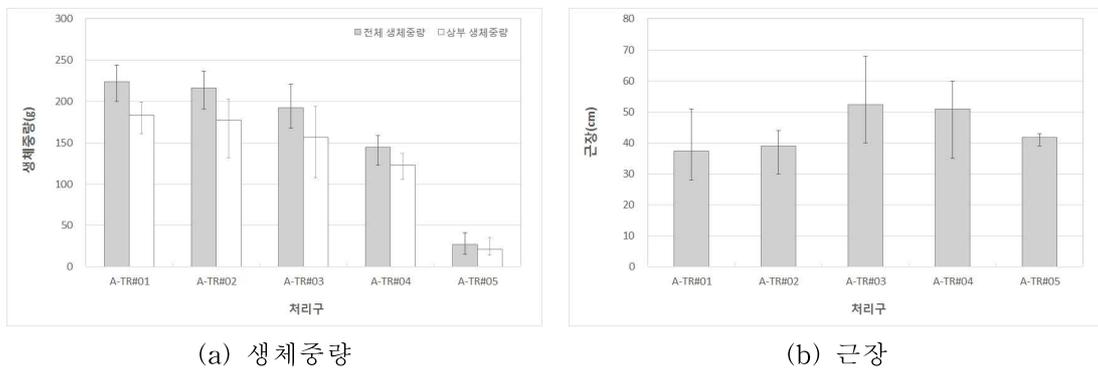


그림 3.37 아스파라거스 처리구별 생체중량

표 3.64 아스파라거스 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)	근장(cm)
A-TR#01	223.7±22.2c	183.3±19.9b	37.3±12.1a
A-TR#02	216.3±23.4c	177.3±39.4b	39.0±7.8a
A-TR#03	192.3±26.8bc	156.7±44.1b	52.3±14.3a
A-TR#04	144.7±19.1b	123.0±15.7b	51.0±13.9a
A-TR#05	27.3±13.1a	21.0±12.1a	41.7±2.3a
F-value	42.772	15.494	1.186
p	0.000	0.000	0.374

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na^+ 에 대해 수확한 아스파라거스개체를 대상으로 분석하였다. 생체중량과 동일하게 수확하여 조사하였으며 처리구별 3반복구에 대하여 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다.

처리구별 식물체 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), A-TR#01 (556.1 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na^+ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 A-TR#05에서 20338.5 mg/kg으로 분석되었다. 특히 관개용수 100% 수확량 임계수준인 2.7 dS/m에서 염도수준이 높아질수록 염분의 집적이 많이 이루어지는 것으로 분석되었다.

표 3.65 아스파라거스 처리구별 식물체 성분 분석결과

구분	Na^+ (mg/kg)				
	A-TR#01	A-TR#02	A-TR#03	A-TR#04	A-TR#05
15/12/18	556.1 ±154.2a	3355.0 ±3999.0a	6212.8 ±5988.4a	6650.7 ±4438.1a	20338.5 ±3783.2b
F-value	10.155				
p	0.002				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(6) 토양환경 조사 분석

아스파라거스의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 아스파라거스 수확 후 각 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다.

아스파라거스 수확 후 처리구별 토양의 화학적 성분 분석결과를 정리하여 나타내었다. pH의 경우 모든 처리구에서 5.5~6.2 수준으로 비슷하게 나타났다. EC의 경우 관개용수 처리구의 염도가 높아질수록 전반적으로 값이 높게 나타났으나 A-TR#05 (108.2 dS/m)에서는 A-TR#04 (311.25 dS/m) 대비 값이 낮게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우도 EC의 경우와 마찬가지로 염도가 높아질수록 전반적으로 값이 높게 나타났으나 A-TR#05에서는 A-TR#04 대비 값이 낮게 나타났다. 이는 앞서 제시한 작물성분 분석 결과와 연계하여 유추하여 보면, 최고 염도 수준인 A-TR#05에서는 작물의 염분 흡수가 많이 이루어져 토양에 집적된 양이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 분석되었다.

표 3.66 아스파라거스 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과

구분	A-TR#01	A-TR#02	A-TR#03	A-TR#04	A-TR#05
pH	6	5.5	5.5	5.6	6.2
CEC(cmol/kg)	37.83	32.67	28.44	38.07	45.78
T-N(%)	0.809	0.675	0.602	0.596	0.644
T-P(mg/kg)	910	1092.47	726.87	614.2	664.73
P ₂ O ₅ (mg/kg)	346.1	605.15	321.98	210.15	199.84
Ca ²⁺ (mg/kg)	7158.87	6358.65	6123.33	5222.97	4415.76
Mg ²⁺ (mg/kg)	1985.4	2484.66	2289.03	1536.63	694.65
Na ⁺ (mg/kg)	1219.92	13702.5	27251.7	34293.6	14528.7
K ⁺ (mg/kg)	3388.17	5013.24	4665.9	4316.19	3062.49
유기물 함량(%)	63.14	63.21	60.52	62.47	60.05
EC(dS/m)	14.54	159.35	275.65	311.25	108.2
SAR	2.324	26.086	53.320	75.783	37.904

마. 열갈이배추

(1) 관개량

열갈이배추 (*Brassica campestris* ssp. *pekinensis*) 작물재배는 약 4~5주 동안 5개의 처리구 3반복으로 2차에 걸쳐 이루어졌다. 재배기간 동안 필요시마다 관개하였으며 1차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 16회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 5.0 L로 측정되었다. 2차 재배기간 동안에는 처리구별 관개용수 공급 횟수 총 14회, 처리구당 총 관개용수 공급량이 3.6 L로 측정되었다. 관개용수의 공급은 다음 표에 나타난 바와 같이 이루어졌으며, 생육말기에 관개용수의 공급이 많이 이루어진 것을 볼 수 있다.

표 3.67 열갈이배추 생육실험 관개량 (1차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/06/05	10:00	0.5	15/06/22	10:00	0.3
15/06/06	10:00	0.2	15/06/25	09:00	0.2
15/06/08	10:00	0.2	15/06/28	10:00	0.3
15/06/09	10:00	0.2	15/06/30	10:00	0.3
15/06/11	10:00	0.2	15/07/03	10:00	0.5
15/06/13	10:00	0.2	15/07/06	10:00	0.3
15/06/15	10:00	0.3	15/07/07	10:00	0.5
15/06/17	10:00	0.3	15/07/09	10:00	0.5
총계	5.0				

표 3.68 열갈이배추 생육실험 관개량 (2차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/07/24	10:00	0.3	15/08/11	10:00	0.2
15/07/26	10:00	0.2	15/08/13	10:00	0.2
15/07/28	10:00	0.2	15/08/15	10:00	0.2
15/07/31	10:00	0.2	15/08/20	10:00	0.3
15/08/03	10:00	0.2	15/08/22	10:00	0.3
15/08/06	10:00	0.3	15/08/24	10:00	0.5
15/08/08	10:00	0.2	15/08/27	10:00	0.3
총계	3.6				

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

얼갈이배추 생육기간동안 처리구별로 염도의 지표인 EC를 매주 측정하였으며 측정결과는 다음과 같다. 전체 생육기간동안 CB-TR#01의 염도수준은 평균 0.3 dS/m로 나타났으며, 처리구는 임계수준 전후로 각각 0.9 dS/m (CB-TR#02), 1.2 dS/m (CB-TR#03), 1.5 dS/m (CB-TR#04), 그리고 1.9 dS/m (CB-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 관리하였다.

표 3.69 얼갈이배추 관개용수 염도 모니터링 (1차)

일자	EC _w				
	CB-TR#01	CB-TR#02	CB-TR#03	CB-TR#04	CB-TR#05
15/06/04	0.252	0.922	1.183	1.495	1.906
15/06/11	0.256	0.898	1.212	1.499	1.929
15/06/18	0.308	0.916	1.214	1.514	1.89
15/06/25	0.294	0.835	1.178	1.506	1.85
15/07/02	0.305	0.841	1.188	1.457	1.879
15/07/09	0.302	0.876	1.189	1.468	1.875
평균	0.286	0.881	1.194	1.490	1.888

표 3.70 얼갈이배추 관개용수 염도 모니터링 (2차)

일자	EC _w				
	CB-TR#01	CB-TR#02	CB-TR#03	CB-TR#04	CB-TR#05
15/07/09	0.302	0.876	1.189	1.468	1.875
15/07/30	0.312	0.916	1.214	1.504	1.896
15/08/06	0.342	0.913	1.218	1.512	1.91
15/08/13	0.330	0.904	1.198	1.506	1.921
15/08/20	0.321	0.911	1.207	1.527	1.952
15/08/27	0.340	0.852	1.218	1.446	1.826
평균	0.325	0.895	1.207	1.494	1.897

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 포트 얼갈이배추 재배기간 동안 관개용수를 2회 샘플링하여 pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온, 그리고 음이온 등 18항목에 대하여 분석하였다. 작물 재배에 사용된 관개용수의 수질분석 결과 pH는 모든 처리구에서 평균 8.4~8.9 수준으로 비슷하게 나타났다.

1차 생육기간의 수질 분석 결과를 살펴보면, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 2.21~2.81 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P 또한 모든 처리구에서 검출되지 않았다. 치환성 양이

은 Na^+ 는 CB-TR#01에서 8.18 mg/L로 나타났으며 다른 처리구는 CB-TR#02 106.1 mg/L, CB-TR#03 148.28 mg/L, CB-TR#04 198.71 mg/L, CB-TR#05 256.12 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 CB-TR#01에서 0.26, CB-TR#02 (4.18), CB-TR#03 (4.62), CB-TR#04 (6.04), 그리고 CB-TR#05에서 7.75로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

2차 생육기간에는 수확 후 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 2.15~2.48 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P는 모든 처리구에서 검출되지 않았다. 치환성 양이온 Na^+ 는 CB-TR#01에서 8.16 mg/L로 나타났으며 염도수준이 높아질수록 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 음이온 Cl^- 의 경우, CB-TR#01에서 17.1 mg/L로 나타났으며 염도수준이 높아질수록 Na^+ 와 비슷하게 값이 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 CB-TR#01에서 0.25, CB-TR#02 (3.22), CB-TR#03 (5.14), CB-TR#04 (5.80), 그리고 CB-TR#05에서 8.19로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

표 3.71 포트 열갈이배추 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	EC	SAR
CB-TR#01	15/07/01	8.6	8.1	0.6	0.8	2.81	ND	2	ND	15.9	10.9	2.51	90.89	ND	28.65	5.68	8.18	2.25	0.22	0.258
CB-TR#02	15/07/01	8.3	8.6	0.7	0.8	2.21	ND	5	ND	171.4	10.9	2	40.87	ND	15.17	5.59	106.1	2.39	0.67	4.182
CB-TR#03	15/07/01	8.9	8.2	1	1.2	2.72	ND	5	ND	237.2	10.8	2.42	81.13	ND	29.35	5.81	148.28	2.43	0.93	4.624
CB-TR#04	15/07/01	8.5	8.6	0.9	1.2	2.8	ND	6	ND	309	11	2.49	83.57	ND	31.37	5.81	198.71	2.54	1.18	6.042
CB-TR#05	15/07/01	8.8	8.4	0.5	0.6	2.65	ND	6	ND	411	10.7	2.51	93.94	ND	31.73	5.83	256.12	1.9	1.47	7.750

표 3.72 포트 열갈이배추 관개용수 수질 모니터링 결과 (2차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	EC	SAR
CB-TR#01	15/10/12	8.4	8.5	0.5	0.5	2.23	ND	ND	ND	17.1	9.8	1.9	112.85	ND	32.95	5.57	8.16	1.76	0.25	0.245
CB-TR#02	15/10/12	8.6	8.1	0.3	0.5	2.18	ND	ND	ND	155.9	9.8	1.8	91.5	ND	31.94	5.33	105.65	2.17	0.71	3.221
CB-TR#03	15/10/12	8.4	8	0.5	0.5	2.48	ND	3	ND	243	9.8	2	119.56	ND	31.97	5.3	168.5	2.35	0.99	5.138
CB-TR#04	15/10/12	8.7	8.5	0.7	0.6	2.15	ND	ND	ND	319.1	9.8	1.8	85.4	ND	33.48	5.6	194.74	2.55	1.22	5.797
CB-TR#05	15/10/12	8.5	8.1	0.5	0.7	2.36	ND	ND	ND	387.8	9.7	1.9	106.75	ND	30.94	5.08	264.08	2.5	1.56	8.194

(3) 작물생육

열갈이배추의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 5개 처리구 및 3반복구에 대하여 매주 엽수, 엽장, 엽폭에 대해 생육모니터링을 실시하였다. 또한 수확 전 처리구별 생육 평균치가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0 (SPSS, Inc., 2012)를 사용하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 터키 검증(Tukey's HSD)을 사용하였다.

먼저 1차 열갈이배추의 작물생육 결과, 열갈이배추의 작물생육 결과, 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장, 그리고 엽폭의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 수확 후 처리구별 평균 엽수의 경우 CB-TR#04 (26.3 ea)이 가장 많았으며, 다음으로 CB-TR#03 (26.0 ea), CB-TR#02 (25.0 ea), CB-TR#05 (24.7 ea), CB-TR#01 (23.3 ea) 순으로 나타났으며, 처리구간 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다 ($P < 0.05$). 엽장의 경우에도 처리구간 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, CB-TR#03에서 가장 높게 나타났고, CB-TR#1 (25.9 cm)에서 가장 낮게 나타났다. 엽폭의 경우에는 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p > 0.05$).

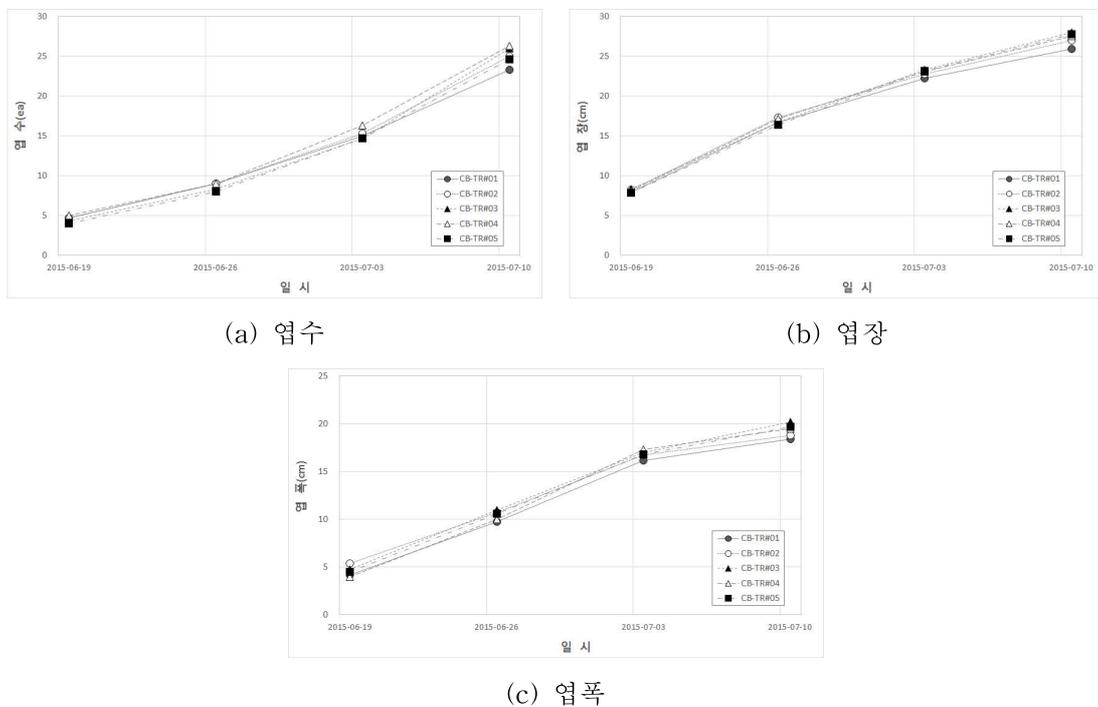


그림 3.38 열갈이배추 처리구별 생육변화 (1차)

표 3.73 열갈이배추 처리구별 생육변화 (1차)

일시	CB-TR#01			CB-TR#02			CB-TR#03		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)
15/06/19	4.7	7.9	4.2	4.7	8.2	5.4	4.3	8.3	4.7
15/06/26	9.0	16.7	9.8	9.0	17.3	10.7	8.3	16.7	11.0
15/07/03	15.0	22.2	16.1	15.3	22.8	16.7	14.7	23.3	17.0
15/07/10	23.3	25.9	18.4	25.0	27.0	18.8	26.0	28.0	20.2
일시	CB-TR#04			CB-TR#05					
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)			
15/06/19	5.0	8.1	4.0	4.0	7.8	4.5	-		
15/06/26	9.0	17.1	10.0	8.0	16.4	10.6			
15/07/03	16.3	23.1	17.3	14.7	23.2	16.8			
15/07/10	26.3	27.5	19.5	24.7	27.8	19.7			

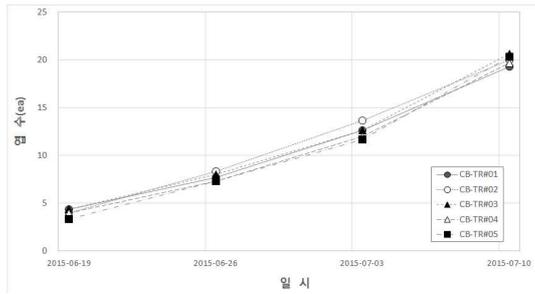
표 3.74 열갈이배추 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
CB-TR#01	23.3±0.6a	25.9±0.8a	18.4±0.6a
CB-TR#02	25.0±1.0ab	27.0±0.0ab	18.8±1.5a
CB-TR#03	26.0±1.0b	28.0±0.9b	20.2±1.6a
CB-TR#04	26.3±0.6b	27.5±0.9ab	19.5±0.8a
CB-TR#05	24.7±1.2ab	27.8±0.3b	19.7±0.3a
F-value	5.292	4.535	1.314
p	0.015	0.024	0.330

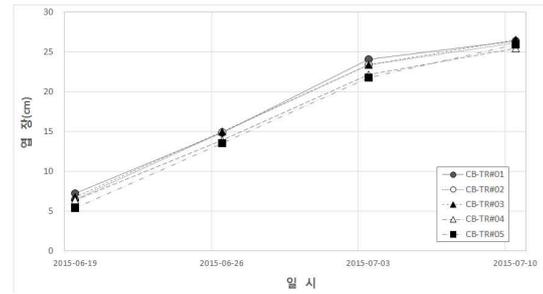
*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

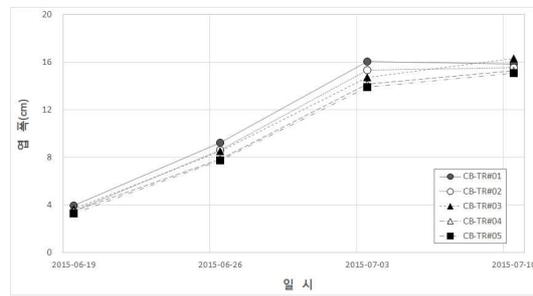
2차 얼갈이배추 생육결과, 1차 생육결과와 마찬가지로 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장, 그리고 엽폭의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수, 엽장, 엽폭 모두 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).



(a) 엽수



(b) 엽장



(c) 엽폭

그림 3.39 얼갈이배추 처리구별 생육변화 (2차)

표 3.75 열갈이배추 처리구별 생육변화 (2차)

일시	CB-TR#01			CB-TR#02			CB-TR#03		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)
15/08/07	4.3	7.3	4.0	4.0	6.5	3.5	4.3	6.8	3.6
15/08/14	7.7	14.8	9.2	8.3	15.0	8.6	8.0	15.0	8.5
15/08/21	12.7	24.1	16.1	13.7	23.4	15.4	12.7	23.4	14.7
15/08/28	19.3	26.4	15.9	20.0	26.2	15.5	20.7	26.6	16.3
일시	CB-TR#04			CB-TR#05			-		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)			
15/08/07	4.0	6.4	3.5	3.3	5.4	3.3			
15/08/14	7.3	13.9	7.8	7.3	13.5	7.7			
15/08/21	12.0	22.2	14.2	11.7	21.8	13.9			
15/08/28	19.7	25.5	15.3	20.3	25.9	15.1			

표 3.76 열갈이배추 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
CB-TR#01	19.3±2.5	26.4±0.8	15.9±0.8
CB-TR#02	20.0±0.0	26.2±1.1	15.5±0.1
CB-TR#03	20.7±1.2	26.6±2.2	16.3±1.8
CB-TR#04	19.7±1.5	25.5±0.9	15.3±0.8
CB-TR#05	20.3±1.2	25.9±0.7	15.1±0.2
F-value	0.368	0.342	0.764
p	0.826	0.844	0.572

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(4) 생체중량

얼갈이배추의 생체중량은 1차 7월 10일, 2차 8월 28일에 처리구별 3반복구의 작물을 수확하여 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다.

1차 전체 생체중량 분석 결과 CB-TR#01 (189.3 g)과 CB-TR#05 (168.3 g)에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), 나머지 3개의 처리구 사이에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 뿌리를 제외한 상부 생체중량은 CB-TR#04 (178.7g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으며, CB-TR#05 (163.7 g) 와 유의한 차이가 있는 것으로 나타났 다 ($p < 0.05$).

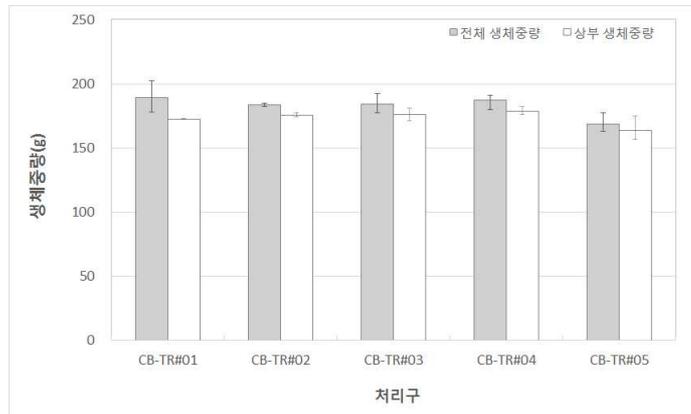


그림 3.40 얼갈이배추 처리구별 생체중량 (1차)

표 3.77 얼갈이배추 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
CB-TR#01	189.3±12.1b	172.3±0.6ab
CB-TR#02	183.7±1.5ab	175.3±1.5ab
CB-TR#03	184.0±7.5ab	176.0±5.0ab
CB-TR#04	187.0±6.1ab	178.7±3.1b
CB-TR#05	168.3±7.6a	163.7±9.9a
F-value	3.402	3.738
p	0.053	0.041

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

2차 전체 생체중량 분석 결과 CB-TR#01 (102.0 g)에서 가장 높게 나타났으며 CB-TR#04, CB-TR#04와 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다 (P<0.05). 뿌리를 제외한 상부 생체중량 또한 CB-TR#01 (96.7 g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으며, CB-TR#04, CB-TR#05와 유의한 차이가 나타났다(P<0.05).

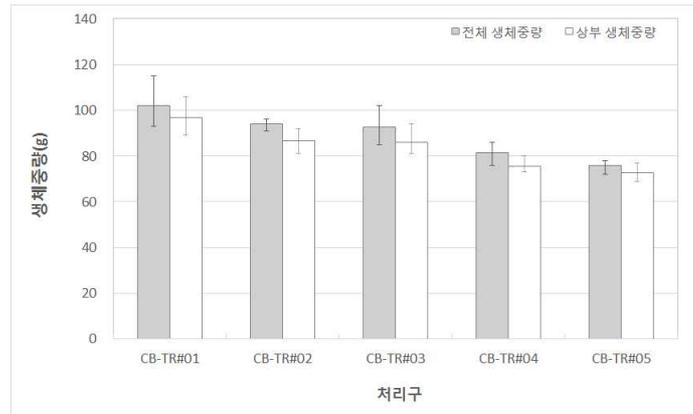


그림 3.41 열갈이배추 처리구별 생체중량 (2차)

표 3.78 열갈이배추 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
CB-TR#01	102.0±11.5b	96.7±8.6b
CB-TR#02	94.0±2.6ab	86.7±5.5ab
CB-TR#03	92.7±8.6ab	86.0±7.0ab
CB-TR#04	81.3±5.0a	75.7±3.8a
CB-TR#05	76.0±3.5a	72.7±4.0a
F-value	6.482	7.494
p	0.008	0.005

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺에 대해 수확한 열갈이배추 개체를 대상으로 분석하였다. 생체중량과 동일하게 수확하여 조사하였으며 처리구별 3반복구에 대하여 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다.

1차 처리구별 식물체 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.05), CB-TR#01 (10279.0 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 CB-TR#05에서 19241.0 mg/kg으로 분석되었다. 2차 처리구별 식물체 성분 Na⁺분석 결과 CB-TR#01 (9867.6 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 CB-TR#05에서 16392.3 mg/kg으로 분석되었으며 유의한 차이가 나타났다.

표 3.79 열갈이배추 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	CB-TR#01	CB-TR#02	CB-TR#03	CB-TR#04	CB-TR#05
15/07/10	10279.0 ±1095.1a	14444.7 ±1815.2b	15511.3 ±893.6b	14921.0 ±829.5b	19241.0 ±1324.8c
F-value	19.767				
p	0.000				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

표 3.80 열갈이배추 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	CB-TR#01	CB-TR#02	CB-TR#03	CB-TR#04	CB-TR#05
15/08/28	9867.6 ±774.9a*	11558.6 ±1932.7ab**	12901.9 ±1956.9ab	13529.1 ±850.7ab	16392.3 ±3227.2b
F-value	4.580				
p	0.023				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(6) 토양환경 조사 분석

포트 열갈이배추의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 최종 2차 열갈이배추 수확 후 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다. 먼저, 2차재에 걸친 열갈이배추 수확 후 각 처리구별 토양의 화학적 성분을 분석하였다. pH의 경우 모든 처리구에서 6.0 수준으로 비슷하게 나타났으며, EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 값이 높게 나타났고 CB-TR#05 (18.69 dS/m) 에서 가장 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 CB-TR#01 (907.44 mg/kg)에 비해 CB-TR#05 (3782.4 mg/kg)가 4.2배 가량 높았으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

표 3.81 열갈이배추 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과

구분	CB-TR#01	CB-TR#02	CB-TR#03	CB-TR#04	CB-TR#05
pH	6.1	6.2	6	5.9	6
CEC(cmol/kg)	74.08	76.04	75.85	73.69	67.25
T-N(%)	0.612	0.606	0.629	0.437	0.46
T-P(mg/kg)	880	708.9	788.55	839.3	722.5
P ₂ O ₅ (mg/kg)	339.47	213.15	251.06	217.68	165.9
Ca ²⁺ (mg/kg)	6681.51	6521.01	5851.71	5004.6	5077.89
Mg ²⁺ (mg/kg)	6681.51	1589.76	1385.25	1184.49	1149.63
Na ⁺ (mg/kg)	907.44	2136.27	3012.78	3116.13	3782.4
K ⁺ (mg/kg)	2031.9	1604.37	2446.56	1784.73	1780.29
유기물 함량(%)	66.43	60.35	67.94	61.56	60.55
EC(dS/m)	6.2	9.33	15.69	16.83	18.69
SAR	1.818	4.348	6.500	7.270	8.814

바. 20일무

(1) 관개량

20일무 (*Raphanus sativus* L.) 작물재배는 약 4주 동안 5개의 처리구 3반복으로 2차에 걸쳐 이루어졌다. 재배기간 동안 필요시마다 관개하였으며 1차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 13회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 3.4 L로 측정되었다. 2차 재배기간 동안에는 처리구별 관개용수 공급 횟수 총 10회, 처리구당 총 관개용수 공급량이 2.3 L로 측정되었다. 관개용수의 공급은 다음 표에 나타난 바와 같이 이루어졌다.

표 3.82 20일무 생육실험 관개량 (1차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/06/05	10:00	0.5	15/06/17	10:00	0.3
15/06/06	10:00	0.2	15/06/22	10:00	0.3
15/06/08	10:00	0.2	15/06/28	10:00	0.2
15/06/9	10:00	0.2	15/07/02	10:00	0.2
15/06/11	10:00	0.2	15/07/05	09:00	0.3
15/06/13	10:00	0.2	15/07/09	10:00	0.3
15/06/15	10:00	0.3			
총계			3.4		

표 3.83 20일무 생육실험 관개량 (2차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/07/24	10:00	0.3	15/08/08	10:00	0.2
15/07/28	10:00	0.2	15/08/11	10:00	0.2
15/07/31	10:00	0.2	15/08/13	10:00	0.2
15/08/03	10:00	0.2	15/08/15	10:00	0.2
15/08/06	10:00	0.3	15/08/24	10:00	0.3
총계			2.3		

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

20일무 생육기간동안 처리구별로 염도의 지표인 EC를 매주 측정하였으며 측정결과는 다음과 같다. 1차 및 2차 전체 생육기간동안 R-TR#01의 염도수준은 평균 0.3 dS/m로 나타났으며, 처리구는 임계수준 전후로 각각 0.6 dS/m (R-TR#02), 0.8 dS/m (R-TR#03), 1.0 dS/m (R-TR#04), 그리고 1.3dS/m (R-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 유지시켜 주었다.

표 3.84 20일무 관개용수 염도 모니터링 (1차)

일자	EC _w				
	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04	R-TR#05
15/06/04	0.253	0.606	0.805	1	1.28
15/06/11	0.273	0.624	0.817	1.027	1.317
15/06/18	0.314	0.608	0.802	1.013	1.299
15/06/25	0.312	0.602	0.798	1.016	1.306
15/07/02	0.33	0.604	0.776	0.995	1.295
15/07/09	0.322	0.605	0.803	0.998	1.303
평균	0.301	0.608	0.8	1.008	1.3

표 3.85 20일무 관개용수 염도 모니터링 (2차)

일자	EC _w				
	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04	R-TR#05
15/07/24	0.322	0.605	0.803	0.998	1.303
15/07/30	0.321	0.603	0.823	0.998	1.308
15/08/06	0.319	0.599	0.797	1.007	1.300
15/08/13	0.307	0.605	0.809	1.020	1.312
15/08/20	0.313	0.621	0.798	1.032	1.304
15/08/27	0.309	0.570	0.748	0.970	1.215
평균	0.315	0.601	0.796	1.004	1.290

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 포트 20일무 재배기간 동안 관개용수를 2회 샘플링하여 pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온, 그리고 음이온 등 17항목에 대하여 분석하였다. 작물 재배에 사용된 관개용수의 수질분석 결과 pH는 모든 처리구에서 평균 8.3~8.8 수준으로 나타났다.

1차 생육기간의 경우를 살펴보면 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 2.8~2.9 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P는 검출되지 않았다. 치환성 양이온 Na^+ 는 R-TR#01에서 8.27 mg/L로 나타났으며 다른 처리구는 평균 R-TR#02 53.32 mg/L, R-TR#03 83.39 mg/L, R-TR#04 117.19 mg/L, R-TR#05 160.92 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 R-TR#01에서 0.25, R-TR#02 (1.61), R-TR#03 (2.53), R-TR#04 (3.55), 그리고 R-TR#05에서 4.85로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

2차 생육기간에는 수확 후 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 1.1~2.2 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P는 모든 처리구에서 검출되지 않았다. 치환성 양이온 Na^+ 는 R-TR#01에서 8.46 mg/L로 나타났으며 R-TR#02 55.97 mg/L, R-TR#03 86.27 mg/L, R-TR#04 122.54 mg/L, R-TR#05 174.72 mg/L로 염도수준이 높아질수록 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 음이온 Cl^- 의 경우, R-TR#01에서 16.9 mg/L로 나타났으며 염도수준이 높아질수록 Na^+ 와 비슷하게 값이 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 R-TR#01에서 0.25, R-TR#02 (1.70), R-TR#03 (2.56), R-TR#04 (3.88), 그리고 R-TR#05에서 6.01로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

표 3.86 20일무 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	EC	SAR
		mg/L																	dS/m	
R-TR#01	15/07/01	8.8	8.6	0.6	0.6	2.88	ND	3	ND	16	10.8	2.61	93.33	ND	30.87	5.70	8.27	1.85	0.24	0.254
R-TR#02	15/07/01	8.6	8.6	0.6	0.7	2.83	ND	3	ND	85.2	10.8	2.56	98.21	ND	31.82	5.85	53.32	1.87	0.48	1.611
R-TR#03	15/07/01	8.8	8.5	0.5	0.6	2.79	ND	3	ND	133.4	10.8	2.57	100.04	ND	31.66	5.84	83.39	1.87	0.63	2.525
R-TR#04	15/07/01	8.3	8.2	0.7	0.8	2.90	ND	ND	ND	188.1	10.8	2.65	97.60	ND	31.72	5.81	117.19	2.38	0.80	3.548
R-TR#05	15/07/01	8.5	8.5	0.8	1.0	2.93	ND	4	ND	257.3	10.8	2.63	98.21	ND	31.99	5.85	160.92	1.90	1.02	4.852

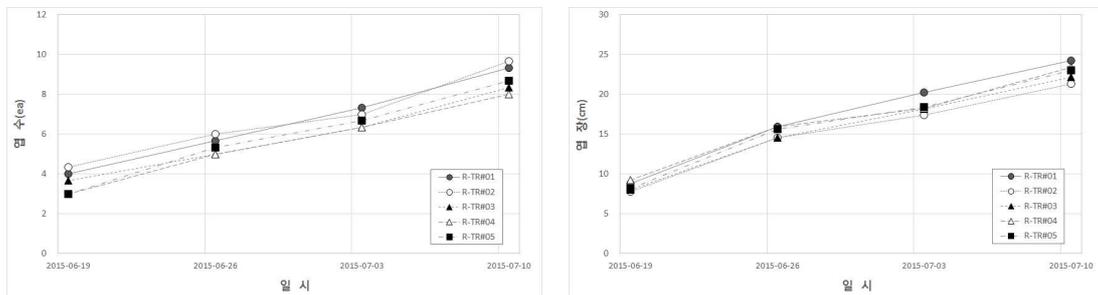
표 3.87 20일무 관개용수 수질 모니터링 결과 (2차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	EC	SAR
		mg/L																	dS/m	
R-TR#01	15/10/12	8.5	7.8	0.6	0.7	2.19	ND	5	ND	16.9	9.8	1.8	103.70	ND	34.18	5.77	8.46	1.85	0.27	0.249
R-TR#02	15/10/12	8.7	8.2	0.3	0.5	2.03	ND	1	ND	86.1	9.8	1.6	101.26	ND	31.88	5.48	55.97	2.06	0.48	1.702
R-TR#03	15/10/12	8.5	7.9	0.3	0.5	2.16	ND	ND	ND	131.4	9.8	1.8	109.80	ND	33.68	5.65	86.27	2.20	0.64	2.560
R-TR#04	15/10/12	8.8	8.1	0.3	0.6	1.66	ND	1	ND	182.0	9.8	1.4	79.30	ND	29.18	5.25	122.54	2.20	0.78	3.876
R-TR#05	15/10/12	8.5	8.1	0.5	0.6	1.11	ND	ND	ND	250.7	9.9	0.8	75.64	ND	23.43	5.23	174.72	2.27	0.98	6.005

(3) 작물생육

20일무의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 5개 처리구 및 3반복구에 대하여 매주 엽수, 엽장에 대해 생육 모니터링을 2차 재배기간에 걸쳐 실시하였다. 또한 수확 전 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0 (SPSS, Inc., 2012)를 사용하여 분산분석 (ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 터키 검증(Tukey's HSD)을 사용하였다.

먼저 1차 20일무의 작물생육 결과, 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수의 경우 8.0 ea ~ 9.7 ea로 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 엽장의 경우 R-TR#01 (24.3 cm)에서 가장 높게 나타났으나 다른 처리구들 또한 비슷한 수준으로 나타났으며 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).



(a) 엽수

(b) 엽장

그림 3.42 20일무 처리구별 생육변화 (1차)

표 3.88 20일무 처리구별 생육변화 (1차)

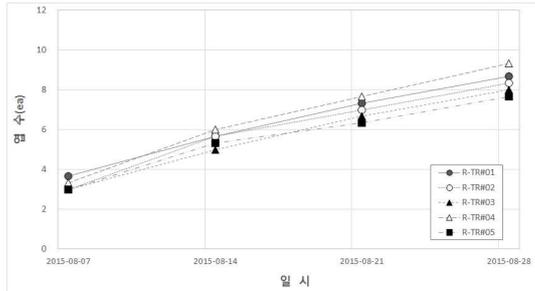
일시	R-TR#01		R-TR#02		R-TR#03		R-TR#04		R-TR#05	
	엽수 (ea)	엽장 (cm)								
15/06/19	4.00	8.80	4.33	7.80	3.67	8.00	3.00	9.23	3.00	8.17
15/06/26	5.67	15.97	6.00	14.57	5.00	14.53	5.00	15.93	5.33	15.63
15/07/03	7.33	20.27	7.00	17.40	6.33	18.13	6.33	18.27	6.67	18.37
15/07/10	9.33	24.27	9.67	21.30	8.33	22.13	8.00	23.40	8.67	23.00

표 3.89 20일무 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

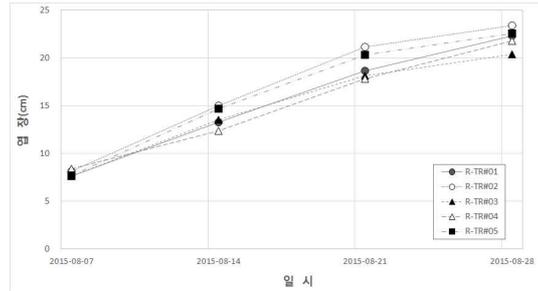
처리구	엽수(ea)	엽장(cm)
R-TR#01	9.3±2.1a	24.3±1.9a
R-TR#02	9.7±2.1a	21.3±1.1a
R-TR#03	8.3±1.2a	22.1±1.9a
R-TR#04	8.0±1.0a	23.4±1.5a
R-TR#05	8.7±0.6a	23.0±0.8a
F-value	0.632	1.780
p	0.651	0.209

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level
 **Mean±deviation(n=3)

2차 20일무 생육결과, 1차 생육결과와 마찬가지로 시기별 처리구에 따른 엽수, 엽장의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 엽수 및 엽장은 모두 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).



(a) 엽수



(b) 엽장

그림 3.43 20일무 처리구별 생육변화 (2차)

표 3.90 20일무 처리구별 생육변화 (2차)

일시	R-TR#01		R-TR#02		R-TR#03		R-TR#04		R-TR#05	
	엽수 (ea)	엽장 (cm)								
15/08/07	3.67	7.63	3.00	8.13	3.00	7.63	3.33	8.40	3.00	7.67
15/08/14	5.67	13.30	5.67	15.03	5.00	13.53	6.00	12.37	5.33	14.67
15/08/21	7.33	18.67	7.00	21.17	6.67	18.13	7.67	17.83	6.33	20.33
15/08/28	8.67	22.33	8.33	23.43	8.00	20.37	9.33	21.83	7.67	22.57

표 3.91 20일무 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)
R-TR#01	8.7±0.6a	22.3±2.3a
R-TR#02	8.3±0.6a	23.4±1.5a
R-TR#03	8.0±1.7a	20.4±3.4a
R-TR#04	9.3±1.5a	21.8±4.5a
R-TR#05	7.7±1.2a	22.6±4.4a
F-value	0.841	0.327
p	0.530	0.854

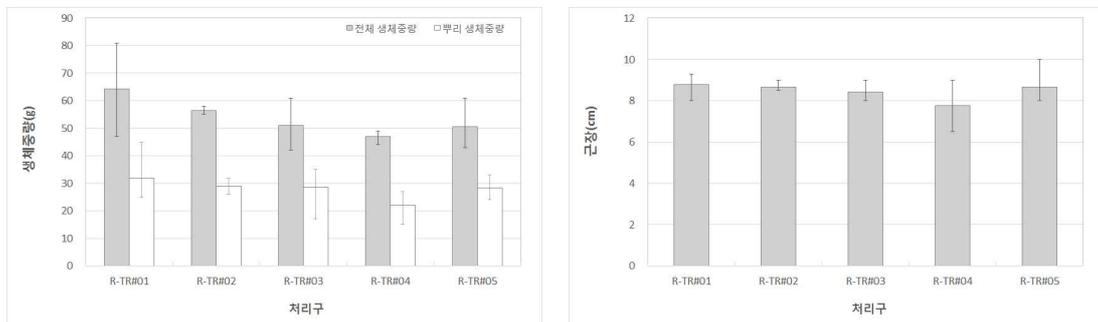
*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(4) 생체중량

20일무의 생체중량은 1차 5월 8일, 2차 8월 4일, 3차 9월 24일에 처리구별 3반복구의 작물을 수확하여 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다.

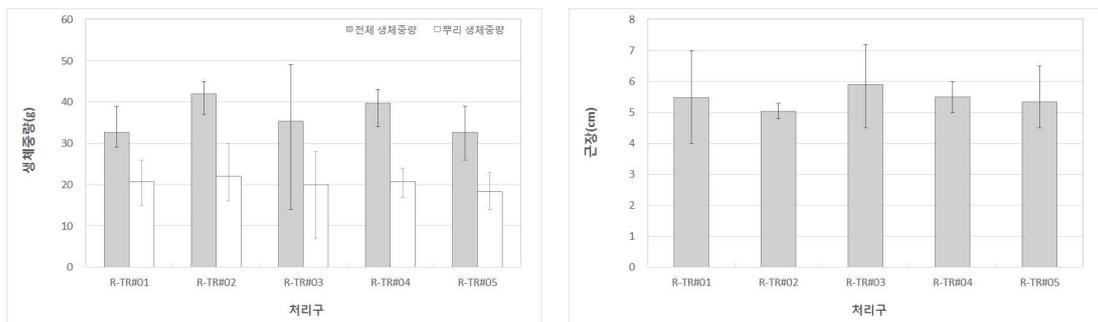
1차 전체 생체중량 분석 결과 R-TR#01 (64.3 g)과 R-TR#02 (56.3 g)으로 다른 처리구에 비해 높게 나타났으나 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 분석되었다 ($p>0.05$). 뿌리 생체중량은 R-TR#01 (32.0g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으나 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$). 근장의 경우에도 처리구간 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 2차 전체 생체중량 분석 결과도 1차와 마찬가지로 생체중량 및 근장 모두 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P>0.05$). 분석결과, 20일무의 경우에는 염도수준에 따라 전반적으로 처리구간의 생육에서는 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다.



(a) 생체중량

(b) 근장

그림 3.44 20일무 처리구별 생체중량 (1차)



(a) 생체중량

(b) 근장

그림 3.45 20일무 처리구별 생체중량 (2차)

표 3.92 20일무 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	전체 생체중량(g)	뿌리 중량(g)	근장(cm)
R-TR#01	64.3±17.0a	32.0±11.3a	8.8±0.7a
R-TR#02	56.3±1.5a	29.0±3.0a	8.7±0.3a
R-TR#03	51.0±9.5a	28.7±10.1a	8.4±0.5a
R-TR#04	47.0±2.6a	22.0±6.2a	7.8±1.3a
R-TR#05	50.7±9.3a	28.3±4.5a	8.7±1.2a
F-value	1.428	0.675	0.669
p	0.294	0.625	0.628

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

표 3.93 20일무 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	전체 생체중량(g)	뿌리 중량(g)	근장(cm)
R-TR#01	32.7±5.5a	20.7±5.5a	5.5±1.5a
R-TR#02	42.0±4.4a	22.0±7.2a	5.0±0.3a
R-TR#03	35.3±18.7a	20.0±11.4a	5.9±1.4a
R-TR#04	39.7±4.9a	20.7±3.5a	5.5±0.5a
R-TR#05	32.7±6.5a	18.3±4.5a	5.3±1.0a
F-value	0.571	0.109	0.269
p	0.690	0.976	0.892

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺에 대해 수확한 20일무개체를 대상으로 분석하였다. 생체중량과 동일하게 수확하여 조사하였으며 처리구별 3반복구에 대하여 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다.

1차 처리구별 식물체 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.05), R-TR#01 (9337.0 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 R-TR#05에서 14153.3 mg/kg으로 분석되었다. 2차 처리구별 식물체 성분 Na⁺분석 결과 R-TR#01 (7809.1 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 R-TR#05에서 16828.1 mg/kg으로 분석되었다.

표 3.94 20일무 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04	R-TR#05
15/06/08	9337.0 ±1280.1a	12110.5 ±1139.8ab	13360.8 ±876.1bc	16742.5 ±1938.4c	14153.3 ±1509.0bc
F-value	11.387				
p	0.01				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

표 3.95 20일무 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04	R-TR#05
15/08/21	7809.1 ±3655.0a	10469.4 ±1239.5ab	11638.2 ±2701.2ab	17373.6 ±5211.3b	16828.1 ±3044.7ab
F-value	4.403				
p	0.026				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(6) 토양환경 조사 분석

20일무의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 2차 수확 후 각 처리구의 토양을 샘플링 하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다.

2차 20일무 수확 후 처리구별 토양의 화학적 성분 분석결과를 정리하여 나타내었다. pH의 경우 모든 처리구에서 5.7 수준으로 비슷하게 나타났다. EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 값이 높게 나타났으며 R-TR#05 (14.90 dS/m) 에서 가장 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 R-TR#05 (2213.76 mg/kg) 에서 R-TR#01 (996.18 mg/kg)에 비해 2배 가량 높은 값이 나타났으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

표 3.96 20일무 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과

구분	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04	R-TR#05
pH	5.8	5.6	5.6	5.6	5.7
CEC(cmol/kg)	74.28	56.74	58.46	57.57	65.97
T-N(%)	0.633	0.555	0.552	0.583	0.452
T-P(mg/kg)	826.15	798.2	969.6	864	945
P ₂ O ₅ (mg/kg)	390.88	380.73	428	407.68	345.28
Ca ²⁺ (mg/kg)	7146.66	5800.56	5555.7	6132.84	5655
Mg ²⁺ (mg/kg)	1876.35	1414.68	1354.62	1563.42	1343.64
Na ⁺ (mg/kg)	996.18	1259.4	1444.68	1917.63	2213.76
K ⁺ (mg/kg)	2895.51	2923.83	2635.05	2506.41	2518.83
유기물 함량(%)	56.35	60.38	67.81	67.47	69.18
EC(dS/m)	10.29	11.37	13.82	14.28	14.9
SAR	1.916	2.718	3.185	3.998	4.856

사. 시금치

(1) 관개량

시금치 (*Spinacia oleracea*) 작물재배는 약 7주 동안 5개의 처리구 3반복으로 이루어졌다. 재배기간 동안 필요시마다 관개하였으며 1차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 24회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 6.6 L로 측정되었다. 2차 재배기간 동안에는 처리구별 관개용수 공급 횟수 총 22회, 처리구당 총 관개용수 공급량이 6.2 L로 측정되었다. 관개용수의 공급은 다음 표에 나타낸 바와 같이 이루어졌으며, 생육말기에 관개용수의 공급이 많이 이루어진 것을 볼 수 있다.

표 3.97 시금치 생육실험 관개량 (1차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
16/03/24	10:00	0.5	16/04/22	09:00	0.2
16/03/26	10:00	0.2	16/04/24	09:00	0.3
16/03/28	09:00	0.2	16/04/26	09:00	0.3
16/03/30	09:00	0.2	16/04/29	09:00	0.3
16/04/01	09:00	0.2	16/05/01	09:00	0.3
16/04/03	09:00	0.2	16/05/03	09:00	0.3
16/04/05	09:00	0.2	16/05/05	09:00	0.5
16/04/08	09:00	0.2	16/05/07	09:00	0.3
16/04/10	09:00	0.2	16/05/08	09:00	0.3
16/04/13	09:00	0.2	16/05/10	09:00	0.3
16/04/16	09:00	0.2	16/05/11	09:00	0.3
16/04/19	09:00	0.2	16/05/12	09:00	0.5
총계	6.6				

표 3.98 시금치 생육실험 관개량 (2차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
16/05/13	11:00	0.3	16/06/08	09:00	0.3
16/05/15	09:00	0.3	16/06/10	09:00	0.3
16/05/17	09:00	0.3	16/06/13	09:00	0.2
16/05/19	09:00	0.2	16/06/15	09:00	0.2
16/05/21	09:00	0.2	16/06/18	09:00	0.3
16/50/23	09:00	0.2	16/06/20	09:00	0.3
16/05/25	09:00	0.2	16/06/22	09:00	0.4
16/05/28	09:00	0.3	16/06/24	09:00	0.3
16/05/31	09:00	0.2	16/06/26	09:00	0.3
16/06/02	09:00	0.3	16/06/28	09:00	0.4
16/06/05	09:00	0.3	16/06/30	09:00	0.4
총계	6.2				

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

시금치 생육기간동안 처리구별로 염도의 지표인 EC를 매주 측정하였으며 측정결과는 다음과 같다. 전체 생육기간동안 S-TR#01의 염도수준은 평균 0.3 dS/m로 나타났으며, 처리구는 각각 0.9 dS/m (S-TR#02), 1.3 dS/m (S-TR#03), 1.7 dS/m (S-TR#04), 그리고 2.2 dS/m (S-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 유지시켜주었다.

표 3.99 시금치 관개용수 염도 모니터링 (1차)

일자	EC _w				
	S-TR#01	S-TR#02	S-TR#03	S-TR#04	S-TR#05
16/03/24	0.322	0.860	1.285	1.667	2.121
16/03/31	0.324	0.854	1.264	1.660	2.101
16/04/07	0.320	0.852	1.256	1.655	2.100
16/04/14	0.315	0.852	1.271	1.658	2.105
16/04/21	0.290	0.882	1.275	1.672	2.192
16/04/28	0.291	0.880	1.275	1.671	2.190
16/05/04	0.290	0.876	1.272	1.667	2.186
16/05/10	0.245	0.918	1.317	1.731	2.210
평균	0.300	0.872	1.277	1.673	2.151

표 3.100 시금치 관개용수 염도 모니터링 (2차)

일자	EC _w				
	S-TR#01	S-TR#02	S-TR#03	S-TR#04	S-TR#05
16/05/13	0.246	0.920	1.315	1.733	2.208
16/05/16	0.244	0.922	1.311	1.729	2.212
16/05/23	0.242	0.915	1.320	1.735	2.215
16/05/30	0.266	0.931	1.330	1.726	2.241
16/06/06	0.266	0.934	1.332	1.730	2.244
16/06/13	0.264	0.930	1.329	1.721	2.238
16/06/20	0.262	0.936	1.342	1.730	2.236
16/06/27	0.265	0.932	1.338	1.730	2.230
평균	0.257	0.928	1.327	1.729	2.228

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 포트 시금치 재배기간 동안 관개용수를 4회 샘플링하여 pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온, 그리고 음이온 등 17항목에 대하여 분석하였다. 작물 재배에 사용된 관개용수의 수질분석 결과 pH는 모든 처리구에서 평균 7.5~8.1 수준으로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5~8.5를 만족하는 것으로 나타났다.

1차 생육기간에는 3회 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 3.5~4.6 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P 또한 모든 처리구에서 0.06 mg/L이하의 비슷한 수준으로 나타났다. 치환성 양이온 Na^+ 는 S-TR#01에서 8.49 mg/L로 나타났으며 다른 처리구는 평균 S-TR#02 98.34 mg/L, S-TR#03 171.20 mg/L, S-TR#04 220.35 mg/L, S-TR#05 304.28 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 S-TR#01에서 평균 0.27, S-TR#02 (3.11), S-TR#03 (5.37), S-TR#04 (6.98), 그리고 S-TR#05에서 9.74로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

2차 생육기간에는 수확 후 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 모든 처리구에서 1.81~1.92 mg/L 수준으로 나타났으며 T-P는 모든 처리구에서 0.012mg/L 이하로 나타났다. 치환성 양이온 Na^+ 는 S-TR#01에서 5.50 mg/L로 나타났으며 S-TR#02 140.29 mg/L, S-TR#03 209.21 mg/L, S-TR#04 291.02 mg/L, S-TR#05 402.67 mg/L로 염도수준이 높아질수록 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 음이온 Cl^- 의 경우, S-TR#01에서 15.0 mg/L로 나타났으며 염도수준이 높아질수록 Na^+ 와 비슷하게 값이 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 S-TR#01에서 0.17, S-TR#02 (4.32), S-TR#03 (6.48), S-TR#04 (8.82), 그리고 S-TR#05에서 12.71로 염도수준에 따라 값이 높게 나타났다.

표 3.101 시금치 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	mg/L								EC	SAR
											SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
S-TR#01	16/03/24	8.1	11.4	1.2	0.8	4.53	0.044	ND	-	23.1	9.5	4.3	103.70	ND	30.40	5.41	9.67	1.77	0.32	0.300
	16/04/21	7.5	9.3	0.6	0.8	3.91	0.017	ND	-	20.8	10.2	3.6	97.60	0.014	29.65	5.18	7.73	1.64	0.29	0.243
	16/05/10	7.9	10.9	1.1	0.8	3.42	0.009	ND	-	16.0	9.3	3.3	104.92	0.010	30.36	5.17	8.07	1.81	0.25	0.252
S-TR#02	16/03/24	8.0	11.8	2.0	0.9	4.57	0.062	ND	-	138.7	9.5	4.3	104.92	ND	29.38	5.68	84.40	2.38	0.66	2.638
	16/04/21	7.7	10.0	0.9	0.6	3.95	0.024	ND	-	142.8	10.1	3.6	97.60	0.023	28.97	4.91	98.19	2.13	0.80	3.138
	16/05/10	7.5	9.5	0.1	0.6	3.49	ND	1	-	215.3	9.2	3.3	103.70	0.007	29.43	5.04	112.42	2.43	0.92	3.560
S-TR#03	16/03/24	8.0	10.7	0.9	0.7	4.60	0.063	3	-	218.6	9.5	4.3	106.75	ND	31.81	5.90	148.54	2.71	1.03	4.484
	16/04/21	7.7	10.1	0.7	0.6	4.27	0.006	1	-	230.7	10.2	3.6	97.60	0.008	28.30	4.77	171.82	2.27	1.17	5.559
	16/05/10	7.6	10.7	2.3	0.6	3.53	0.005	ND	-	347.4	9.3	3.3	106.75	0.053	30.45	4.78	193.24	2.62	1.32	6.072
S-TR#04	16/03/24	8.0	11.0	0.9	1.0	4.69	0.011	1	-	300.6	9.5	4.2	103.70	0.017	29.97	5.56	186.38	2.74	1.29	5.797
	16/04/21	7.7	9.9	0.8	0.6	4.39	0.008	1	-	339.0	10.1	3.6	103.70	ND	28.16	4.72	195.55	2.45	1.47	6.346
	16/05/10	7.7	10.6	1.6	0.7	3.51	0.059	ND	-	462.4	9.2	3.3	98.82	ND	30.55	4.65	279.12	2.80	1.73	8.784
S-TR#05	16/03/24	8.0	10.8	0.6	0.7	4.78	0.021	ND	-	428.7	9.6	4.3	98.21	ND	28.25	5.79	278.29	3.02	1.69	8.808
	16/04/21	7.8	9.9	0.5	0.8	4.49	0.011	ND	-	444.3	10.1	3.6	103.70	0.009	28.10	4.63	252.84	2.54	1.87	8.229
	16/05/10	7.8	10.6	1.1	1.0	3.63	0.012	ND	-	621.0	9.3	3.3	103.70	0.028	29.45	4.63	381.72	2.93	2.21	12.195

표 3.102 시금치 관개용수 수질 모니터링 결과 (2차)

처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	mg/L								EC	SAR
											SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
S-TR#01	16/05/30	7.6	8.3	0.5	0.6	1.81	0.012	ND	-	15.0	9.4	3.3	109.80	ND	28.18	6.29	5.50	1.97	0.27	0.172
S-TR#02	16/05/30	7.6	8.1	0.4	0.5	1.85	0.010	ND	-	210.4	9.4	3.5	109.80	0.648	30.31	5.85	140.29	2.85	0.93	4.318
S-TR#03	16/05/30	7.8	8.1	0.4	0.8	1.88	0.011	ND	-	345.0	9.4	3.4	111.02	ND	29.25	6.21	209.21	3.36	1.33	6.478
S-TR#04	16/05/30	7.7	7.8	0.2	1.1	1.92	0.009	ND	-	470.9	9.4	3.4	109.80	ND	31.53	5.87	291.02	3.45	1.73	8.821
S-TR#05	16/05/30	7.7	8.2	0.2	1.3	1.91	0.01	ND	-	647.3	9.4	3.4	114.68	0.016	28.24	5.93	402.67	3.57	2.24	12.708

(3) 작물생육

시금치의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 5개 처리구 및 3반복구에 대하여 매주 초장, 엽수, 엽장, 엽폭에 대해 생육모니터링을 2차에 걸쳐 실시하였다. 또한 수확 전 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0 (SPSS, Inc., 2012)를 사용하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 터키 검증(Tukey's HSD)을 사용하였다.

먼저 1차 시금치의 작물생육 결과, 시기별 처리구에 따른 초장, 엽수, 엽장, 그리고 엽폭의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 초장의 경우 S-TR#04 (12.5 cm)로 가장 길었고, 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 엽수, 엽장, 엽폭의 경우 모두 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).

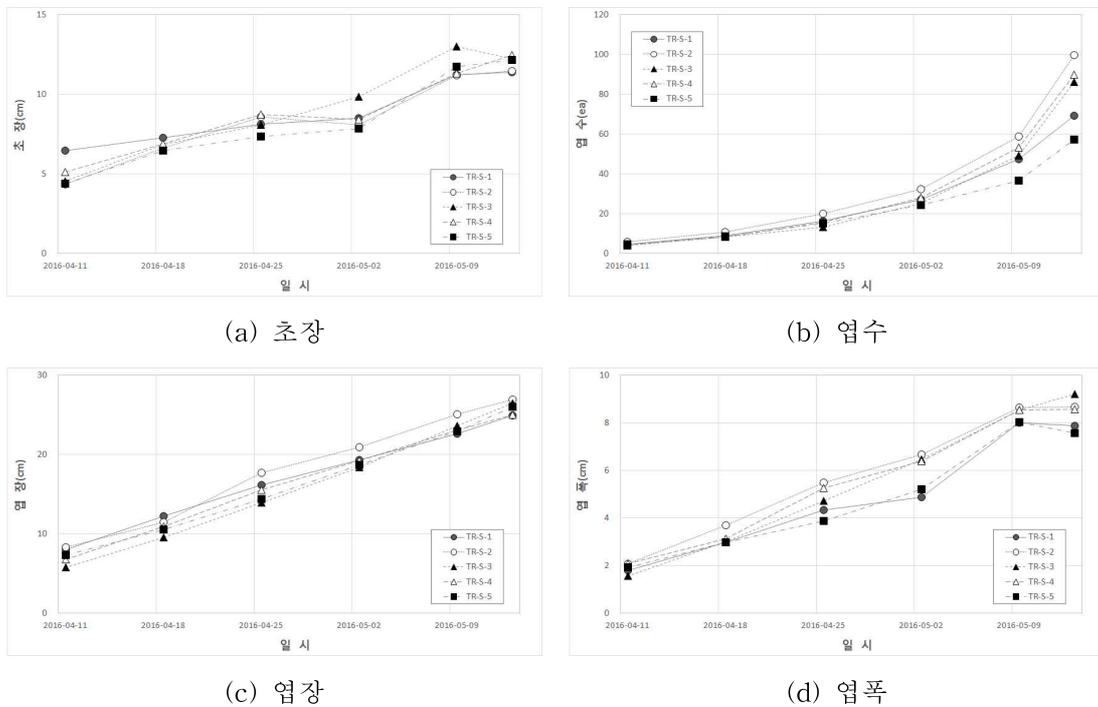


그림 3.46 시금치 처리구별 생육변화 (1차)

표 3.103 시금치 처리구별 생육변화 (1차)

일시	S-TR#01				S-TR#02				S-TR#03			
	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)
16/04/11	6.5	4.7	8.0	1.8	4.4	6.0	8.3	2.1	4.5	4.0	5.8	1.6
16/04/18	7.3	9.0	12.3	3.0	6.6	10.7	11.4	3.7	6.9	8.3	9.5	3.0
16/04/25	8.1	16.3	16.1	4.3	8.6	20.0	17.7	5.5	8.1	13.3	14.0	4.7
16/05/02	8.5	27.0	19.3	4.9	8.1	32.3	20.9	6.7	9.9	25.3	18.4	6.5
16/05/09	11.2	47.3	22.6	8.0	11.2	58.7	25.1	8.6	13.0	49.3	23.6	8.5
16/05/13	11.4	69.3	24.9	7.9	11.5	99.7	26.9	8.7	12.2	86.3	26.5	9.2
일시	S-TR#04				S-TR#05							
	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)				
16/04/11	5.1	4.3	6.8	2.1	4.4	4.7	7.3	1.9				
16/04/18	6.9	8.3	10.9	3.1	6.5	8.7	10.5	3.0				
16/04/25	8.7	15.7	15.6	5.3	7.3	15.0	14.4	3.9				
16/05/02	8.4	28.0	19.3	6.4	7.9	24.3	18.7	5.2				
16/05/09	11.3	53.3	23.1	8.5	11.7	36.7	22.9	8.0				
16/05/13	12.5	90.0	25.0	8.6	12.2	57.3	26.0	7.6				

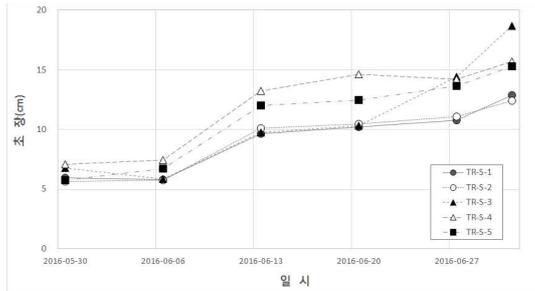
표 3.104 시금치 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	초장(cm)	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
S-TR#01	11.4±2.1a	69.3±33.2a	24.9±3.9a	7.9±0.2a
S-TR#02	11.5±1.2a	99.7±29.4a	26.9±1.6a	8.7±2.4a
S-TR#03	12.2±2.4a	86.3±25.4a	26.5±0.6a	9.2±1.6a
S-TR#04	12.5±1.7a	90.0±35.9a	25.0±2.4a	8.6±0.7a
S-TR#05	12.2±4.9a	57.3±23.2a	26.0±3.0a	7.6±0.5a
F-value	0.091	0.974	0.362	0.681
p	0.983	0.464	0.830	0.621

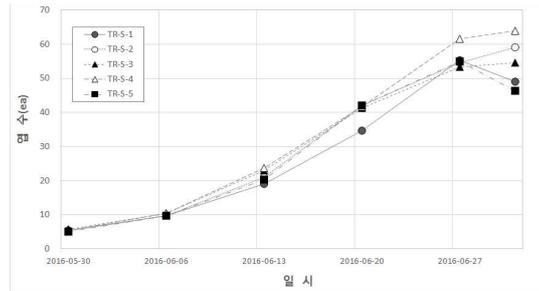
*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

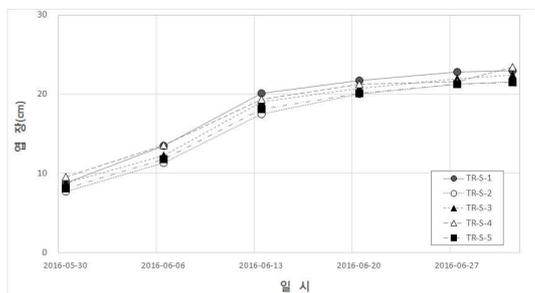
2차 시금치 작물생육 결과, 1차 시금치의 작물생육 결과와 유사한 결과를 보였다. 시기별 처리구에 따른 초장, 엽수, 엽장, 그리고 엽폭의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 평균 초장의 경우 S-TR#03 (18.7 cm)로 가장 길었고, 처리구간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ($P>0.05$). 엽수, 엽장, 엽폭의 경우 모두 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).



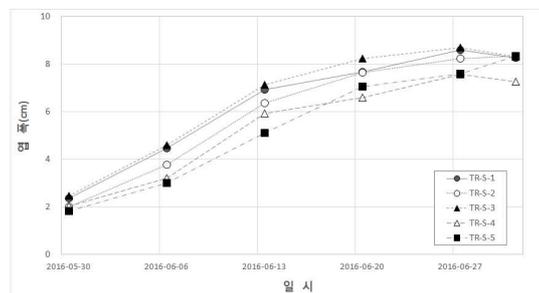
(a) 초장



(b) 엽수



(c) 엽장



(d) 엽폭

그림 3.47 시금치 처리구별 생육변화 (2차)

표 3.105 시금치 처리구별 생육변화 (2차)

일시	S-TR#01				S-TR#02				S-TR#03			
	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)
16/05/30	5.9	5.3	8.8	2.4	5.7	5.3	7.7	2.0	6.8	5.7	8.8	2.5
16/06/06	5.8	9.7	13.5	4.5	5.7	9.7	11.4	3.8	5.9	10.3	12.2	4.6
16/06/13	9.6	19.0	20.1	6.9	10.1	21.0	17.5	6.4	9.8	23.0	19.0	7.1
16/06/20	10.2	34.7	21.8	7.7	10.5	42.0	20.0	7.6	10.3	41.3	20.8	8.2
16/06/27	10.8	55.3	22.8	8.6	11.1	54.7	21.3	8.2	14.4	53.3	22.0	8.7
16/07/01	12.9	49.0	23.0	8.3	12.4	59.0	21.6	8.3	18.7	54.7	22.4	8.3
일시	S-TR#04				S-TR#05							
	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	초장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)				
16/05/30	7.1	5.3	9.5	2.0	5.8	5.0	8.1	1.8				
16/06/06	7.4	10.3	13.6	3.2	6.7	9.7	11.8	3.0				
16/06/13	13.2	23.7	19.4	5.9	12.0	20.3	18.1	5.1				
16/06/20	14.6	41.7	21.3	6.6	12.5	42.0	20.1	7.1				
16/06/27	14.2	61.7	21.6	7.6	13.7	55.0	21.3	7.6				
16/07/01	15.7	64.0	23.4	7.3	15.3	46.3	21.5	8.3				

표 3.106 시금치 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	초장(cm)	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
S-TR#01	12.9±5.6a	49.0±7.5a	23.0±1.8a	8.3±0.8a
S-TR#02	12.4±2.3a	59.0±15.7a	21.6±1.0a	8.3±0.6a
S-TR#03	18.7±11.1a	54.7±15.0a	22.4±1.8a	8.3±0.4a
S-TR#04	15.7±2.3a	64.0±10.4a	23.4±3.1a	7.3±1.6a
S-TR#05	15.3±2.5a	46.3±12.2a	21.5±1.8a	8.3±0.3a
F-value	0.558	0.989	0.518	0.907
p	0.698	0.457	0.725	0.496

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(4) 생체중량

시금치의 생체중량은 처리구별 3반복구의 작물을 수확하여 2차에 걸쳐 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다.

1차 전체 생체중량 분석 결과 S-TR#04 (93.7 g)으로 가장 큰 값을 나타내었으나, 처리구간 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$). 뿌리를 제외한 상부 생체중량도 S-TR#04 (85.7 g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으나 타 처리구간 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 분석되었으며, 근장에서도 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($p>0.05$). 2차 전체 생체중량 분석 결과도 1차와 마찬가지로 처리구간 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P>0.05$). 뿌리를 제외한 상부 생체중량 또한 S-TR#03 (76.0 g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났으나 유의한 차이는 나타나지 않았다. 또한 근장에서도 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P>0.05$).

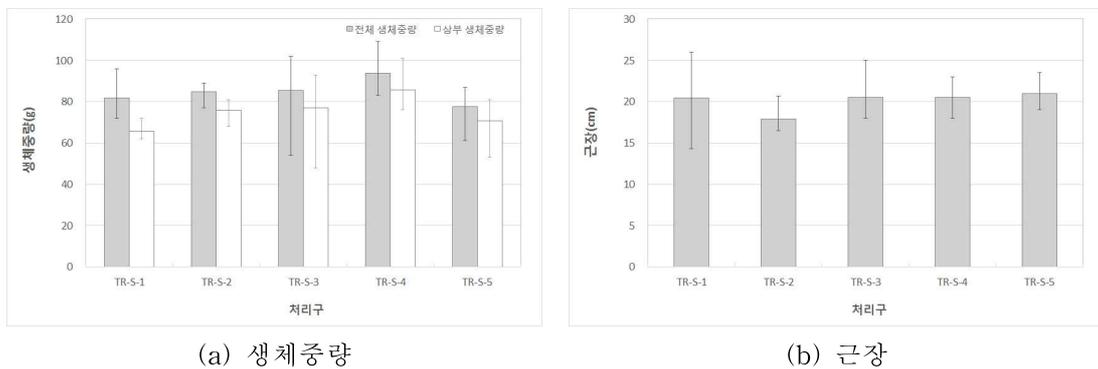


그림 3.48 시금치 처리구별 생체중량 (1차)

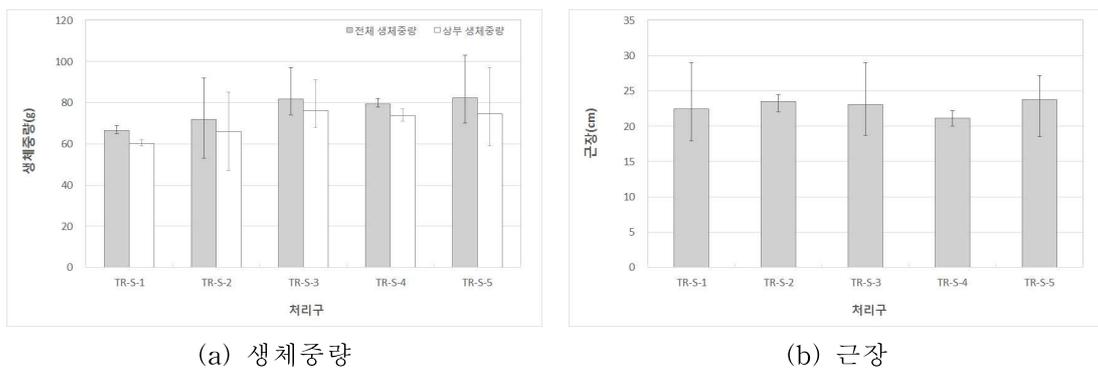


그림 3.49 시금치 처리구별 생체중량 (2차)

표 3.107 시금치 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)	근장(cm)
S-TR#01	81.7±12.7a	65.7±5.5a	20.4±5.9a
S-TR#02	84.7±6.7a	75.7±6.8a	17.9±2.4a
S-TR#03	85.3±27.2a	77.0±25.2a	20.5±3.9a
S-TR#04	93.7±13.6a	85.7±13.4a	20.5±2.5a
S-TR#05	77.7±14.5a	70.7±15.4a	21.0±2.3a
F-value	0.391	0.746	0.338
p	0.810	0.582	0.847

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

표 3.108 시금치 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)	근장(cm)
S-TR#01	66.7±2.1a	60.3±1.5a	22.5±5.8a
S-TR#02	72.0±19.5a	66.0±19.0a	23.5±1.3a
S-TR#03	81.7±13.3a	76.0±13.0a	23.1±5.3a
S-TR#04	79.3±2.3a	73.7±3.1a	21.2±1.1a
S-TR#05	82.3±18.0a	74.7±19.9a	23.7±4.6a
F-value	0.781	0.723	0.183
p	0.563	0.595	0.942

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺에 대해 수확한 시금치개체를 대상으로 분석하였다. 생체중량과 동일하게 수확하여 조사하였으며 처리구별 3반복구에 대하여 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다.

1차 처리구별 식물체 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.05), S-TR#01 (5214.3 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 S-TR#05에서 9718.3 mg/kg으로 분석되었다. 2차 처리구별 식물체 성분 Na⁺분석 결과 S-TR#01 (3187.3 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 S-TR#05에서 25837.7 mg/kg으로 분석되었으며 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다.

표 3.109 시금치 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	S-TR#01	S-TR#02	S-TR#03	S-TR#04	S-TR#05
16/05/13	5214.3 ±604.6a	6747.5 ±1702.4ab	8181.6 ±629.2ab	9665.4 ±2906.2b	9718.3 ±499.1b
F-value	4.566				
p	0.023				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level
**Mean±deviation(n=3)

표 3.110 시금치 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)				
	S-TR#01	S-TR#02	S-TR#03	S-TR#04	S-TR#05
16/07/02	3187.3 ±1185.9a	7635.3 ±2265.2ab	10685.7 ±1719.6ab	18933.3 ±4612.6bc	25837.7 ±10137.4c
F-value	9.270				
p	0.002				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level
**Mean±deviation(n=3)

(6) 토양환경 조사 분석

포트 시금치의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 파종 전과 수확 후 각 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다. 먼저, 파종 전 토양의 화학적 성분 분석결과를 정리하여 나타내었으며, 모든 처리구별로 동일한 토양을 사용하였다. 2차에 걸친 재배기간 이후 최종적인 2차 시금치 수확 후 각 처리구별 토양의 화학적 성분을 분석하였다. pH의 경우 모든 처리구에서 5.5 수준으로 비슷하게 나타났으며, EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 값이 높게 나타났고 S-TR#05 (42.83 dS/m) 에서 가장 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 S-TR#01 (1324.7 mg/kg)에 비해 S-TR#05 (8507.5 mg/kg)가 6.5배 가량 높았으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

표 3.111 시금치 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과 (파종 전)

구분	S-TR#01	S-TR#02	S-TR#03	S-TR#04	S-TR#05
pH	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
CEC(cmol/kg)	57.19	57.19	57.19	57.19	57.19
T-N(%)	0.754	0.754	0.754	0.754	0.754
T-P(mg/kg)	1750.2	1750.2	1750.2	1750.2	1750.2
P ₂ O ₅ (mg/kg)	855.71	855.71	855.71	855.71	855.71
Ca ²⁺ (mg/kg)	6184.95	6184.95	6184.95	6184.95	6184.95
Mg ²⁺ (mg/kg)	2423.1	2423.1	2423.1	2423.1	2423.1
Na ⁺ (mg/kg)	1304.3	1304.3	1304.3	1304.3	1304.3
K ⁺ (mg/kg)	3497.5	3497.5	3497.5	3497.5	3497.5
유기물 함량(%)	75.01	75.01	75.01	75.01	75.01
EC(dS/m)	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88
SAR	2.516	2.516	2.516	2.516	2.516

표 3.112 시금치 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과 (생육 후)

구분	S-TR#01	S-TR#02	S-TR#03	S-TR#04	S-TR#05
pH	5.3	5.5	5.6	5.6	5.6
CEC(cmol/kg)	50.28	46.43	59.45	46.75	47.00
T-N(%)	0.689	0.644	0.651	0.685	0.650
T-P(mg/kg)	2197.7	2019.7	2375.5	3077.0	2595.3
P ₂ O ₅ (mg/kg)	900.08	651.65	1054.50	850.02	958.77
Ca ²⁺ (mg/kg)	7731.00	6689.17	7598.17	7576.00	6936.33
Mg ²⁺ (mg/kg)	2637.6	2225.8	2363.3	2252.2	2144.7
Na ⁺ (mg/kg)	1324.7	3457.0	5287.8	7468.5	8507.5
K ⁺ (mg/kg)	2615.2	2389.1	2704.1	2725.8	3246.4
유기물 함량(%)	68.89	68.63	66.94	62.80	65.49
EC(dS/m)	12.02	20.10	27.03	35.19	42.83
SAR	2.337	6.603	9.615	13.602	16.189

아. 딸기

(1) 관개량

딸기 (*Fragaria spp.*) 작물재배는 약 14주 동안 5개의 처리구 3반복으로 1차에 걸쳐 이루어졌다. 재배기간 동안 필요시마다 관개하였으며 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 45회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 12.8 L로 측정되었다. 관개용수의 공급은 아래 표와 같이 이루어졌으며, 생육말기에 관개용수 공급이 많이 이루어진 것을 볼 수 있다.

표 3.113 딸기 생육실험 관개량

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
16/03/24	10:00	0.5	16/05/17	09:00	0.3
16/03/26	10:00	0.1	16/05/19	09:00	0.3
16/03/28	09:00	0.2	16/05/21	09:00	0.3
16/03/30	09:00	0.2	16/05/23	09:00	0.3
16/04/01	09:00	0.2	16/05/25	09:00	0.3
16/04/03	09:00	0.2	16/05/28	09:00	0.3
16/04/05	09:00	0.2	16/05/30	09:00	0.3
16/04/08	09:00	0.2	16/06/01	09:00	0.3
16/04/10	09:00	0.2	16/06/03	09:00	0.4
16/04/13	09:00	0.2	16/06/05	09:00	0.3
16/04/16	09:00	0.2	16/06/07	09:00	0.4
16/04/19	09:00	0.2	16/06/09	09:00	0.4
16/04/22	09:00	0.2	16/06/11	09:00	0.3
16/04/24	09:00	0.2	16/06/13	09:00	0.4
16/04/26	09:00	0.2	16/06/15	09:00	0.4
16/04/29	09:00	0.2	16/06/18	09:00	0.4
16/05/01	09:00	0.1	16/06/20	09:00	0.4
16/05/03	09:00	0.2	16/06/21	09:00	0.4
16/05/06	09:00	0.2	16/06/23	09:00	0.4
16/05/08	09:00	0.2	16/06/25	09:00	0.4
16/05/11	09:00	0.3	16/06/27	09:00	0.4
16/05/13	11:00	0.3	16/06/30	09:00	0.4
16/05/15	09:00	0.3			
총계	12.8				

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

딸기 생육기간동안 처리구별로 염도의 지표인 EC를 매주 측정하였으며 측정결과는 다음과 같다. 전체 생육기간동안 B-TR#01의 염도수준은 평균 0.3 dS/m로 나타났으며, 처리구는 각각 0.6 dS/m (B-TR#02), 0.7 dS/m (B-TR#03), 0.8 dS/m (B-TR#04), 그리고 0.9 dS/m (B-TR#05)가 되도록 관개용수 염도수준을 유지시켜 주었다.

표 3.114 딸기 관개용수 염도 모니터링

일자	EC _w				
	B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04	B-TR#05
16/03/24	0.320	0.572	0.684	0.773	0.885
16/03/31	0.324	0.563	0.682	0.768	0.872
16/04/07	0.318	0.557	0.679	0.766	0.870
16/04/14	0.316	0.560	0.680	0.765	0.858
16/04/21	0.290	0.562	0.674	0.762	0.853
16/04/28	0.290	0.560	0.672	0.763	0.853
16/05/04	0.292	0.557	0.670	0.759	0.858
16/05/10	0.985	0.554	0.669	0.755	0.855
16/05/13	0.282	0.552	0.667	0.754	0.855
16/05/16	0.260	0.620	0.721	0.834	0.924
16/05/23	0.265	0.618	0.725	0.842	0.925
16/05/30	0.264	0.622	0.730	0.838	0.931
16/06/06	0.264	0.622	0.731	0.835	0.934
16/06/13	0.260	0.625	0.727	0.833	0.929
16/06/20	0.262	0.630	0.733	0.830	0.921
16/6/27	0.265	0.628	0.732	0.827	0.920
평균	0.329	0.588	0.698	0.794	0.890

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 포트 딸기 재배기간 동안 관개용수를 2회 샘플링하여 pH, EC, BOD, COD, DO, 양이온, 그리고 음이온 등 17항목에 대하여 분석하였다. 작물 재배에 사용된 관개용수의 수질분석 결과 pH는 모든 처리구에서 평균 7.5~8.1 수준으로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5~8.5를 만족하는 것으로 나타났다.

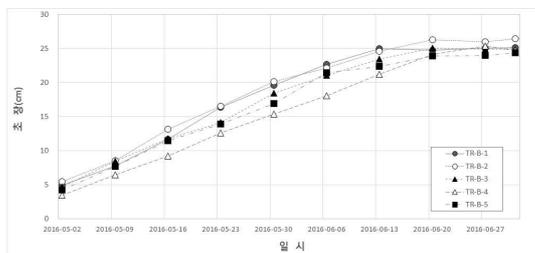
1차 생육기간에는 2회 샘플링이 이루어졌으며, 영양염류인 T-N은 1회시에는 4.50 mg/L 수준으로 나타났으며 2회시에는 3.20 mg/L 수준으로 나타나 처리구간 비슷한 수준으로 나타났으며, T-P 또한 모든 처리구에서 비슷한 수준으로 나타났다. 치환성 양이온 Na^+ 는 B-TR#01에서 8.53 mg/L로 나타났으며 다른 처리구는 평균 B-TR#02 59.53 mg/L, B-TR#03 72.36 mg/L, B-TR#04 98.14 mg/L, B-TR#05 108.93 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na^+ 값이 높게 나타났다. Na^+ 를 제외한 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)에서는 처리구별로 비슷한 값을 보였다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)를 산정한 결과 B-TR#01에서 평균 0.27, B-TR#02 (1.85), B-TR#03 (2.23), B-TR#04 (3.07), 그리고 B-TR#05에서 3.43으로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

표 3.115 딸기 관개용수 수질 모니터링 결과

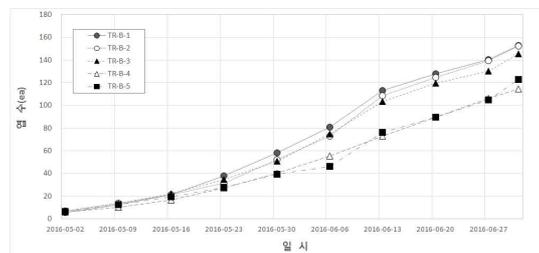
처리구	일자	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	T-N	T-P	SS	B	Cl ⁻	mg/L							EC	SAR	
											SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	HCO ₃ ⁻	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺			K ⁺
B-TR#01	16/03/24	8.1	11.4	1.2	0.8	4.53	0.044	ND	-	23.1	9.5	4.3	103.70	ND	30.40	5.41	9.67	1.77	0.32	0.300
	16/05/16	7.7	9.8	0.6	0.6	3.06	0.030	ND	-	15.7	9.6	3.4	109.80	0.036	29.48	5.39	7.38	1.91	0.26	0.232
B-TR#02	16/03/24	8.0	10.6	0.8	0.8	4.50	0.011	1	-	73.7	9.6	4.3	103.70	ND	30.82	6.01	44.23	2.28	0.47	1.349
	16/05/16	7.9	9.1	0.1	0.5	3.38	0.008	ND	-	121.5	9.6	3.4	106.75	ND	29.57	5.24	74.82	2.34	0.62	2.355
B-TR#03	16/03/24	8.0	10.2	0.5	0.8	4.57	0.011	ND	-	100.2	9.6	4.2	104.92	ND	30.90	5.81	62.62	2.33	0.57	1.915
	16/05/16	8.0	9.3	0.3	0.5	3.53	0.021	1	-	156.4	9.6	3.4	106.75	ND	30.70	5.15	82.09	2.39	0.72	2.551
B-TR#04	16/03/24	8.0	10.1	0.1	0.9	4.55	0.061	3	-	122.6	9.7	4.3	103.70	ND	30.32	5.99	76.40	2.44	0.63	2.345
	16/05/16	7.5	9.3	0.4	0.7	3.24	0.019	ND	-	178.9	9.6	3.4	109.80	ND	29.30	5.12	119.88	2.45	0.83	3.797
B-TR#05	16/03/24	8.0	10.2	0.3	1.4	4.55	0.051	ND	-	150.2	9.5	4.2	103.70	ND	27.91	5.87	89.18	2.50	0.73	2.830
	16/05/16	7.7	9.4	0.4	0.7	2.97	0.008	ND	-	207.7	9.6	3.4	106.75	ND	30.19	5.15	128.68	2.51	0.92	4.026

(3) 작물생육

딸기의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 5개 처리구 및 3반복구에 대하여 매주 초장, 엽수에 대해 생육모니터링을 실시하였다. 또한 수확 전 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 21.0 (SPSS, Inc., 2012)를 사용하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 터키 검증 (Tukey's HSD)을 사용하였다. 먼저 1차 딸기의 작물생육 결과, 딸기의 작물생육 결과, 시기별 처리구에 따른 초장, 엽수의 변화는 유사하며, 처리구별 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 수확 후 처리구별 초장과 엽수를 살펴보면, 엽도 수준이 낮을수록 전반적으로 초장은 길고 엽수는 많은 것으로 나타났지만 통계적으로는 처리구간 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).



(a) 초장



(b) 엽수

그림 3.50 딸기 처리구별 생육변화

표 3.116 딸기 처리구별 생육변화

일시	B-TR#01		B-TR#02		B-TR#03		B-TR#04		B-TR#05	
	초장 (cm)	엽수 (ea)								
16/05/02	4.9	5.7	5.4	7.0	4.7	7.0	3.4	6.0	4.2	6.7
16/05/09	7.8	12.7	8.6	13.7	8.4	13.3	6.4	10.3	7.7	12.3
16/05/16	11.7	21.3	13.2	21.3	11.8	22.0	9.2	16.7	11.4	19.3
16/05/23	16.4	37.7	16.6	31.3	14.2	34.7	12.6	27.3	14.0	27.7
16/05/30	19.6	58.0	20.1	52.3	18.5	50.7	15.4	40.0	17.0	39.3
16/06/06	22.7	80.7	22.2	73.0	21.1	75.0	18.1	55.3	21.5	46.0
16/06/13	25.0	113.3	24.6	108.3	23.5	103.3	21.3	73.0	22.4	76.0
16/06/20	24.8	128.0	26.3	124.7	25.1	119.7	24.2	89.7	24.0	89.7
16/06/27	25.1	140.3	26.0	139.3	24.9	130.3	25.4	106.0	24.0	104.7
16/07/01	25.2	153.0	26.5	152.3	24.9	145.3	24.8	114.3	24.4	123.0

표 3.117 딸기 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과

처리구	초장(cm)	엽수(ea)
B-TR#01	25.2±1.1a	153.0±11.5a
B-TR#02	26.5±1.6a	152.3±25.0a
B-TR#03	24.9±0.7a	145.3±7.8a
B-TR#04	24.8±3.0a	114.3±30.0a
B-TR#05	24.4±2.3a	123.0±11.5a
F-value	0.523	2.569
p	0.721	0.103

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(4) 생체중량

딸기의 생체중량은 처리구별 3반복구의 작물을 수확하여 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다. 전체 생체중량, 상부 생체중량, 근장 모두 처리구간 뚜렷한 경향성이 나타나지 않았으며, 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$).

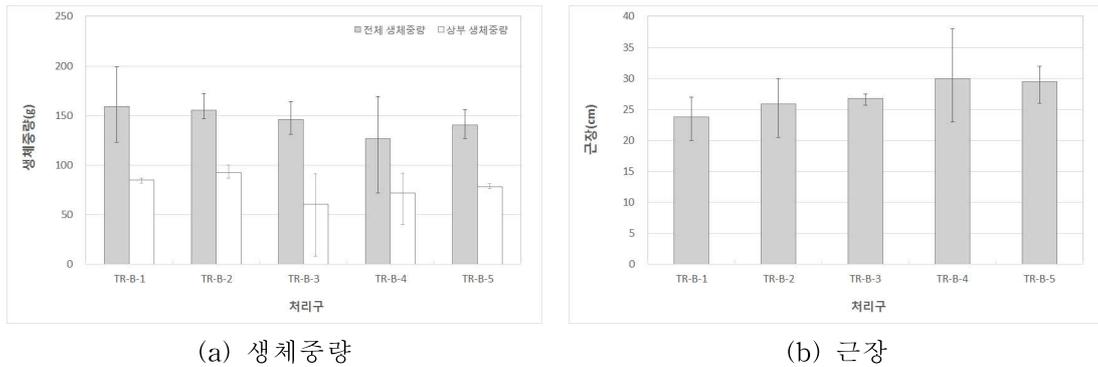


그림 3.51 딸기 처리구별 생체중량

표 3.118 딸기 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)	근장(cm)
B-TR#01	159.3±38.1a	85.0±2.6a	23.8±3.5a
B-TR#02	155.3±14.4a	92.3±6.8a	25.8±4.9a
B-TR#03	146.3±16.6a	60.7±45.8a	26.8±1.0a
B-TR#04	127.0±49.8a	71.7±27.8a	30.0±7.5a
B-TR#05	140.3±14.6a	78.3±2.5a	29.5±3.1a
F-value	0.533	0.761	0.974
p	0.715	0.574	0.464

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level
 **Mean±deviation(n=3)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na^+ 에 대해 수확한 딸기개체를 대상으로 분석하였다. 생체 중량과 동일하게 수확하여 조사하였으며 처리구별 3반복구에 대하여 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 1차 처리구별 식물체 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), B-TR#01 (258.9 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na^+ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 B-TR#05에서 4920.8 mg/kg으로 분석되었다.

표 3.119 딸기 처리구별 식물체 성분 분석결과

구분	Na^+ (mg/kg)				
	B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04	B-TR#05
16/07/01	258.9 ±118.9a	2056.5 ±457.1ab	2821.9 ±527.5ab	4406.7 ±2671.1b	4920.8 ±668.3b
F-value	6.517				
p	0.008				

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=3)

(6) 토양환경 조사 분석

딸기의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 파종전과 수확 후 각 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다.

먼저, 파종 전 토양의 화학적 성분 분석결과를 정리하여 나타내었으며, 모든 처리구별로 동일한 토양을 사용하였다. 1차에 걸친 재배기간 이후 최종적인 수확 후 각 처리구별 토양의 화학적 성분을 분석하였다. pH의 경우 모든 처리구에서 5.5 ~ 5.8 수준으로 비슷하게 나타났으며, EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 전반적으로 값이 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 S-TR#01 (1202.9 mg/kg)에 비해 S-TR#05 (3278.2 mg/kg)가 2.7배 가량 높았으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

표 3.120 딸기 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과 (파종 전)

구분	B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04	B-TR#05
pH	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
CEC(cmol/kg)	57.19	57.19	57.19	57.19	57.19
T-N(%)	0.754	0.754	0.754	0.754	0.754
T-P(mg/kg)	1750.2	1750.2	1750.2	1750.2	1750.2
P ₂ O ₅ (mg/kg)	855.71	855.71	855.71	855.71	855.71
Ca ²⁺ (mg/kg)	6184.95	6184.95	6184.95	6184.95	6184.95
Mg ²⁺ (mg/kg)	2423.1	2423.1	2423.1	2423.1	2423.1
Na ⁺ (mg/kg)	1304.3	1304.3	1304.3	1304.3	1304.3
K ⁺ (mg/kg)	3497.5	3497.5	3497.5	3497.5	3497.5
유기물 함량(%)	75.01	75.01	75.01	75.01	75.01
EC(dS/m)	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88
SAR	2.516	2.516	2.516	2.516	2.516

표 3.121 딸기 처리구별 토양의 화학적 성분분석 결과 (생육 후)

구분	B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04	B-TR#05
pH	5.5	5.5	5.8	5.7	5.8
CEC(cmol/kg)	61.81	57.39	52.32	53.55	60.67
T-N(%)	0.530	0.581	0.589	0.591	0.582
T-P(mg/kg)	2583.7	2341.1	2495.1	2069.4	1819.0
P ₂ O ₅ (mg/kg)	940.98	826.09	947.39	772.53	536.56
Ca ²⁺ (mg/kg)	8431.45	7600.47	8007.03	7413.48	7745.75
Mg ²⁺ (mg/kg)	2548.1	2405.5	2382.6	2150.9	2180.6
Na ⁺ (mg/kg)	1202.9	2632.6	3261.1	3132.4	3278.2
K ⁺ (mg/kg)	1936.0	2649.2	2472.1	2687.0	2264.6
유기물함량(%)	70.71	68.51	69.14	70.95	69.76
EC(dS/m)	9.64	14.92	17.02	17.78	15.19
SAR	2.083	4.769	5.815	5.825	5.995

제4절 기수담수화 시스템 현장적용을 위한 작물생육평가

1. 취수용수의 염도수준별 작물생육 실험

가. 실험설계

기수담수화 시스템의 현장적용을 위한 취수용수의 염도수준별 작물생육 실험을 위해 서울대학교 평창캠퍼스의 온실시설(면적 259.2m²)을 임대하여 본 실험을 수행하였다. 본 실험의 대상작물은 1) 실제 시설재배지에서 많이 재배되는 작물⁷⁾이며, 2) 재배가 용이하고, 3) 내염성 (salt tolerance)이 보통인 작물, 4) 생육기간이 짧은 작물을 기준으로 선정한 결과 상추 (*Lactuca sativa L.*)로 선정되었다. 상추는 권농종묘의 선풍포첩적측면 상추를 파종하여 각 염도별 관개용수로 육묘(포트육묘)하였으며, 4주가 지난 뒤 모종을 정식하였다. 고랑에는 (주)서울바이오에서 판매하는 바로커 상토로 고랑 당 400 L를 채워 재배하였으며, 모종 간격은 점적관개호스의 이미터 간격인 30 cm를 따랐다. 관개용수 공급은 정량펌프(50 ml/분)를 사용하여 이루어졌으며, 일별 관개시간을 모니터링하여 일별 관개량을 산정하였다. 관개용수의 염도수준은 매주 EC측정기 (HI-98192)를 사용하여 각 처리구별로 설정한 관개용수의 염도가 유지될 수 있도록 하였다. 또한, 관개용수는 모두 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)에서 수질오염공정시험기준 (환경부, 2014)을 준용하여 pH, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, SS 등 16개 항목을 대상으로 분석하였다. 토양은 각 처리구별로 파종일과 수확일 총 2회에 걸쳐 pH, EC, CEC, T-N, T-P 등 11개 항목을 대상으로 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)에서 ASA (american society if agronomy)와 SSSA (soil science society of america) 토양분석방법 (Chapman과 Pratt, 1961)에 준용하여 분석하였다.

작물생육조사는 매주 상추의 엽수, 엽장, 엽폭에 대해 조사하였으며, 수확 시에는 전체 생체중량 및 상부생체 중량을 조사하였다. 또한, 염도에 따른 식물체 내 집적 등 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺에 대해 수확한 작물들을 대상으로 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)에서 토양 및 식물체 분석법(농업과학기술원, 2010)을 준용하여 Na⁺을 분석하였다.

나. 취수용수의 염도설정

취수용수의 염도수준별 작물생육 실험을 수행을 위해 TR#01은 상수도 그대로 사용하고, 나머지 TR#02, TR#03, TR#04는 각각 염도수준을 달리하여 기수담수화 PILOT PLANT에 적용하고자 하였다. 각 취수용수의 염도수준을 고려하기 위해 기존의 관개용수 염도에 따른 작물생육 연구결과(Ayers와 Westcot, 1985)를 바탕으로 유입조에 넣을 염도수준을 고려하였다. 먼저, TR#02는 상추의 100% 수확량 임계기준인 0.9 dS/m인 원수(취수원수), TR#03은 상추의 75% 수확량 임계기준인 2.1 dS/m인 원수(취수원수), TR#04는 상추의 50% 수확량 임계기준인 3.4 dS/m인 원수(취수원수)를 각각 기수담수화 PILOT PLANT의 유입조에 넣고 시스템을 가동하여 처리된 물을 사용하였다. 이렇게 처리된 처리수의 염도는 각각 0.02 dS/m (TR#02), 0.06 dS/m (TR#03), 0.11 dS/m (TR#04) 정도로 나타났다.

7) 상추는 전체 시설재배면적 89,541 ha 중 3,519 ha에 재배되고 있으며 (3.9%), 전체 작물 중 6번째로 많이 재배되는 작물이다. 수박 (14.2%), 토마토(7.1%), 딸기(7.0%), 참외(6.3%), 풋고추(5.6%), 상추 순으로 재배되고 있다.

표 4.1 관개용수 및 토양 염도수준에 따른 작물생육 영향 (Ayers와 Westcot, 1985)

작물	EC_w				
	100% yield	90% yield	75% yield	50% yield	0% yield
브로콜리 (Broccoli)	1.9	2.6	3.7	5.5	9.1
당근 (Carrot)	0.7	1.1	1.9	3.0	5.4
토마토 (Tomato)	1.7	2.3	3.4	5.0	8.4
오이 (Cucumber)	1.7	2.2	2.9	4.2	6.8
시금치 (Spinach)	1.3	2.2	3.5	5.7	10
		∴			
상추 (Lettuce)	0.9	1.4	2.1	3.4	6.0
무 (Radish)	0.8	1.3	2.1	3.4	5.9
딸기 (Strawberry)	0.7	0.9	1.2	1.7	2.7

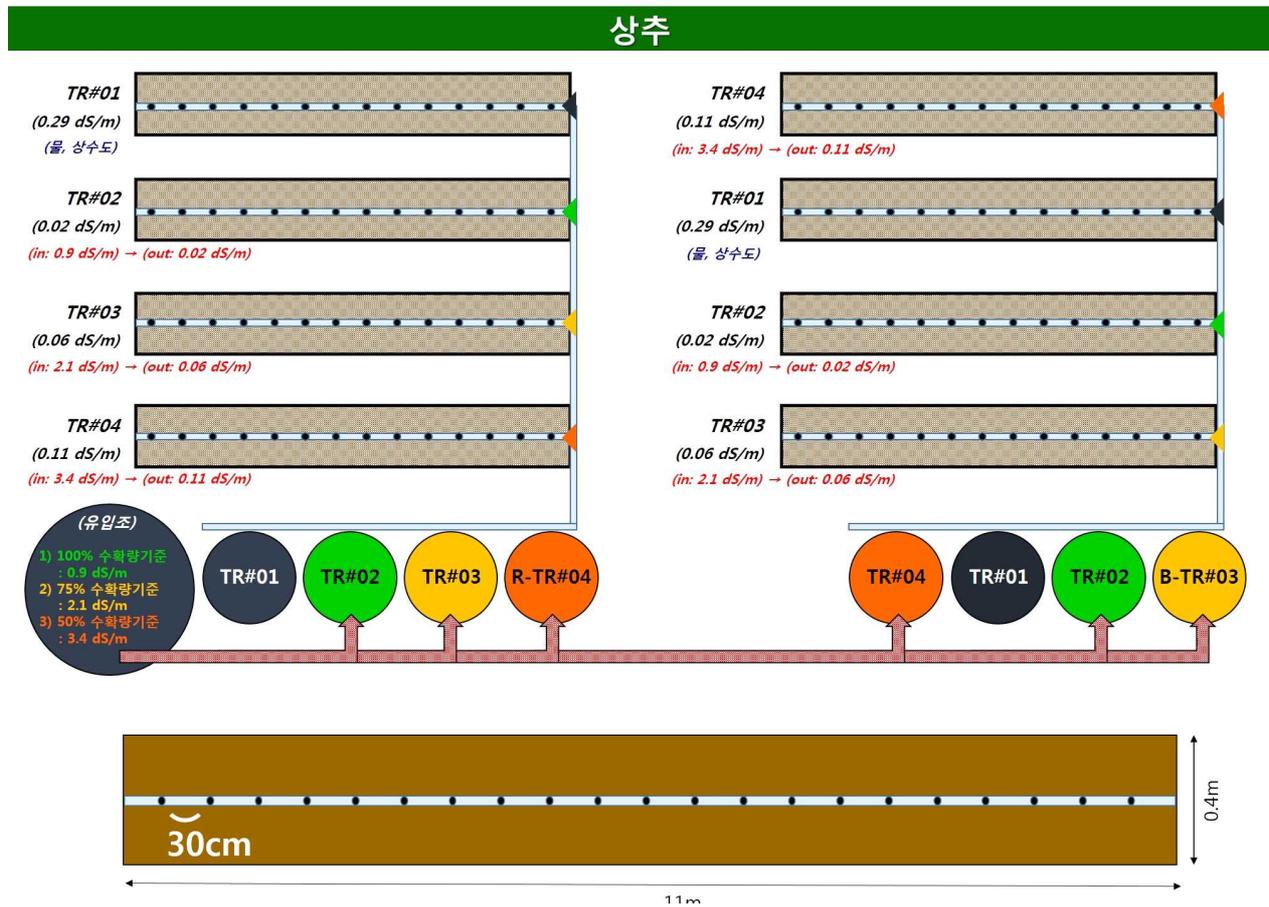


그림 4.1 취수용수의 염도수준별 작물생육실험 설계

다. 취수용수의 염도수준별 상추 생육실험

(1) 관개량

상추는 4주 동안 4처리구 2반복으로 2차례 이루어졌으며 관개용수 공급은 정량펌프를 사용하여 이루어졌다. 1차 재배기간 동안 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 14회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 97.0 L로 측정되었고, 2차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 13회, 처리구당 총 관개용수 공급량은 124 L로 측정되었다.

표 4.2 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추) 관개량 (1차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/06/10	10:00	16.0	15/06/27	10:00	6.0
15/06/12	10:00	6.0	15/06/28	10:00	6.0
15/06/14	10:00	6.0	15/06/30	10:00	6.0
15/06/16	10:00	6.0	15/07/02	10:00	6.0
15/06/17	10:00	6.0	15/07/04	10:00	6.0
15/06/22	10:00	9.0	15/07/06	10:00	6.0
15/06/24	10:00	6.0	15/07/07	10:00	6.0
총계	97.0				

표 4.3 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추) 관개량 (2차)

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
15/08/25	10:00	12.0	15/09/09	10:00	6.0
15/08/28	10:00	12.0	15/09/12	10:00	12.0
15/08/30	10:00	9.0	15/09/15	10:00	9.0
15/09/02	10:00	12.0	15/09/17	10:00	12.0
15/09/04	10:00	4.5	15/09/19	10:00	9.0
15/09/06	10:00	7.5	15/09/21	10:00	10.0
15/09/07	10:00	9.0			
총계	124.0				

(2) 관개용수 수질 및 염도수준

상추 1, 2차 생육기간동안 처리구별로 염도를 매주 측정하였으며 염도수준 측정결과는 다음 표에 나타내었다. 1차 실험의 TR#01 EC 농도 측정결과 0.29 dS/m 수준으로 나타났으며 TR#02는 0.02 dS/m, TR#03 0.05 dS/m, TR#04 0.11 dS/m 수준으로 나타났다. 2차 실험의 TR#01 EC 농도 측정결과 0.30 dS/m, TR#02는 평균 0.03 dS/m, TR#03은 평균 0.07 dS/m, TR#04는 평균 0.11 dS/m로 나타났다.

표 4.4 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 관개용수 염도 모니터링 (1차)

반복구	일자	EC _w			
		TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
1	15/06/11	0.255	0.013	0.057	0.094
	15/06/18	0.300	0.015	0.069	0.118
	15/06/25	0.304	0.020	0.057	0.101
	15/07/02	0.303	0.020	0.058	0.101
	평균	0.291	0.017	0.060	0.104
2	15/06/11	0.251	0.017	0.038	0.094
	15/06/18	0.298	0.021	0.045	0.120
	15/06/25	0.293	0.025	0.043	0.122
	15/07/02	0.297	0.024	0.043	0.124
	평균	0.285	0.022	0.042	0.115

표 4.5 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 관개용수 염도 모니터링 (2차)

반복구	일자	EC _w			
		TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
1	15/08/27	0.316	0.022	0.062	0.088
	15/09/03	0.300	0.024	0.062	0.088
	15/09/10	0.280	0.026	0.073	0.107
	15/09/17	0.292	0.031	0.083	0.122
	평균	0.297	0.026	0.070	0.101
2	15/08/27	0.318	0.025	0.054	0.106
	15/09/03	0.284	0.025	0.054	0.109
	15/09/10	0.300	0.031	0.075	0.113
	15/09/17	0.286	0.036	0.084	0.129
	평균	0.297	0.029	0.067	0.114

처리구별 관개용수의 수질을 평가하기 위하여 생육기간별 처리구 및 반복구당 1회 샘플링 하여 pH, EC, BOD, COD, DO, T-N, T-P, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 등 12항목에 대하여 분석하였다. 1차 생육실험에 사용된 관개용수 수질 분석결과, TR#01에서 pH는 7.9로 나타났으며 TR#02~TR#04 처리수에서는 6.5~6.9 수준으로 TR#01보다 낮은 값이 나타났지만 지하수 농업용수 수질기준인 6.5~8.5를 모두 만족하는 것으로 나타났다. EC의 경우 TR#01에서 0.24 dS/m로 나타났으며 TR#02 0.02 dS/m, TR#03 0.04 dS/m, TR#04 0.09 dS/m로 값이 나타났다. 영양염류 T-N의 경우 TR#01에서 2.85 mg/L로 나타났으며 처리수 TR#02에서는 0.24 mg/L, TR#03는 0.33 mg/L, TR#04는 0.41 mg/L로 모두 TR#01보다 낮게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 TR#01에서 8.86 mg/L로 나타났으며, TR#02 2.97 mg/L, TR#03 8.49 mg/L로 TR#01보다 낮은 값을 보였으나 TR#04에서는 16.88mg/L로 TR#01보다 약 2배정도 높은 값이 나타났다. 다른 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺)의 경우, TR#01에서는 Ca²⁺ (31.12 mg/L), Mg²⁺ (5.55 mg/L)항목 모두 값이 나타났으나 다른 처리구에서는 Ca²⁺의 경우 0.20 mg/L 이하의 값이 나타났으며 Mg²⁺ 또한 모든 처리구에서 0.02 mg/L 이하의 값이 나타났다.

2차 생육실험의 처리구별 관개용수 수질 분석결과, TR#01의 pH는 8.3으로 나타났고 처리수 TR#02~TR#04에서는 8.1~8.9 수준의 pH값이 나타났다. TR#02의 경우 pH 평균이 8.5로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5~8.5을 만족하였지만, TR#03과 TR#04의 경우는 pH 평균이 각각 8.6과 8.7로 다소 높은 것으로 나타났다. EC의 경우 TR#01에서 0.26 dS/m로 나타났으며 TR#02 0.02 dS/m, TR#03 0.05 dS/m, TR#04 0.08 dS/m로 값이 나타났다. 영양염류 T-N의 경우 TR#01에서 3.32 mg/L로 나타났으며 처리수인 TR#02에서는 0.16 mg/L, TR#03는 0.31 mg/L, TR#04는 0.36mg/L로 모두 TR#01보다 낮게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 TR#01에서 8.86 mg/L로 나타났으며, TR#02는 2.31 mg/L로 TR#01보다 낮은 값을 보였으나, TR#03 (9.53 mg/L)과 TR#04 (15.52 mg/L)에서는 TR#01보다 높은 값이 나타났다. 다른 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺)의 경우, 1차 생육실험과 마찬가지로 TR#01의 Ca²⁺ (32.89 mg/L), Mg²⁺ (6.01 mg/L)항목 모두 값이 나타났으나 다른 처리구에서는 Ca²⁺의 경우 0.20 mg/L 이하의 값, Mg²⁺는 0.02 mg/L 이하의 값이 나타났다.

표 4.6 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	EC	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	Fe	SAR
			dS/m	mg/L														
TR#01	15/06/10	7.9	0.24	9.4	0.5	0.6	2.85	0.004	3	31.12	5.55	8.86	1.83	15.8	10.6	2.66	0.046	0.27
TR#02-1	15/06/10	6.9	0.01	9.4	0.5	0.5	0.24	ND	ND	ND	ND	2.39	0.27	2.1	ND	0.13	0.025	-
TR#03-1	15/06/10	6.5	0.03	9.6	0.6	0.6	0.29	ND	1	0.02	0.01	6.49	0.28	8.1	ND	0.19	0.041	6.61
TR#04-1	15/06/10	6.6	0.09	9.2	0.4	0.5	0.43	ND	1	0.18	0.02	16.23	0.74	23.2	ND	0.029	0.027	6.84
TR#02-2	15/06/10	6.5	0.02	9.5	0.5	0.6	0.23	0.005	3	0.01	ND	3.55	0.28	3.6	ND	0.15	0.024	6.90
TR#03-2	15/06/10	6.6	0.05	9.5	0.5	0.6	0.36	0.006	1	0.07	0.01	10.49	0.3	13.9	ND	0.26	0.027	6.94
TR#04-2	15/06/10	6.5	0.09	10.4	0.4	0.5	0.38	ND	4	0.09	0.01	17.52	0.27	25.4	ND	0.28	0.025	10.44

표 4.7 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 관개용수 수질 모니터링 결과 (2차)

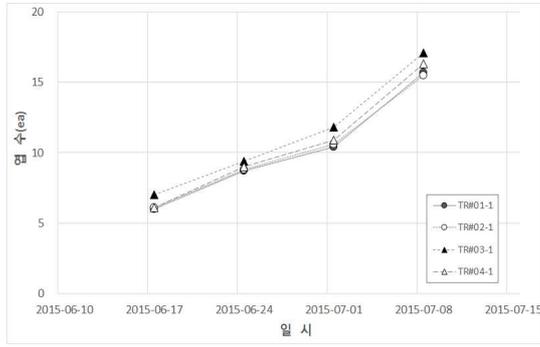
처리구	일자	pH	EC	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	Fe	SAR
			dS/m	mg/L														
TR#01	15/08/28	8.3	0.26	9.3	0.6	0.4	3.32	ND	ND	32.89	6.01	10.4	1.81	15.7	10.8	3.0	ND	0.31
TR#02-1	15/08/28	8.1	0.02	7.5	0.3	0.2	0.17	ND	ND	ND	0.01	2.13	0.01	2.8	ND	0.2	ND	3.23
TR#03-1	15/08/28	8.4	0.05	7.5	ND	0.2	0.33	ND	ND	0.06	0.01	10.43	7.73	12.4	ND	0.3	ND	7.34
TR#04-1	15/08/28	8.9	0.07	7.5	0.7	0.8	0.35	ND	2.0	0.08	0.01	14.46	5.29	18.5	ND	0.3	ND	9.06
TR#02-2	15/08/28	8.9	0.02	7.50	0.7	0.2	0.15	ND	2	ND	0.01	2.49	0.01	3.7	ND	0.1	ND	3.78
TR#03-2	15/08/28	8.8	0.05	7.40	0.4	0.2	0.29	ND	ND	0.05	0.01	8.62	9.51	10.9	ND	0.3	ND	6.51
TR#04-2	15/08/28	8.5	0.09	7.50	0.7	0.6	0.36	ND	1	0.13	0.01	16.58	7.5	22.1	ND	0.3	ND	8.43

(3) 작물생육 특성

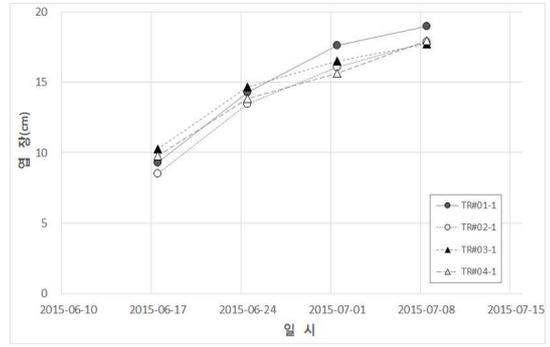
처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 2반복구당 10개의 개체를 임의로 선정하여 매주 엽수, 엽장, 엽폭에 대한 생육모니터링을 실시하였다. 1차와 2차 생육기간동안 관개용수 처리수준에 따른 엽수, 엽장, 엽폭 측정값을 평균하여 아래 그림과 표에 나타내었다. 또한 집단간의 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지를 검증하기 위해 분산분석(ANOVA)을 실시하였으며 5% 유의수준에서 각 처리구별 분산분석 결과를 분석하였다. 이때, 방법은 던컨의 다중범위검정(Duncan's Multiple Range Test)을 사용하였다.

먼저, 1차 1반복구에 대하여 상추 수확 후 생육특성 분석 결과 TR#03 (17.1 ea)에서 엽수가 가장 많이 나타났고 TR#04 (16.3 ea), TR#01 (15.7 ea), TR#02 (15.5 ea) 순으로 엽수가 나타났으나 유의성은 없는 것으로 분석되었다 ($p>0.05$). 엽장 또한 유의성은 나타나지 않았지만 ($p>0.05$), TR#01 (19 cm)에서 가장 높게 나타났으며 다른 처리구에서는 평균 17.9 cm로 유사한 수준의 값이 나타났다. 엽폭 또한 유의성은 나타나지 않았지만 ($p>0.05$), TR#03, TR#04 (20.9 cm)에서 높은 값이 나타났으며 TR#01 (20.3cm), TR#02 (20.3cm)로 조사되었다. 2반복구 생육특성 분석결과 엽수의 경우 TR#01 (18.5 ea)에서 가장 많이 나타났고 TR#03 (16.6 ea)에서 가장 낮게 나타났으나 유의성은 없는 것으로 분석되었다. 엽장 또한 유의성은 나타나지 않았으며 ($p>0.05$) 모든 처리구에서 약 18.1~18.9 cm 범위의 값이 나타났다. 엽폭의 경우 TR#04 (22.1 cm)에서 높게 나타났으며 TR#03 (20.5 cm)에서 가장 낮은 값이 나타났다. TR#03에서 엽수, 엽장, 엽폭 모두 다른 처리구에 비해 낮은 값이 나타나는 경향을 보였다.

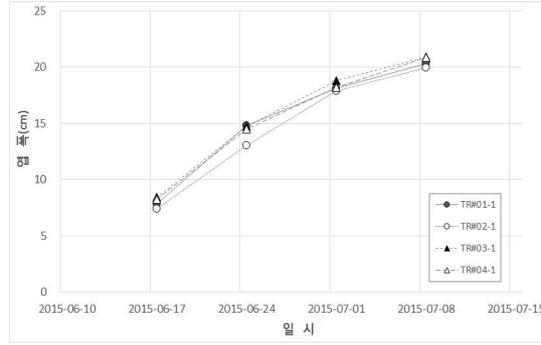
2차 1반복구에 대하여 상추 수확 후 생육특성 분석 결과 TR#03 (18.0 ea)에서 엽수가 가장 많이 나타났고 TR#04 (17.5 ea), TR#01 (17.4 ea), TR#02 (16.9 ea) 순으로 엽수가 나타났으나 유의성은 없는 것으로 분석되었다 ($p>0.05$). 엽장 또한 유의성은 나타나지 않았지만 ($p>0.05$), TR#04 (18.3 cm)에서 가장 높게 나타났으며, 엽폭 또한 유의성은 나타나지 않았지만 ($p>0.05$), TR#03 (21.8 cm)에서 가장 높은 값이 나타났으며 TR#04 (21.5 cm), TR#02 (21.4cm), TR#01 (20.8cm)순으로 조사되었다. 2반복구 생육특성 분석결과 엽수의 경우 TR#04 (16.8 ea)에서 가장 많이 나타났고 TR#03 (15.1 ea)에서 가장 낮게 나타났으나 유의성은 없는 것으로 분석되었다. 엽폭 또한 유의성은 나타나지 않았으며 ($p>0.05$) TR#01 (22.8 cm)에서 높게 나타났으며 TR#02 (20.1 cm)에서 가장 낮은 값이 나타났다. 엽장의 경우 모든 처리구에서 약 16.4~18.3 cm 범위의 값을 가지며 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 1차 생육 실험과 마찬가지로 TR#03에서 엽수, 엽장, 엽폭 모두 다른 처리구에 비해 낮은 값이 나타나는 경향을 보였다.



(a) 엽수

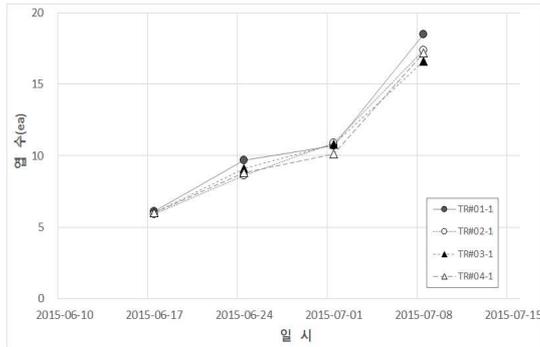


(b) 엽장

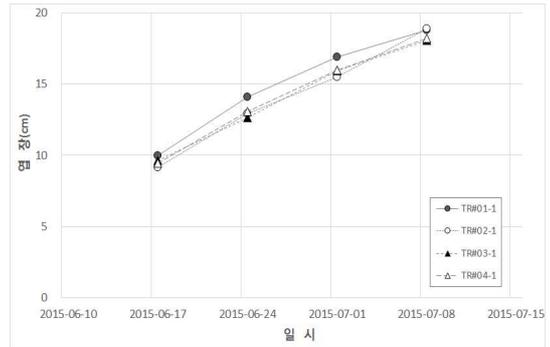


(c) 엽폭

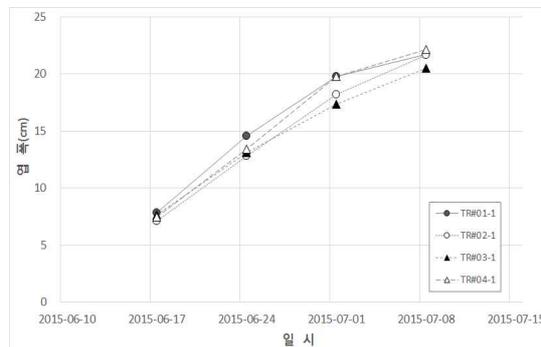
그림 4.2 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생육변화 (1차 1반복구)



(a) 엽수



(b) 엽장



(c) 엽폭

그림 4.3 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생육변화 (1차 2반복구)

표 4.8 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생육변화 (1차)

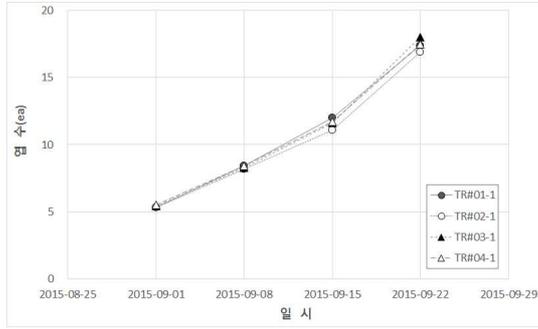
일시 (1반복구)	TR#01-1			TR#02-1			TR#03-1			TR#04-1		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
15/06/17	6.0	9.3	7.8	6.1	8.5	7.4	7.0	10.3	8.5	6.1	9.8	8.3
15/06/24	8.7	14.3	14.8	8.8	13.5	13.0	9.4	14.7	14.8	9.0	13.9	14.5
15/07/01	10.4	17.6	18.1	10.6	16.1	17.9	11.8	16.5	18.8	10.9	15.7	18.2
15/07/08	15.7	19.0	20.3	15.5	17.9	19.9	17.1	17.8	20.9	16.3	18.0	20.9
일시 (2반복구)	TR#01-2			TR#02-2			TR#03-2			TR#04-2		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
15/06/17	6.1	10.0	7.8	5.9	9.2	7.1	6.0	9.6	7.6	6.0	9.5	7.5
15/06/24	9.7	14.1	14.5	8.6	12.9	12.8	9.1	12.6	13.1	8.8	13.1	13.4
15/07/01	10.7	16.9	19.8	10.9	15.5	18.2	10.8	16.0	17.4	10.1	16.0	19.8
15/07/08	18.5	18.8	21.7	17.4	18.9	21.6	16.6	18.1	20.5	17.2	18.2	22.1

표 4.9 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 각 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

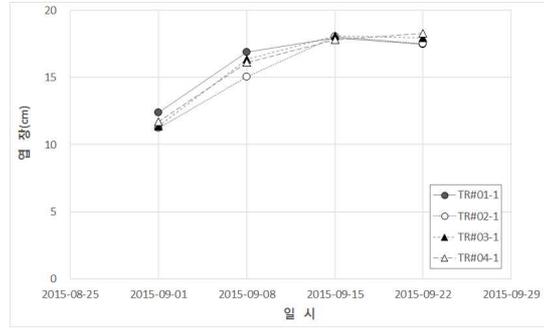
반복구	처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
1	TR#01-1	15.7±1.5a	19.0±3.1a	20.3±3.4a
	TR#02-1	15.5±1.7a	17.9±1.8a	19.9±2.8a
	TR#03-1	17.1±1.6a	17.8±1.6a	20.9±2.7a
	TR#04-1	16.3±2.1a	18.0±1.0a	20.9±2.8a
	F-value	1.729	0.764	0.247
	p	0.178	0.522	0.863
2	TR#01-2	18.5±1.3a	18.8±1.4a	21.7±2.1a
	TR#02-2	17.4±2.0ab	18.9±0.8a	21.6±1.5a
	TR#03-2	16.6±2.3b	18.1±1.0a	20.5±3.1a
	TR#04-2	17.2±0.9ab	18.2±1.3a	22.1±2.0a
	F-value	2.159	1.215	0.966
	p	0.110	0.318	0.419

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

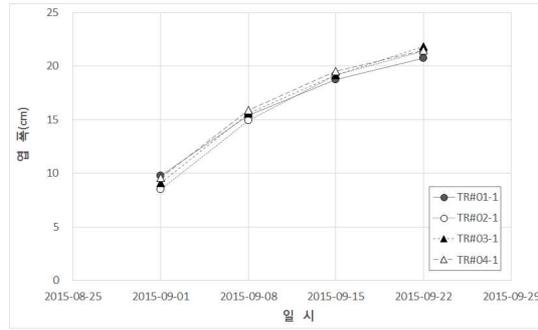
**Mean±deviation(n=10)



(a) 엽수

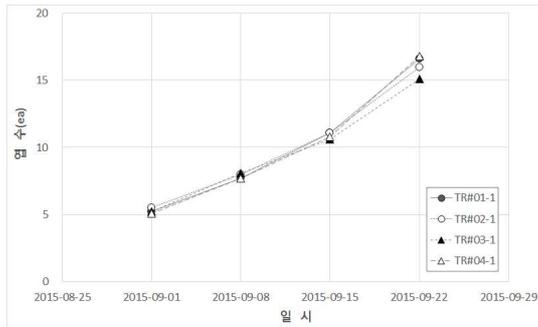


(b) 엽장

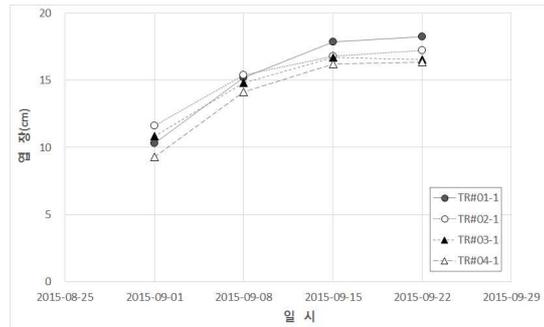


(c) 엽폭

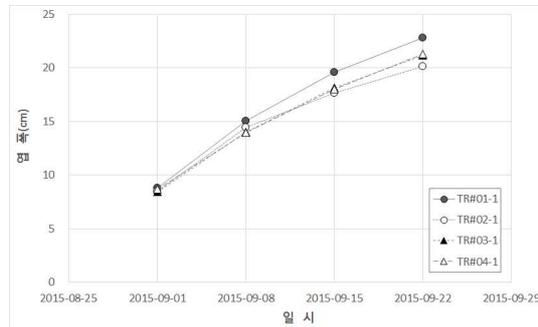
그림 4.4 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생육변화 (2차 1반복구)



(a) 엽수



(b) 엽장



(c) 엽폭

그림 4.5 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생육변화 (2차 2반복구)

표 4.10 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생육변화 (2차)

일시 (1반복구)	TR#01-1			TR#02-1			TR#03-1			TR#04-1		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
15/09/01	5.3	12.4	9.8	5.3	11.2	8.5	5.4	11.4	9.1	5.5	11.7	9.6
15/09/08	8.4	16.9	15.4	8.2	15.0	14.9	8.3	16.4	15.6	8.4	16.2	15.9
15/09/15	12.0	18.0	18.7	11.1	18.1	19.1	11.6	18.1	19.2	11.7	17.9	19.5
15/09/22	17.4	17.5	20.8	16.9	17.6	21.4	18.0	18.0	21.8	17.5	18.3	21.5
일시 (2반복구)	TR#01-2			TR#02-2			TR#03-2			TR#04-2		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)									
15/09/01	5.2	10.3	8.8	5.5	11.6	8.5	5.2	10.9	8.5	5.1	9.3	8.7
15/09/08	7.7	15.2	15.0	8.0	15.4	14.5	8.1	14.8	14.0	7.7	14.2	14.0
15/09/15	11.1	17.9	19.6	11.1	16.8	17.7	10.6	16.7	18.1	10.8	16.2	18.0
15/09/22	16.6	18.3	22.8	16.0	17.3	20.1	15.1	16.6	21.2	16.8	16.4	21.3

표 4.11 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 각 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

반복구	처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
1	TR#01-1	17.4±2.0a	17.5±1.4a	20.8±2.6a
	TR#02-1	16.9±0.9a	17.6±1.6a	21.4±2.0a
	TR#03-1	18.0±2.0a	18.0±1.3a	21.8±2.4a
	TR#04-1	17.5±1.4a	18.1±0.7a	21.5±1.7a
	F-value	0.764	0.871	0.400
	p	0.522	0.465	0.754
2	TR#01-2	16.6±1.6a	18.3±1.0a	22.8±1.9a
	TR#02-2	16.0±2.4a	17.3±2.3ab	20.1±3.0ab
	TR#03-2	15.1±2.1a	16.6±1.8b	21.2±3.0ab
	TR#04-2	16.8±2.3a	16.4±0.9b	21.3±1.5b
	F-value	1.320	2.949	2.031
	p	0.283	0.046	0.127

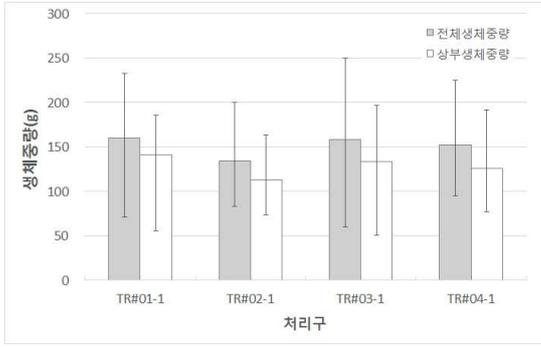
*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

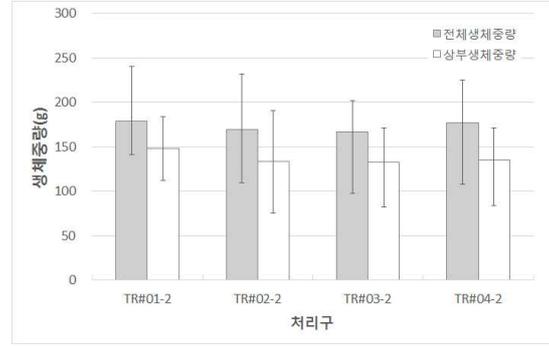
(4) 생체중량

생체중량은 1차 7월 8일, 2차 9월 22일에 처리구별 반복구당 10개의 개체를 수확하여 조사하고, 자료분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 집단 간의 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다. 1차 1반복구 생체중량 분석결과 뿌리를 포함한 전체 생체중량은 TR#01 (159.9 g)에서 가장 높게 나타났으며, TR#02 (134.9 g)에서 다른 처리구에 비해 낮게 나타났으나 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($p>0.05$). 뿌리를 제외한 상부 생체중량 또한 TR#01 (141.3 g)에서 가장 높은 값을 보였으며 TR#04 (126.0 g), TR#02 (113.5 g)에서 낮은 값을 보였지만 유의한 차이는 나타나지 않는 것으로 분석되었다 ($p>0.05$). 2반복구의 경우 전체 생체중량은 TR#01 (178.4 g)에서 가장 높게 나타났으며 TR#04 (176.9 g), TR#02 (169.8 g), TR#03 (166.6 g)순으로 나타났으며 처리구간 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($p>0.05$). 상부 생체중량 또한 유의한 차이는 나타나지 않았지만 ($p>0.05$), TR#01 (148.2 g)에서 가장 높게 나타났으며 TR#04 (134.9 g) TR#02 (133.4 g), TR#03 (132.8 g) 순으로 생체중량이 나타났다.

2차 1반복구 생체중량 분석결과 전체 생체중량은 처리구별 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다 ($p>0.05$), TR#03 (193.4 g) 처리구에서 가장 높은 값이 나타났고, TR#04 (180.8 g)에서 다른 처리구에 비해 가장 낮은 값이 나타났다. 상부 생체중량은 TR#04 (167.7 g)에서 가장 높은 값, TR#02 (156.3 g)에서 가장 낮은 값을 보였다. 2차 2반복구의 경우도 전체 생체중량은 처리구별 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으며 ($p>0.05$), TR#01 (205.6 g)에서 다른 처리구에 비해 가장 높은 값을 보였으며, 뿌리를 제외한 상부 생체중량의 경우도 TR#01 (168.0 g)에서 가장 높은 값을 보였다.



(a) 1반복구



(b) 2반복구

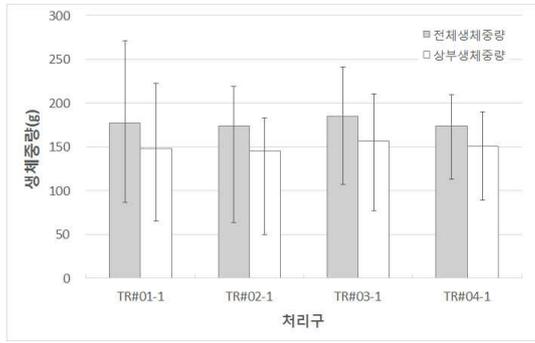
그림 4.6 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생체중량 (1차)

표 4.12 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

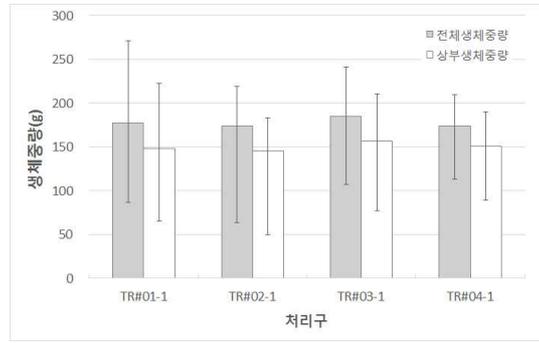
반복구	처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
1	TR#01-1	159.9±43.9a	141.3±35.3a
	TR#02-1	134.9±41.8a	113.5±31.8a
	TR#03-1	158.5±70.1a	133.6±56.0a
	TR#04-1	152.4±42.2a	126.0±39.7a
	F-value	0.509	0.805
	p	0.679	0.499
2	TR#01-2	178.4±33.1a	148.2±24.4a
	TR#02-2	169.8±31.3a	133.4±29.5a
	TR#03-2	166.6±31.1a	132.8±32.5a
	TR#04-2	176.9±35.6a	134.9±28.7a
	F-value	0.295	0.638
	p	0.829	0.596

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)



(a) 1반복구



(b) 2반복구

그림 4.7 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생체중량 (2차)

표 4.13 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

반복구	처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)
1	TR#01-1	187.1±53.9a	157.2±45.1a
	TR#02-1	186.4±19.8a	156.3±17.4a
	TR#03-1	193.4±41.9a	166.1±37.8a
	TR#04-1	180.8±24.8a	167.7±26.4a
	F-value	0.171	0.167
	p	0.915	0.918
2	TR#01-2	205.6±39.8a	168.0±33.0a
	TR#02-2	164.7±77.2ab	128.7±67.3a
	TR#03-2	153.1±46.0b	127.0±39.8a
	TR#04-2	148.1±23.7b	125.6±21.6a
	F-value	2.394	1.971
	p	0.087	0.138

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

(5) 작물성분

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺에 대해 임의로 선정된 5개의 상추개체를 대상으로 수확 후 분석하였다. 생체중량과 동일하게 1차 7월 8일, 2차 9월 22일에 수확하여 조사하였으며, 자료분석은 처리구별 상추개체의 평균값을 구하여 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위해 분산분석을 하여 다음 표에 나타내었다.

1차 처리구별 식물체 성분 Na⁺분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.05), TR#01 (5622.3 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 TR#04에서 7535.2 mg/kg으로 TR#01 대비 1.3배 높은 값으로 분석되었다. 2차 처리구별 또한 식물체 성분 Na⁺분석 결과 처리구별 유의한 차이는 없는 것으로 나타났으며 (p> 0.05), TR#01 (6406.9 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 TR#04에서 7143.9 mg/kg로 나타나 TR#01 대비 1.1배 높은 것으로 분석되었다.

표 4.14 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)			
	TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
15/07/08	5622.3 ±984.4b	5693.7 ±621.9b	6958.2 ±1147.6a	7535.2 ±848.0a
F-value	5.293			
p	0.010			

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=5)

표 4.15 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na ⁺ (mg/kg)			
	TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
15/09/22	6406.9 ±371.5a	6283.6 ±547.3a	6684.7 ±897.8a	7143.9 ±542.1a
F-value	1.894			
p	0.171			

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=5)

(6) 토양환경

처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 작물 재배 전과 후에 각 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다. 1차 토양의 성분을 분석한 결과 작물재배 전 pH는 5.6으로 나타났으며 수확 후 토양의 경우 모든 처리구에서 5.7 수준으로 비슷하게 나타났다. EC는 상추 재배 전 8.43 dS/m으로 나타났으나 수확 후 토양에서는 TR#04가 11.4 dS/m로 가장 낮았으며, TR#03 (13.7 dS/m), TR#01 (13.8 dS/m), TR#02 (18.3 dS/m)순으로 높게 나타났다. T-P는 모든 처리구에서 상추 재배 전보다 수확 후의 값이 낮은 것으로 분석되었다.

2차 수확 후의 토양성분을 분석한 결과, pH가 5.8 수준으로 나타났다. EC의 경우 TR#03에서 8.5 dS/m로 가장 낮은 값을 보였으며, TR#01 (9.7 dS/m), TR#02 (10.8 dS/m), TR#04 (11.2 dS/m) 순으로 EC 값이 높은 것으로 나타났다. T-P는 모든 처리구에서 상추 재배 전보다 수확 후의 값이 낮았으며, 양이온 Na⁺의 경우 TR#04에서 1206.78 mg/kg으로 가장 큰 값이 나타났다.

표 4.16 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 토양 화학적 성분분석 결과 (1차)

구분	재배 전 (바로커)	수확 후 (15/08/18)			
		TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
pH	5.6	5.7	5.6	5.8	5.6
CEC(cmol/kg)	73.20	65.78	67.10	77.71	61.36
T-N(%)	0.596	0.60	0.77	0.64	0.65
T-P(mg/kg)	1,676.04	1,317.75	1,621.00	1,119.45	883.20
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1,521.47	958.96	1,380.52	844.55	498.29
Ca ²⁺ (mg/kg)	4,534.83	6,475.56	6,830.55	6,737.94	6,996.66
Mg ²⁺ (mg/kg)	1,935.54	1,739.61	1,945.71	1,750.41	1,788.36
Na ⁺ (mg/kg)	1,042.14	1,254.90	1,666.51	1,164.33	1,176.33
K ⁺ (mg/kg)	5,478.84	3,465.75	4,717.29	3,548.91	3,111.33
유기물 함량(%)	65.46	62.30	62.30	56.86	58.77
EC(ds/m)	8.43	13.80	18.28	13.73	11.38
SAR	2.308	2.53	3.24	2.31	2.30

표 4.17 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 처리구별 토양 화학적 성분분석 결과 (2차)

구분	재배 전 (바로커)	수확 후 (15/09/22)			
		TR#01	TR#02	TR#03	TR#04
pH	5.6	6.0	5.8	5.9	5.8
CEC(cmol/kg)	73.20	65.83	79.78	75.90	59.59
T-N(%)	0.596	0.71	0.67	0.63	0.69
T-P(mg/kg)	1,676.04	907.93	1,022.57	762.93	891.57
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1,521.47	497.39	668.31	471.04	388.81
Ca ²⁺ (mg/kg)	4,534.83	8,161.89	6,551.91	6,363.93	6,587.28
Mg ²⁺ (mg/kg)	1,935.54	2,163.45	1,696.20	1,584.57	1,899.66
Na ⁺ (mg/kg)	1,042.14	1,107.33	869.55	781.50	1,206.78
K ⁺ (mg/kg)	5,478.84	2,676.24	2,490.48	2,528.16	2,830.80
유기물 함량(%)	65.46	65.39	65.12	66.67	65.39
EC(ds/m)	8.43	9.71	10.79	8.48	11.21
SAR	2.308	1.99	1.75	1.61	2.38

(7) 온습도 환경

먼저, 작물 생육기간동안 유리온실의 온도를 살펴보면, 1차 작물재배기간 (6월 10일~7월 08일)동안 유실온실의 평균온도는 30.3 ℃였으며 최고온도는 39.6 ℃, 최저온도는 21.1 ℃로 조사되었다. 2차 작물재배 기간 (8월 25일~9월 22일)동안 유리온실 평균온도는 29.8 ℃로 1차 재배기간의 평균온도보다 약 0.5 ℃ 낮았으며, 최고온도는 35.0 ℃, 최저온도는 22.4 ℃로 조사되었다.

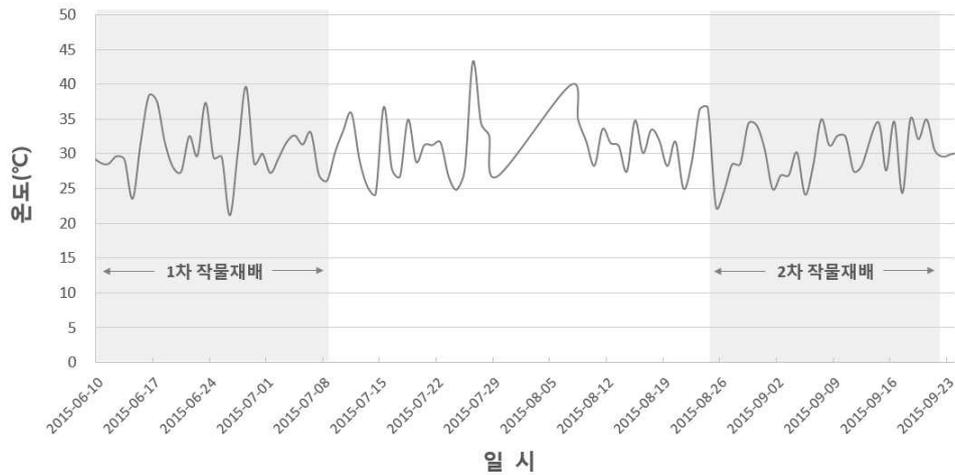


그림 4.8 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 작물생육기간 유리온실 내부 온도

습도의 경우 1차 재배기간 (6월 10일~7월 08일) 동안 온실의 평균습도는 40.1 %였으며, 2차 재배기간 (8월 25일~9월 22일) 동안에는 46.1 %, 최고습도는 86.0 %, 최저습도는 25.0 %로 조사되었다. 작물 생육기간동안 유리온실의 습도를 날짜별로 도시화하면 아래 그림과 같다.

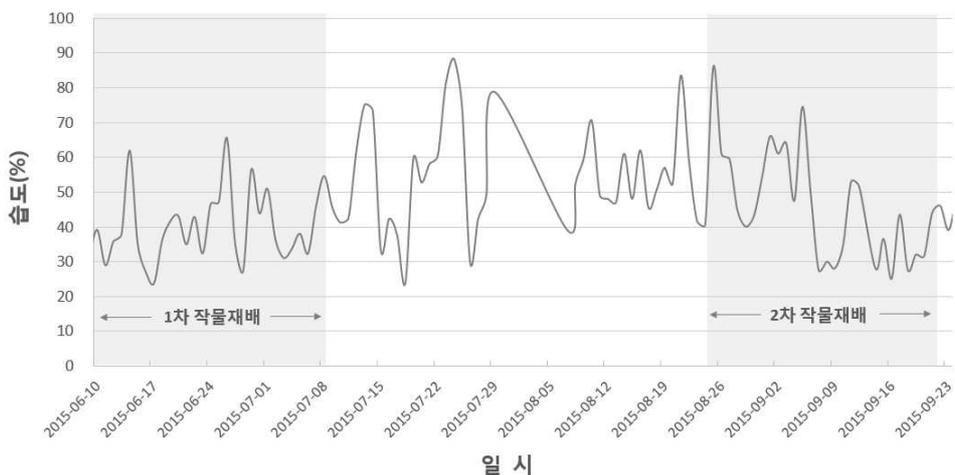


그림 4.9 취수용수의 염도수준별 작물생육실험(상추)의 작물생육기간 유리온실 내부 습도

2. 생육저해 염도를 고려한 작물생육 실험

가. 실험설계

기수담수화 시스템의 현장적용을 위한 생육저해 염도를 고려한 작물생육 실험을 위해 서울대학교 평창캠퍼스의 온실시설(면적 259.2m²)을 임대하여 본 실험을 수행하였다. 본 실험의 대상작물은 1) 시설재배지에서 재배되는 작물이며, 2) 내염성 (salt tolerance)이 보통인 작물과 내염성이 낮은 작물을 대상으로 하며, 3) 재배가 용이하고, 4) 당도 검사가 가능한 작물을 대상으로 선정된 결과, 딸기 (*Fragaria spp.*)와 20일무 (*Raphanus sativus L.*)가 선정되었다. 각 작물마다 4처리구, 30개 작물을 파종·재배하며, 대상작물인 딸기는 (주)갑조네 모종시장에서 판매하는 설향 품종의 딸기 모종을 정식하고, 20일무는 (주)다농의 다농 20일 적환무를 파종하였다. 20일무 (10cm 내외)와 딸기(30cm 내외)의 간격을 참고해 35 cm의 간격으로 파종 및 정식하였으며, 상토의 경우 실제 재배작물별 재배농가에서 사용하는 토양을 조사하여 딸기는 피트모스 딸기상토(10~30mm 입자), 20일무는 원예용 피트모스 상토(0~25mm 입자)를 이용하여 고랑당 400 L를 채워 재배하였다.

관개용수 공급은 일부 점적호수 막힘 현상으로 인해 관개량이 일정하지 못했던 점을 고려하여 점적관개시스템을 이용하지 않고, 각 작물별로 500 ml 비커를 사용하여 관개를 실시하였으며, 각각의 관개량을 기록하였다. 관개용수의 염도수준은 EC측정기 (HI-98192)를 사용하여 매주 EC를 측정하여 각 처리구별로 설정한 관개용수의 염도가 유지될 수 있도록 하였다. 또한, 관개용수는 모두 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)에서 수질오염공정시험기준 (환경부, 2014)을 준용하여 pH, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, SS, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻N, Fe 등 16개 항목을 대상으로 분석하였다. 토양은 각 처리구별로 파종일과 수확일 총 2회에 걸쳐 pH, EC, CEC, T-N, T-P, P₂O₅, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, 유기물함량 등 11개 항목을 대상으로 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)에서 ASA (american society if agronomy)와 SSSA (soil science society of america) 토양분석방법 (Chapman과 Pratt, 1961)에 준용하여 분석하였다.

작물생육조사는 매주 딸기는 초장과 엽수 및 엽장, 엽병장에 대해 조사하고, 20일무는 엽수와 엽장에 대한 생육조사를 실시하였다. 딸기의 경우 수시로 딸기가 열릴 때마다 딸기를 따서 당도 및 중량을 조사하였으며, 최종 수확 시에는 딸기의 경우 전체중량과 뿌리를 제외한 상부 생체중량, 20일 무의 경우 전체 생체중량과 상부 생체중량, 근중, 근경, 근장에 대해 조사 및 분석을 실시하였다. 또한, 수확한 딸기와 20일무를 대상으로 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)에서 토양 및 식물체 분석법(농업과학기술원, 2010)을 준용하여 Na⁺을 분석하였다.

나. 생육저해 염도를 고려한 염도설정

생육저해 염도를 고려한 작물생육 실험을 위해 표 4.1 관개용수 염도에 따른 작물생육 연구결과 (Ayers와 Westcot, 1985)와 우리나라 간척지의 염도 및 제염단계별 재배가능작물 연구결과(농어촌연구원, 2006; 한국농업경영포럼, 2013)를 바탕으로 각 처리수의 염도수준을 고려하였다. 우리나라 간척지는 전반적으로 배수가 불량하며 염분농도가 높고, 동일 간척지 내에서도 위치에 따라 다르게 나타나고 편차가 커 염분농도를 기준으로 재배가능작물을 검

토하는 연구들이 진행되었다. 본 실험은 실제 간척지의 지하수를 취수하여 밭작물을 재배하는 경우의 살펴보기 위해 1) 실제 간척지 및 해당 작물의 0% 수확량에 해당하는 염도를 적용하여 관개하는 경우, 2) 1번의 관개수를 기수담수화 PILOT PLANT를 통해 처리하여 관개하는 경우, 3) 해당 작물의 100 % 수확량 임계기준을 적용하여 관개하는 경우 4) 해당 작물의 50 % 수확량 임계기준을 적용하여 관개하는 경우로 염도를 설정하고자 하였다.

기존 연구결과를 모두 고려하였을 때, 딸기의 0% 수확량 임계기준 2.7 dS/m보다는 크고, 20일무의 0% 수확량 임계기준 5.9 dS/m (Ayers와 Westcot, 1985)에는 다소 미치지 못하나 시설재배가 가능한 시금치 재배가 가능한 최고 염분농도인 최고 4 dS/m (농어촌연구원, 2006)를 PILOT PLANT의 유입조(TR#04)에 적용하고, 기수담수화 PILOT PLANT를 가동하여 나온 처리수를 TR#01, 딸기의 100% 수확량 임계기준인 0.7 dS/m는 B-TR#02, 20일무의 100% 수확량 임계기준인 0.8 dS/m를 R-TR#02, 딸기의 50% 수확량 임계기준인 1.7 dS/m는 B-TR#03, 20일무의 50% 수확량 임계기준인 3.4 dS/m는 R-TR#02를 적용하였다.

표 4.18 간척지구별 토양정밀조사 결과 (한국농업경영포럼, 2013)

간척지구	지하수위 (cm)	지하수 염도 (dS/m)	토양배수	기타사항
석문지구	10~100	4.3~51.2	불량	- 대부분 담으로 이용 - 일부 필지에 대해 조사료 재배 중
군내지구	10~110	1.8~41.3	불량	- 대부분 담으로 이용 - 일부 면적에 사료작물 재배 중
보전지구	10~110	1.0~49.6	불량	- 대부분 담으로 이용 - 일부 면적에 사료작물 재배 중
시화지구(2공구)	0~110	1.0~60.9	약간불량~불량	- 대부분 담으로 이용 - 일부 구간에 사료작물 재배 중
삼산지구	0~110	1.0~48.3	약간불량~불량	- 대부분 담으로 이용 - 일부 구간에 사료작물 재배 중
고흥지구	0~110	1.0~46.3	불량	- 대부분 담으로 이용 - 일부 지구에 사료작물 재배 중

표 4.19 제염단계별 재배 가능작물 및 작부체계검토(농어촌연구원, 2006)

단계	염분농도	시기별											
		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1단계	8dS/m이상 (5년이내)	이탈리안라이그라스, 톨휘트그라스, 버뮤다그라스(사료작물), 갈대, 나문재, 해홍나물, 칠명초, 통통마디(염생식물)											
2단계	8-4dS/m (5~10년경과)	보리, 밀, 호밀, 유채, 자운영				벼, 세스바니아, 사탕수수, 해바라기, 솔트그라스				보리, 밀, 호밀, 유채, 자운영			
3단계	4-2dS/m (10~20년경과)	시금치				옥수수, 콩, 땅콩, 케일, 아스파라거스, 근대, 토마토, 오이, 참외				시금치			
4단계	2dS/m이하 (30년경과)	마늘, 양파				감자, 고구마, 피망, 배추, 무, 당근, 상추, 호박, 가지, 머스크메론, 샐러리, 완두, 양배추				마늘, 양파			
		백합, 국화, 카네이션, 배고니아, 장미, 수국, 거베라, 프리지아, 포인티아, 에리카, 안스리움, 프리플라, 메밀											

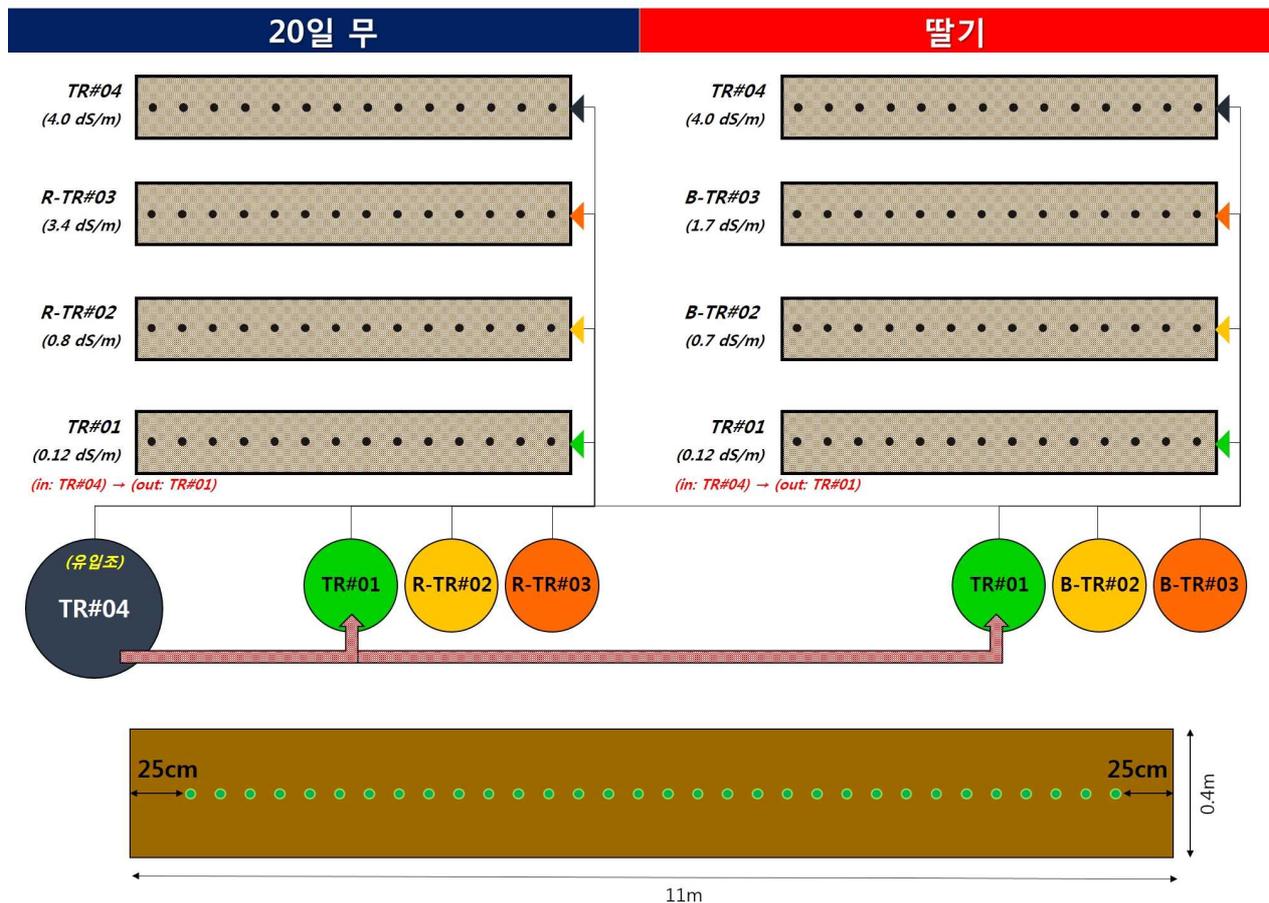


그림 4.10 취수용수의 염도수준별 작물생육실험 설계

다. 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험

(1) 관개량

딸기 (*Fragaria spp.*) 작물재배는 32주 동안 4개의 처리구, 각 처리구당 30개 딸기가 재배되었다. 재배기간 동안 필요시마다 관개가 이루어졌으며, 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 45회, 총 관개용수 공급량은 2,616 L로 측정되었다. 대부분 일주일에 1회 60 L(한 고랑당 15 L, 한 작물당 0.5L) 관개가 이루어졌으며, 세부 내용은 아래 표와 같다.

표 4.20 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 관개량

일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
16/10/15	06:00	60	17/02/19	09:00	60
16/10/18	09:00	60	17/02/24	09:00	60
16/10/22	10:00	60	17/03/01	09:00	60
16/10/26	09:00	24	17/03/05	09:00	60
16/10/28	09:00	60	17/03/09	09:00	60
16/11/02	09:00	60	17/03/13	09:00	60
16/11/08	09:00	60	17/03/18	09:00	60
16/11/12	09:00	36	17/03/22	09:00	60
16/11/14	09:00	60	17/03/26	09:00	60
16/11/21	09:00	60	17/04/01	09:00	60
16/11/26	09:00	60	17/04/05	09:00	60
16/12/02	09:00	60	17/04/10	09:00	60
16/12/07	09:00	60	17/04/15	09:00	60
16/12/15	09:00	36	17/04/20	09:00	60
16/12/18	09:00	60	17/04/24	09:00	60
16/12/25	09:00	60	17/04/28	09:00	60
17/01/01	09:00	60	17/05/01	09:00	60
17/01/08	09:00	60	17/05/05	09:00	60
17/01/15	09:00	60	17/05/09	09:00	60
17/01/19	09:00	60	17/05/12	09:00	60
17/01/29	09:00	60	17/05/15	09:00	60
17/02/05	09:00	60	17/05/20	09:00	60
17/02/12	09:00	60			
총계	2,616				

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

딸기의 생육기간 동안 처리구별로 염도를 매주 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 관개용수 B-TR#01은 기수담수화 시스템 가동 후 염도가 처리된 처리수, B-TR#02는 100% 수확량 임계수준, B-TR#03은 50% 수확량 임계수준, B-TR#04는 기수담수화 시스템 가동 전 염도가 높은 원수로 현장의 지하수 염도수준(시설재배가 가능한 시금치 재배가 가능한 최고 염분농도)인 4.0 dS/m로 설정하였다. 이에, B-TR#04는 4.0 dS/m, B-TR#03은 딸기의 50% 수확량 임계수준인 1.7 dS/m, B-TR#02는 딸기의 100% 수확량 임계수준인 0.7 dS/m가 되도록 염도수준을 유지시켜 주었으며, 기수담수화 시스템을 가동하여 염도가 처리된 B-TR#01의 염도수준은 0.12 dS/m 로 나타났다.

표 4.21 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 관개용수 염도 모니터링

일자	EC _w				일자	EC _w				
	B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04		B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04	
16/10/15	0.130	0.687	1.691	4.121	17/01/30	0.080	0.702	1.705	3.999	
16/10/17	0.132	0.687	1.695	4.028	17/02/06	0.080	0.701	1.705	3.998	
16/10/24	0.135	0.687	1.696	4.020	17/02/13	0.080	0.701	1.704	3.998	
16/10/31	0.134	0.687	1.697	4.021	17/02/20	0.080	0.701	1.704	3.998	
16/11/07	0.132	0.687	1.697	4.022	17/02/27	0.080	0.701	1.703	3.998	
16/11/14	0.131	0.687	1.695	4.021	17/03/06	0.080	0.701	1.703	3.998	
16/11/21	0.131	0.686	1.693	4.021	17/03/13	0.080	0.701	1.702	3.998	
16/11/28	0.130	0.686	1.692	4.021	17/03/20	0.080	0.700	1.702	3.998	
16/12/07	0.121	0.686	1.692	4.020	17/03/27	0.081	0.701	1.706	4.000	
16/12/12	0.121	0.686	1.691	4.020	17/04/03	0.081	0.701	1.707	4.000	
16/12/19	0.120	0.686	1.692	4.020	17/04/10	0.081	0.701	1.706	4.000	
16/12/26	0.120	0.686	1.685	4.016	17/04/17	0.081	0.700	1.707	4.001	
17/01/02	0.120	0.685	1.686	4.016	17/04/24	0.081	0.701	1.704	4.001	
17/01/09	0.120	0.685	1.686	4.015	17/05/01	0.081	0.700	1.705	4.002	
17/01/12	0.087	0.702	1.709	3.998	17/05/08	0.081	0.701	1.705	4.000	
17/01/16	0.081	0.702	1.705	3.999	17/05/15	0.081	0.701	1.705	4.000	
17/01/23	0.081	0.702	1.705	3.999	17/05/22	0.081	0.701	1.705	4.000	
평균	0.100 (TR#01)				0.695 (TR#02)		1.700 (TR#03)		4.011 (TR#04)	

처리구별 관개용수 수질을 평가하기 위하여 생육기간 중 3회(파종기, 생육기, 수확기) 샘플링하여 pH, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-N 등 16항목에 대하여 분석하였다. 관개용수 수질 분석결과 모든 처리구에서 pH는 5.9-8.0으로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5-8.5를 만족하는 것으로 나타났다. 영양염류 T-N의 경우 B-TR#01을 제외한 B-TR#02~B-TR#04 처리구에서 평균 3.82-3.94 mg/L 수준으로 나타났으며, T-P의 경우는 B-TR#01은 평균 0.03 mg/L, 나머지 처리구는 모두 평균 0.01 mg/L 수준의 값이 나타났다. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 의 경우 모두 B-TR#01에서 B-TR#04 처리구로 갈수록 높게 나타났으며, 특히 Na^+ 의 경우 B-TR#01에서 평균 10.79 mg/L, B-TR#02은 평균 121.92 mg/L, B-TR#03은 평균 312.93 mg/L, B-TR#04는 평균 835.92 mg/L로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na^+ 값이 높게 나타났다. SO_4^{2-} 의 경우 B-TR#01은 검출한계 미만이었으며, 나머지 처리구에서는 평균 11.0-11.3 mg/L, NO_3^-N 의 경우 B-TR#01에서 0.53 mg/L이고 나머지 처리구에서는 평균 3.3-3.4 mg/L으로 분석되었다. 나트륨 흡착률 (SAR, Sodium adsorption ratio)을 산정한 결과 평균 B-TR#01에서 0.41, B-TR#02는 3.78, B-TR#03은 9.68, B-TR#04는 26.73으로 염도수준에 따라 값이 높게 조사되었다.

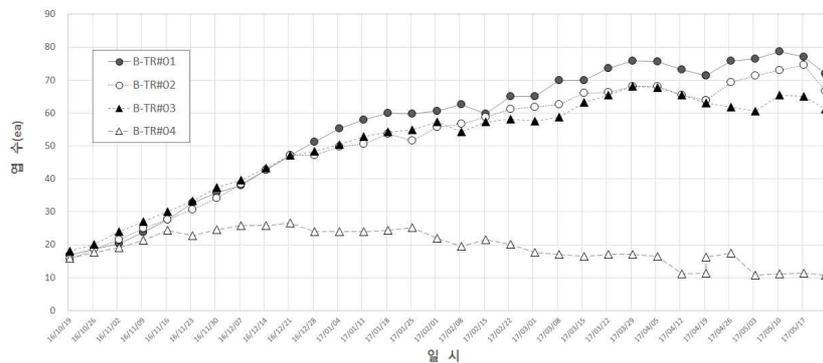
표 4.22 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 관개용수 수질 모니터링 결과

처리구	일자	pH	EC	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	Fe	SAR
			dS/m	mg/L														
B-TR#01	16/10/15	6.2	0.13	7.5	ND	0.6	0.51	0.057	3.0	ND	ND	16.54	0.04	32.6	ND	0.4	0.020	-
	17/01/12	5.9	0.11	10.6	1.2	0.4	0.95	0.003	ND	ND	0.02	13.47	0.05	24.5	ND	0.5	0.029	-
	17/05/02	6.8	0.03	9.1	0.9	0.7	0.93	ND	1.0	1.04	0.13	2.37	0.19	2.3	ND	0.7	ND	0.41
B-TR#02	16/10/15	8.0	0.83	7.0	0.1	0.9	3.72	ND	3.0	33.30	5.78	94.62	3.21	142.6	12.5	3.3	ND	2.81
	17/01/12	7.6	0.98	11.3	1.7	0.5	4.50	0.010	ND	29.79	5.30	144.71	2.94	236.5	11.7	3.6	0.019	4.54
	17/05/02	7.9	1.07	9.7	1.0	1.3	3.59	0.003	1.0	29.94	5.01	126.44	2.71	199.8	9.6	3.1	0.008	3.98
B-TR#03	16/10/15	8.0	2.02	6.8	0.3	0.8	3.78	ND	2.0	33.14	5.61	269.63	4.01	464.4	12.5	3.3	ND	8.06
	17/01/12	7.6	2.13	11.0	1.8	1.7	4.11	0.007	1.0	29.66	5.12	358.18	3.60	678.1	11.6	3.6	ND	11.29
	17/05/02	7.9	2.37	9.2	1.1	1.8	3.57	0.007	ND	30.75	5.00	310.99	3.30	497.9	9.8	3.3	0.008	9.69
B-TR#04	16/10/15	7.9	5.06	6.8	0.3	2.4	3.92	ND	2.0	31.69	5.26	806.71	4.93	1372.1	12.6	3.3	ND	24.70
	17/01/12	7.5	5.53	10.9	2.0	5.6	4.20	0.009	ND	26.97	4.62	829.95	4.25	1793.7	11.0	3.5	ND	27.46
	17/05/02	8.0	5.61	9.5	1.1	0.4	3.69	0.007	1.0	28.97	4.58	871.11	4.16	1326.4	9.4	3.1	0.008	28.04

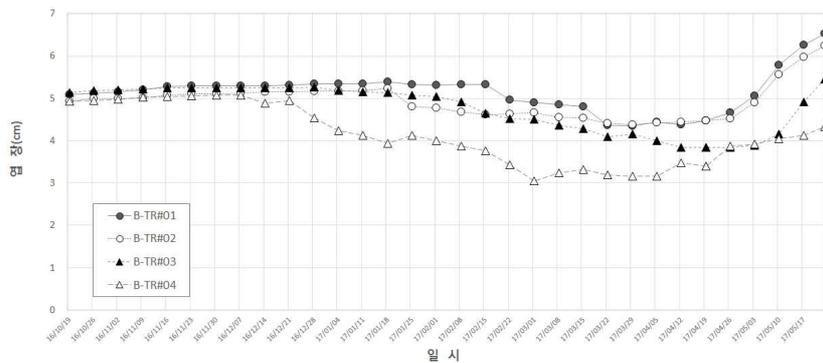
(3) 작물생육

딸기의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 각 처리구당 10개의 대표 개체에 대해 매주 초장, 엽수에 대해 생육모니터링을 실시하였다. 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 22.0를 사용하여 분산분석 (ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 던컨의 다중범위검정(Duncan's Multiple Range Test)을 사용하였다.

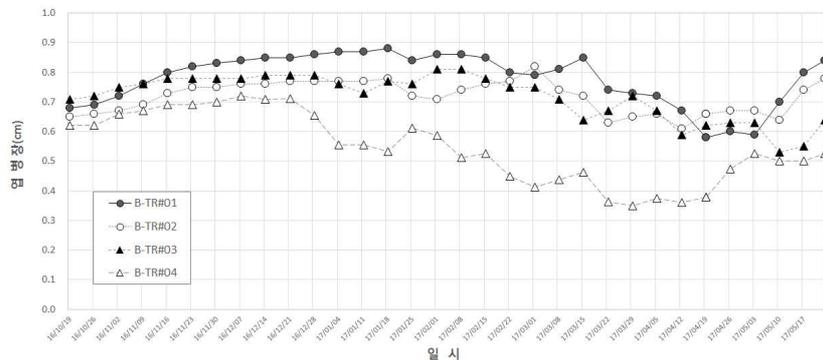
분석결과, 엽병장을 제외한 엽수와 엽장은 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 엽도 수준이 높을수록 엽수가 적고 엽장은 모두 짧은 것으로 나타났는데, 엽수는 B-TR#01 (72.0 ea)에서 가장 많이 나타났고 B-TR#02 (66.6 ea), B-TR#03 (61.2 ea), B-TR#04 (27.0 ea) 순으로 나타났다. 엽장은 B-TR#01 (6.5 cm)에서 가장 높게 나타났고 B-TR#02 (6.2 cm), B-TR#03 (5.5 cm), B-TR#04 (4.3 cm) 순으로 나타났다. 반면, 엽병장은 B-TR#01과 B-TR#02 (0.8 cm), B-TR#03 (0.6 cm), B-TR#04 (0.5 cm) 순으로 나타났다.



(a) 엽수



(b) 엽장



(c) 엽병장

그림 4.11 생육저해 엽도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 생육변화

표 4.23 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 생육변화

일시	B-TR#01			B-TR#02			B-TR#03			B-TR#04		
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽병장 (cm)									
16/10/19	16.8	5.1	0.7	15.6	4.9	0.7	18.0	5.1	0.7	15.9	4.9	0.6
16/10/26	18.6	5.1	0.7	18.6	5.0	0.7	20.1	5.2	0.7	17.7	5.0	0.6
16/11/02	20.4	5.2	0.7	21.6	5.0	0.7	24.0	5.2	0.8	19.2	5.0	0.7
16/11/09	23.7	5.2	0.8	24.9	5.0	0.7	27.0	5.2	0.8	21.3	5.0	0.7
16/11/16	27.6	5.3	0.8	27.6	5.1	0.7	30.0	5.3	0.8	24.3	5.1	0.7
16/11/23	32.7	5.3	0.8	30.6	5.1	0.8	33.3	5.3	0.8	22.8	5.1	0.7
16/11/30	35.7	5.3	0.8	34.2	5.1	0.8	37.5	5.3	0.8	24.6	5.1	0.7
16/12/07	38.1	5.3	0.8	38.4	5.1	0.8	39.6	5.3	0.8	25.8	5.1	0.7
16/12/14	42.6	5.3	0.9	42.6	5.2	0.8	43.2	5.3	0.8	25.8	4.9	0.7
16/12/21	47.1	5.3	0.9	47.1	5.2	0.8	47.1	5.3	0.8	26.7	4.9	0.7
16/12/28	51.3	5.3	0.9	47.1	5.2	0.8	48.3	5.3	0.8	24.0	4.5	0.7
17/01/04	55.2	5.3	0.9	49.8	5.2	0.8	50.4	5.2	0.8	24.0	4.2	0.6
17/01/11	57.9	5.3	0.9	50.7	5.2	0.8	52.8	5.2	0.7	24.0	4.1	0.6
17/01/18	60.0	5.4	0.9	53.7	5.2	0.8	54.3	5.1	0.8	24.3	3.9	0.5
17/01/25	59.7	5.3	0.8	51.6	4.8	0.7	54.9	5.1	0.8	25.1	4.1	0.6
17/02/01	60.6	5.3	0.9	55.8	4.8	0.7	57.3	5.1	0.8	21.9	4.0	0.6
17/02/08	62.7	5.3	0.9	56.7	4.7	0.7	54.3	4.9	0.8	19.5	3.9	0.5
17/02/15	59.7	5.3	0.9	58.8	4.6	0.8	57.3	4.7	0.8	21.6	3.8	0.5
17/02/22	65.1	5.0	0.8	61.2	4.6	0.8	58.2	4.5	0.8	20.1	3.4	0.5
17/03/01	65.1	4.9	0.8	61.8	4.7	0.8	57.6	4.5	0.8	17.7	3.1	0.4
17/03/08	69.9	4.9	0.8	62.7	4.6	0.7	58.8	4.4	0.7	17.1	3.2	0.4
17/03/15	69.9	4.8	0.9	66.0	4.5	0.7	63.3	4.3	0.6	16.5	3.3	0.5
17/03/22	73.5	4.4	0.7	66.3	4.4	0.6	65.4	4.1	0.7	17.1	3.2	0.4
17/03/29	75.9	4.4	0.7	68.1	4.4	0.7	68.1	4.2	0.7	17.1	3.2	0.4
17/04/05	75.6	4.5	0.7	68.1	4.4	0.7	67.8	4.0	0.7	16.5	3.2	0.4
17/04/12	73.2	4.4	0.7	65.4	4.5	0.6	65.4	3.8	0.6	11.1	3.5	0.4
17/04/19	71.4	4.5	0.6	63.9	4.5	0.7	63.0	3.9	0.6	11.4	3.4	0.4
17/04/19	71.4	4.5	0.6	63.9	4.5	0.7	63.0	3.9	0.6	16.3	3.4	0.4
17/04/26	75.9	4.7	0.6	69.3	4.5	0.7	61.8	3.8	0.6	17.5	3.9	0.5
17/05/03	76.5	5.1	0.6	71.4	4.9	0.7	60.6	3.9	0.6	10.8	3.9	0.5
17/05/10	78.6	5.8	0.7	72.9	5.6	0.6	65.4	4.2	0.5	11.1	4.1	0.5
17/05/17	77.1	6.3	0.8	74.7	6.0	0.7	65.1	4.9	0.6	11.4	4.1	0.5
17/05/23	72.0	6.5	0.8	66.6	6.2	0.8	61.2	5.5	0.6	10.8	4.3	0.5
평균	56.4	5.1	0.8	52.4	4.9	0.7	51.3	4.8	0.7	19.1	4.1	0.6

표 4.24 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)	엽병장(cm)
B-TR#01	72.0±18.5a	6.5±1.0a	0.8±0.3a
B-TR#02	66.6±19.5a	6.2±0.7ab	0.8±0.2a
B-TR#03	61.2±20.7a	5.5±0.6b	0.6±0.2ab
B-TR#04	27.0±10.7b	4.3±1.1c	0.5±0.1b
F-value	5.722	8.271	2.577
p	0.003	0.000	0.072

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

(4) 딸기 상품등급

본 실험에서는 각 처리구별 10개 대표 작물에서 수확한 딸기의 무게, 당도에 대해 조사하여, 농산물표준규격에 의해 딸기의 상품등급을 구분하여 비교해보고자 하였다.

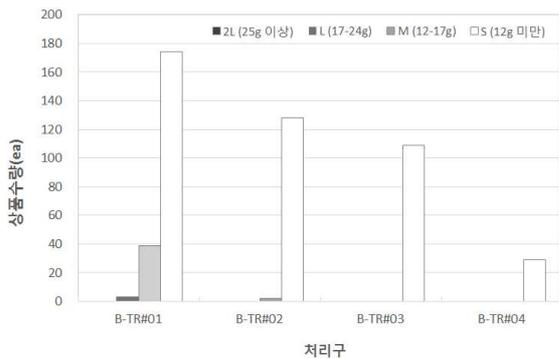
표 4.25 딸기(설향 품종)의 상품등급 구분 (농산물표준규격, 국립농산물품질관리원)

구분	호칭	크기	당도
특		L 또는 2L	11 Brix 이상
상		M ~ 2L	9 Brix 이상
보통		특, 상에 미달하는 것	

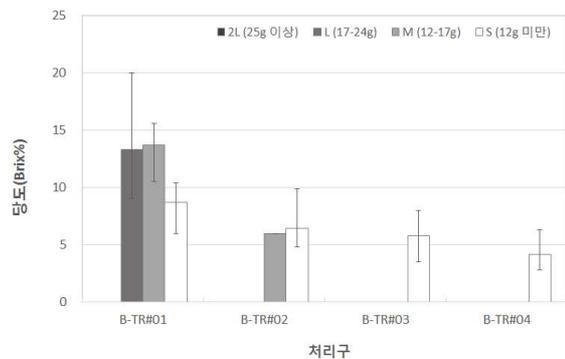
* 딸기 4단계 크기구분(1개 무게(g)): 2L (25g 이상), L (17이상-25미만), M (12이상-17미만), S (12 미만)

** 농산물표준규격: 「농수산물품질관리법」 제5조 및 같은 법 시행규칙 제6조의 규정

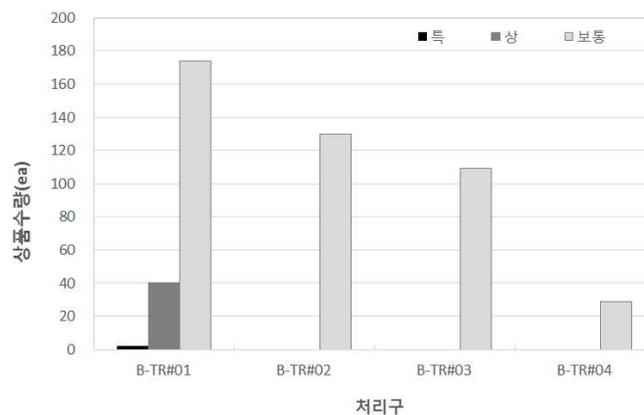
설향 품종의 농산물표준규격에 의거하여 크기와 당도를 구분하여 상품등급을 구분한 결과는 다음과 같다. 크기 L에 해당되는 딸기는 B-TR#01 (3 ea), M은 B-TR#01 (39 ea), B-TR#02 (2 ea), S는 B-TR#01 (174 ea), B-TR#02 (128 ea), B-TR#03 (109 ea), B-TR#04 (29 ea) 수확하였다. L에 해당되는 딸기 중 1개는 당도가 9 Brix로 상 등급, 나머지 2개는 11 Brix와 20 Brix로 특 등급에 해당되었다. M에 해당되는 딸기는 모두 상 등급, S에 해당되는 딸기는 모두 보통 등급에 해당되었다.



(a) 상품크기별 수확량



(b) 상품크기별 당도



(c) 상품등급

그림 4.12 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 딸기 상품등급 구분

각 처리구별 딸기 당도의 평균값을 바탕으로 처리구별 평균 당도의 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위해 분산분석을 실시하였다. 염도수준이 작은 B-TR#01에서 염도수준이 높은 B-TR#04로 갈수록 당도가 떨어지는 것으로 나타났으며, 이는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).

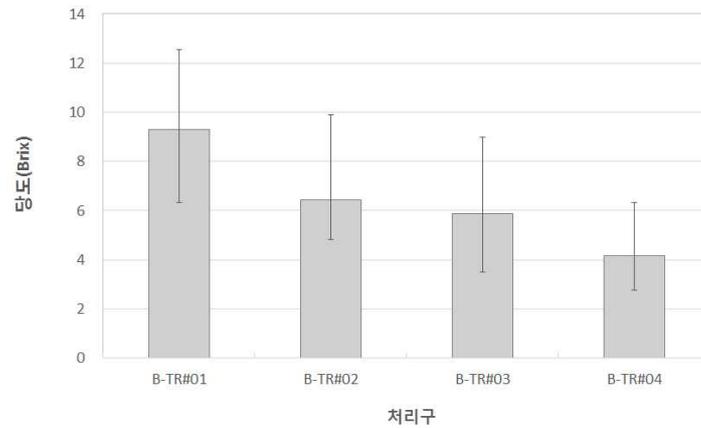


그림 4.13 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 딸기 당도

표 4.26 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 평균 당도 분석결과

구분	B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04
평균 당도 (Brix)	10.5±3.7a	6.5±1.6b	5.9±1.7b	4.2±1.2b
F-value	12.794			
p	0.000			

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=44)

(5) 생체중량

딸기의 생체중량 및 총길이는 각 처리구별 10개 대표 작물을 수확하여 조사하였다. 자료 분석은 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구간 생체중량 평균차가 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다. 염도수준이 작은 B-TR#01에서 염도 수준이 높은 B-TR#04로 갈수록 생체중량이 감소하고 총 길이도 짧아지는 경향이 나타났으며, 이는 모두 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).

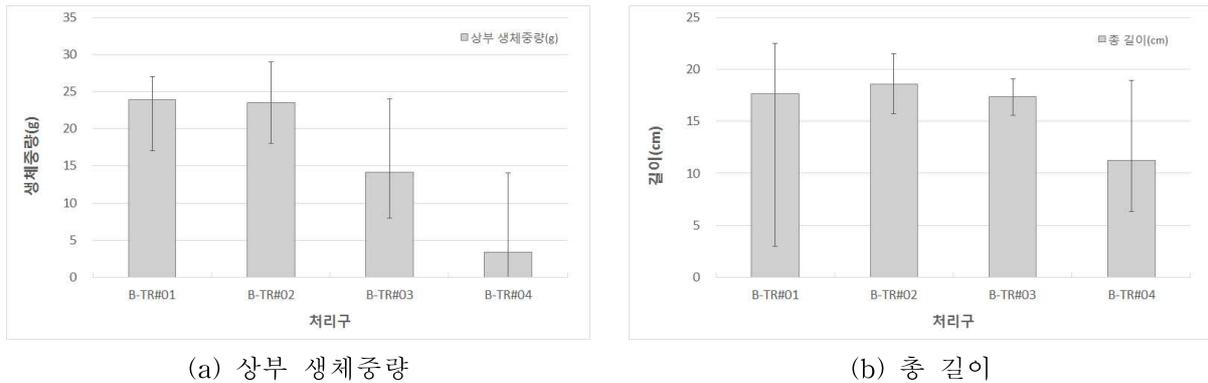


그림 4.14 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 생체중량

표 4.27 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 생체중량 분산분석 및 사후검정 결과

처리구	상부 생체중량(g)	총 길이(cm)
B-TR#01	23.9±2.9a	17.7±5.9a
B-TR#02	23.5±3.7a	18.5±2.2a
B-TR#03	14.1±4.7b	17.4±1.3a
B-TR#04	3.4±4.4c	11.3±3.7b
F-value	58.435	8.020
p	0.000	0.000

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level
 **Mean±deviation(n=10)

(6) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na⁺을 분석하였다. 생체중량과 동일하게 각 처리구별 10개 대표작물을 수확하여 조사하였으며 각 처리구별 평균값 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 처리구별 식물체 Na⁺ 성분분석 결과 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 (p<0.05), B-TR#01 (215.7 mg/kg) 대비 처리구의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na⁺ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났으며 최고 염도수준인 B-TR#04에서 B-TR#01 대비 약 76배에 해당하는 16,447 mg/kg으로 나타났다.

표 4.28 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 식물체 성분 분석결과

구분	Na ⁺ (mg/kg)			
	B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04
17/05/25	215.7±56.5a	1340.8±148.7ab	4955.7±1146.4b	16447.0±7771.2c
F-value	35.665			
p	0.000			

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

(7) 토양환경 조사 분석

딸기의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 파종전과 수확 후에 각 처리구의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 그리고 치환성 양이온 등 11항목을 분석하였다. 먼저, 파종 시에 모든 처리구별로 동일한 토양을 사용하였으며, 각 처리구별 토양의 화학적 성분을 분석한 결과는 다음 표와 같다. 기수담수화 시스템을 가동하여 처리수를 관개한 B-TR#01의 경우 파종시의 토양보다 모든 항목이 낮게 분석되었으며, 특히 양이온들이 크게 감소하였는데, 이 중 Na⁺의 경우 230.14 mg/kg에서 99.65 mg/kg으로 감소된 것으로 나타났다.

수확 후의 토양분석 결과 pH의 경우 모든 처리구에서 5.0 ~ 6.4 수준으로 비슷하게 나타났으며, EC의 경우 관개용수의 처리구의 염도가 높아질수록 전반적으로 값이 높게 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 염도가 높을수록 토양축적이 일어나 B-TR#01 (99.65 mg/kg)에 비해 B-TR#04 (2347.30 mg/kg)가 23.5배 가량 증가하였으며 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

표 4.29 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 처리구별 토양 화학적 성분분석 결과

구분	파종 전	수확 후			
		B-TR#01	B-TR#02	B-TR#03	B-TR#04
pH	5.0	5.0	5.6	5.9	6.4
CEC(cmol/kg)	100.21	12.82	14.79	9.77	10.61
T-N(%)	1.06	0.89	0.57	0.68	0.63
T-P(mg/kg)	1,698.67	1,467.83	1,523.40	1,589.13	1,716.83
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1,807.70	180.69	96.97	75.47	128.78
Ca ²⁺ (mg/kg)	13,097.60	2,101.90	1,612.30	1,519.53	1,450.43
Mg ²⁺ (mg/kg)	1,101.32	127.37	93.23	73.01	83.84
Na ⁺ (mg/kg)	230.14	99.65	348.30	718.40	2,347.30
K ⁺ (mg/kg)	2,702.80	178.60	114.79	91.15	75.87
유기물함량(%)	90.01	61.12	52.39	54.41	54.41
EC(dS/m)	23.96	15.60	12.00	16.96	46.24
SAR	0.37	0.40	1.61	3.45	11.45

(8) 생육환경 조사 분석

(가) 온도

딸기의 작물생육기간 동안 유리온실의 온도를 날짜별로 도시화하면 아래 그림과 같으며, 작물재배기간 (10월 15일~5월 25일)동안 유실온실의 평균온도는 21.8 °C였으며 최고온도는 45.7 °C, 최저온도는 10.6 °C로 조사되었다.

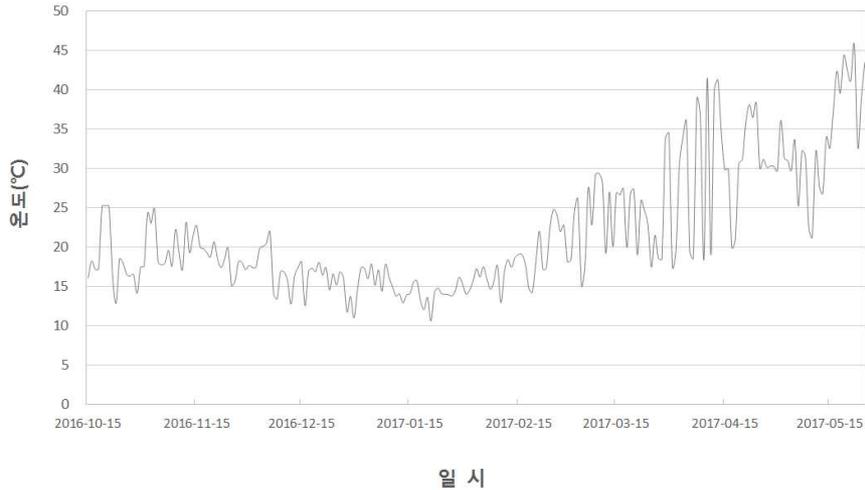


그림 415 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 작물생육기간 온실 내부 온도

(나) 습도

작물 생육기간동안 유리온실의 습도를 날짜별로 도시화하면 아래 그림과 같으며, 작물재배기간 (10월 15일~5월 25일)동안 유리온실의 평균습도는 33.8 %였으며 최고습도는 80.0 %, 최저습도는 18.5 %로 조사되었다.

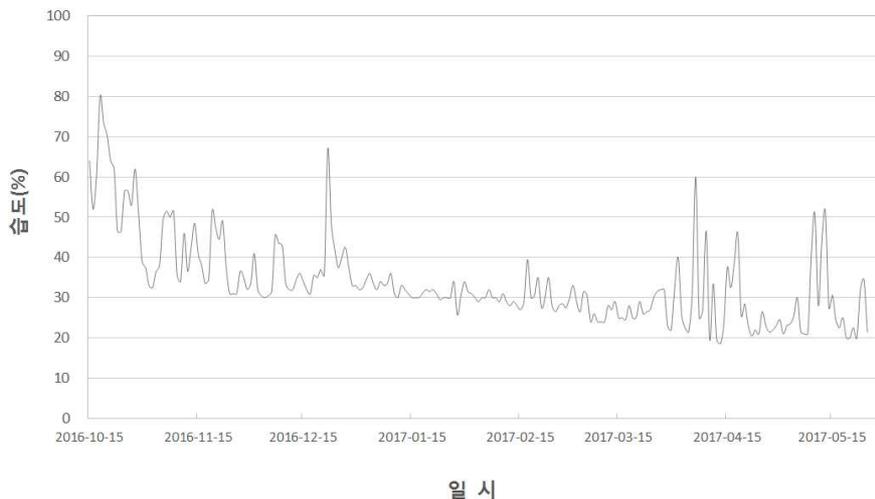


그림 416 생육저해 염도를 고려한 딸기 생육실험의 작물생육기간 온실 내부 습도

라. 생육저해 염도를 고려한 20일 무 생육실험

(1) 관개량

20일무 (*Raphanus sativus L.*) 작물재배는 총 15주 동안 4개의 처리구, 각 처리구당 30개 20일무를 재배하였으며, 2회 걸쳐 진행되었다. 1차 재배기간 동안 처리구별 관개용수 공급 횟수는 총 12회, 총 관개용수 공급량은 428 L로 측정되었으며, 2차 재배기간에는 총 7회, 456 L의 관개용수를 공급하였다. 짧게는 4일, 길게는 10일에 1회 관개하였으며, 보통 36 L (한 고랑당 9.0 L, 한 작물당 0.3L) 관개가 이루어졌다.

표 4.30 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 관개량

1차 재배			2차 재배		
일자	일시(hr)	관개량(L)	일자	일시(hr)	관개량(L)
16/10/15	06:00	60	16/12/07	09:00	240
16/10/20	08:40	12	16/12/17	09:00	36
16/10/22	10:00	8	16/12/26	09:00	36
16/10/24	09:00	12	17/01/01	09:00	36
16/10/30	09:00	36	17/01/06	09:00	36
16/11/02	09:00	60	17/01/10	09:00	36
16/11/09	09:00	36	17/01/19	09:00	36
16/11/15	09:00	36			
16/11/19	09:00	60			
16/11/23	09:00	36			
16/11/26	09:00	36			
16/11/29	09:00	36			
총계		428 L	총계		456 L

(2) 관개용수 염도 및 수질수준

20일무의 생육기간 동안 처리구별로 염도를 매주 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 관개용수 R-TR#01은 기수담수화 시스템 가동 후 염도가 처리된 처리수, R-TR#02는 100% 수확량 임계수준, R-TR#03은 50% 수확량 임계수준, R-TR#04는 기수담수화 시스템 가동 전 염도가 높은 원수로 현장의 지하수 염도수준을 고려(시설재배가 가능한 시금치 재배가 가능한 최고 염분농도) 4.0 dS/m으로 설정하였다. 이에, 20일무의 R-TR#04는 4.0 dS/m, R-TR#03은 50% 수확량 임계수준인 3.4 dS/m, R-TR#02는 100% 수확량 임계수준인 0.8 dS/m가 되도록 염도수준을 유지시켜 주었으며, 기수담수화 시스템을 가동하여 염도가 처리된 R-TR#01의 염도수준은 0.12 dS/m로 나타났다.

표 4.31 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 관개용수 염도 모니터링

일자	EC _w (1차)				일자	EC _w (2차)			
	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04		R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04
16/10/15	0.130	0.797	3.381	4.121	16/12/07	0.121	0.811	3.412	4.012
16/10/17	0.132	0.804	3.392	4.030	16/12/12	0.121	0.811	3.416	4.010
16/10/24	0.135	0.802	3.395	4.028	16/12/19	0.120	0.812	3.417	4.010
16/10/31	0.134	0.802	3.390	4.025	16/12/26	0.120	0.809	3.414	4.009
16/11/07	0.132	0.801	3.388	4.023	17/01/02	0.120	0.809	3.412	4.005
16/11/14	0.131	0.796	3.389	4.020	17/01/09	0.120	0.809	3.412	4.005
16/11/21	0.131	0.800	3.387	4.021	17/01/16	0.081	0.809	3.411	4.005
16/11/28	0.130	0.799	3.388	4.020	17/01/23	0.081	0.806	3.407	4.004
					17/01/30	0.080	0.805	3.407	4.004
평균	0.132	0.800	3.389	4.036	평균	0.107	0.809	3.412	4.007

처리구별 관개용수 수질을 평가하기 위하여 1차·2차 생육기간의 파종기에 생성한 관개수를 샘플링하여 pH, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻N 등 16 항목에 대하여 분석하였다. 관개용수 수질 분석결과 모든 처리구에서 pH는 5.9-8.1으로 지하수 농업용수 수질기준인 6.5-8.5를 만족하는 것으로 나타났다. 1차 생육기간의 관개용수는 영양염류 T-N의 경우 R-TR#01을 제외한 모든 처리구에서 평균 3.62-3.92 mg/L 수준으로 나타났으며, T-P의 경우는 R-TR#01은 평균 0.057 mg/L로 나타났으나 나머지 처리구는 모두 검출한계 미만으로 분석되었다. 2차 생육기간의 관개용수는 영양염류 T-N의 경우 R-TR#01을 제외한 모든 처리구에서 평균 3.60-4.94 mg/L 수준으로 나타났으며, T-P의 경우는 R-TR#01은 평균 0.006 mg/L로 나타났으며, 나머지 처리구는 평균 0.01 mg/L으로 분석되었다. 1차와 2차 관개용수의 Na⁺의 경우 R-TR#01에서 R-TR#04로 염도수준이 높아질수록 염분성분을 대변하는 Na⁺값이 높게 나타났으며, 나트륨 흡착률 (SAR)을 산정한 결과도 평균 R-TR#01에서 R-TR#04로 염도수준에 따라 값이 매우 높은 것으로 분석되었다.

표 4.32 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 관개용수 수질 모니터링 결과 (1차)

처리구	일자	pH	EC	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	Fe	SAR
			dS/m	mg/L														
R-TR#01	16/10/15	6.2	0.13	7.5	ND	0.6	0.51	0.057	3.0	ND	ND	16.54	0.04	32.6	ND	0.4	0.020	-
R-TR#02	16/10/15	8.1	0.90	6.6	ND	0.9	3.62	ND	ND	33.06	5.76	110.15	3.33	162.9	12.0	3.3	0.023	3.29
R-TR#03	16/10/15	8.1	3.98	6.6	ND	1.3	3.90	ND	1.0	32.27	5.30	597.48	4.62	1,043.9	12.1	3.3	ND	18.15
R-TR#04	16/10/15	7.9	5.06	6.8	0.3	2.4	3.92	ND	2.0	31.69	5.26	806.71	4.93	1,372.1	12.6	3.3	ND	24.70

표 4.33 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 관개용수 수질 모니터링 결과 (2차)

처리구	일자	pH	EC	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	Fe	SAR
			dS/m	mg/L														
R-TR#01	16/12/07	5.9	0.11	8.9	0.7	0.4	0.91	0.006	ND	0.35	0.08	17.88	0.17	28.2	ND	0.6	ND	5.01
R-TR#02	16/12/07	7.9	0.95	10.2	1.0	0.6	3.60	0.011	ND	32.42	5.04	152.21	2.78	216.4	11.1	3.4	ND	4.64
R-TR#03	16/12/07	7.6	3.91	10.3	1.5	3.0	4.65	0.010	ND	41.03	4.93	679.94	3.69	1,201.2	11.9	3.6	ND	18.87
R-TR#04	16/12/07	7.5	4.39	10.3	1.5	3.8	4.94	0.011	ND	33.76	4.97	820.65	3.79	1,443.5	11.9	3.6	ND	24.65

(3) 작물생육

20일무의 처리구별 생육특성을 분석하기 위하여 각 처리구당 10개의 대표 개체에 대해 매주 엽수와 엽장의 생육모니터링을 실시하였다. 처리구별 생육 평균차가 통계적으로 유의한가를 검증하기 위하여 IBM SPSS Statistics 22.0를 사용하여 분산분석 (ANOVA)을 실시하였으며, 사후검정은 던컨의 다중범위검정 (Duncan's Multiple Range Test)과 터키 검증 (Tukey's HSD)을 사용하였다.

먼저 1차 생육 분석결과, 엽수는 처리구별 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다. 반면 엽장의 경우는 처리구별 평균 엽장이 L-TR#01 (30.3 cm)로 가장 길었으며, L-TR#02 (28.6 cm), L-TR#03 (27.8 cm), L-TR#04 (24.0 cm)순으로 나타났으며, 엽도 수준이 작을수록 엽장이 긴 것으로 나타났으며 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).

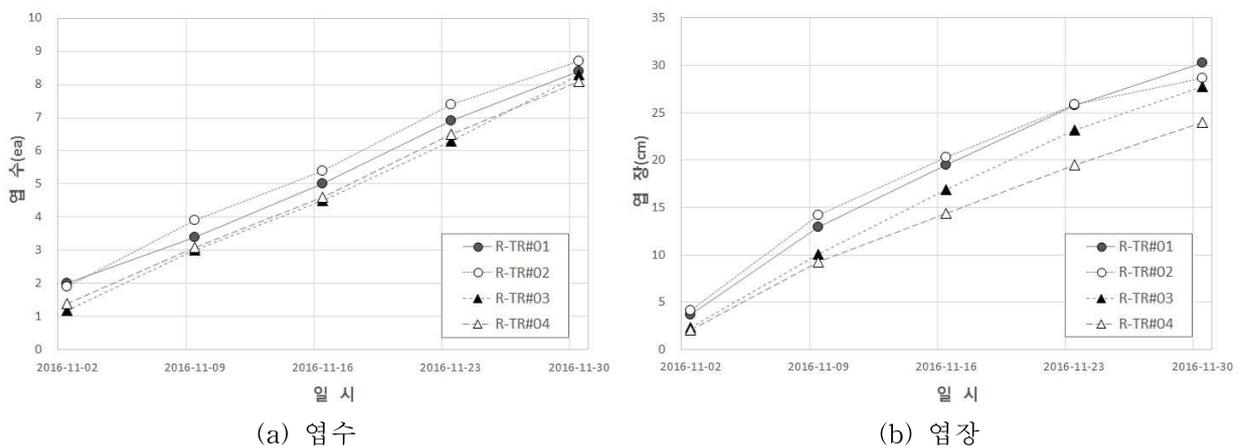


그림 4.17 생육저해 엽도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생육변화 (1차)

표 4.34 생육저해 엽도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생육변화 (1차)

일시	R-TR#01		R-TR#02		R-TR#03		R-TR#04	
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)
16/11/02	2.0	3.7	1.9	4.1	1.2	2.4	1.4	2.1
16/11/09	3.4	13.0	3.9	14.2	3.0	10.1	3.1	9.2
16/11/16	5.0	19.5	5.4	20.3	4.5	16.9	4.6	14.4
16/11/23	6.9	25.8	7.4	25.9	6.3	23.1	6.5	19.5
16/11/30	8.4	30.3	8.7	28.6	8.3	27.8	8.1	24.0
평균	5.1	18.4	5.5	18.6	4.7	16.0	4.7	13.9

표 4.35 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	엽수(ea)	엽장(cm)
R-TR#01	8.4±0.8a	30.3±1.6a
R-TR#02	8.7±0.8a	28.6±2.9ab
R-TR#03	8.3±0.7a	27.8±2.3b
R-TR#04	8.1±1.0a	24.0±1.8c
F-value	0.882	14.793
p	0.459	0.000

*Mean separation by Duncan's multiple range test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

2차 생육 분석결과, 1차와 달리 엽수와 엽장 모두 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 처리구별 평균 엽수의 경우 L-TR#01 (8.9 ea)로 가장 많았으며, 다음으로 L-TR#02 (8.5 ea), L-TR#03 (8.2 ea), L-TR#04 (7.1 ea) 순으로, 엽장의 경우는 L-TR#02 (28.9 cm), L-TR#01 (27.3 cm), L-TR#03 (25.7 cm), L-TR#04 (23.7 cm)순으로 나타났다. 모두 염도 수준이 작을수록 엽수가 많고, 엽장이 긴 것으로 나타났으며 이는 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).

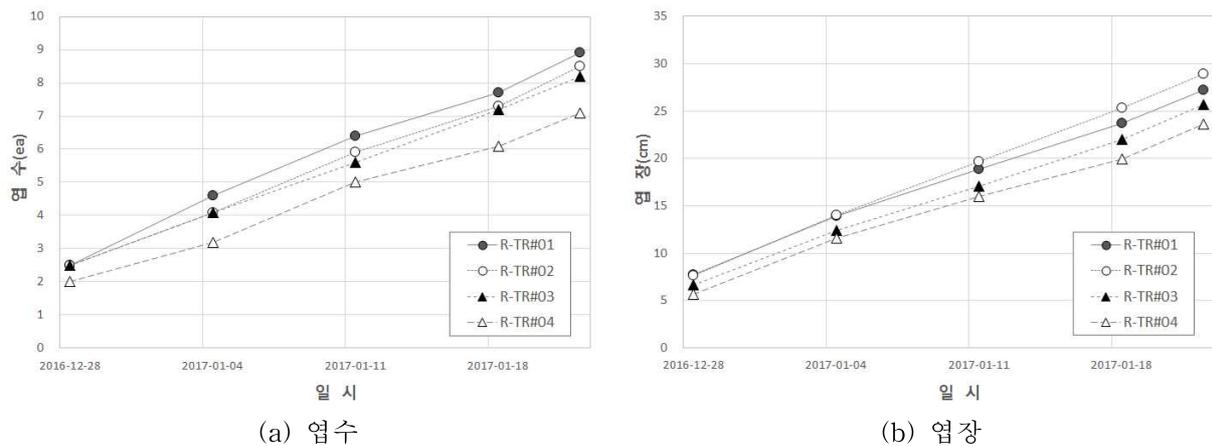


그림 4.18 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생육변화 (2차)

표 4.36 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생육변화 (2차)

일시	R-TR#01		R-TR#02		R-TR#03		R-TR#04	
	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)	엽수 (ea)	엽장 (cm)
16/12/28	2.5	7.7	2.5	7.6	2.5	6.7	2.0	5.7
17/01/04	4.6	13.9	4.1	14.0	4.1	12.4	3.2	11.6
17/01/11	6.4	18.9	5.9	19.7	5.6	17.1	5.0	16.0
17/01/18	7.7	23.7	7.3	25.4	7.2	22.0	6.1	20.0
17/01/22	8.9	27.3	8.5	28.9	8.2	25.7	7.1	23.7
평균	6.0	18.3	5.7	19.1	5.5	16.8	4.7	15.4

표 4.37 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생육 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

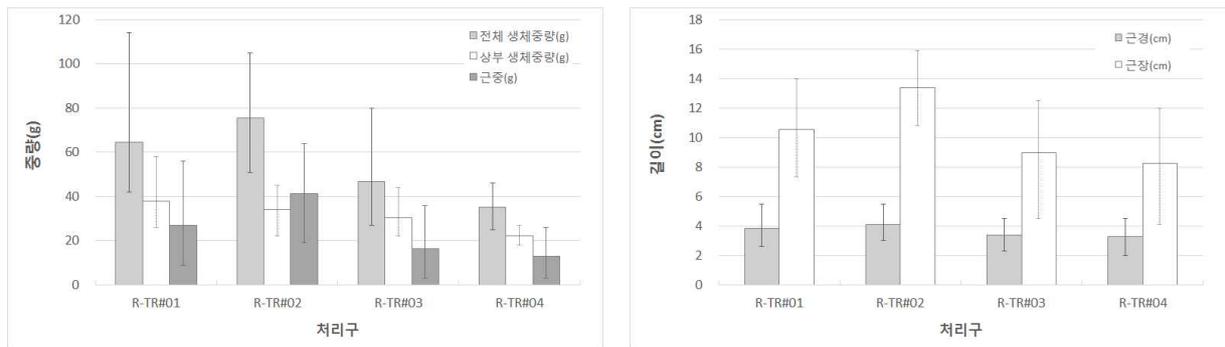
처리구	엽수(ea)	엽장(cm)
R-TR#01	8.9±0.9a	27.3±2.2ab
R-TR#02	8.5±0.8a	28.9±1.6a
R-TR#03	8.2±1.0a	25.7±2.2bc
R-TR#04	7.1±0.9b	23.7±4.0c
F-value	7.174	7.315
p	0.001	0.001

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

(4) 생체중량

20무의 생체중량 및 근경, 근장은 각 처리구별 10개 대표 작물을 수확하여 조사하였다. 처리구별 평균값을 구하여 분석하였으며, 처리구별 생체중량 및 근경, 근장 등이 통계적으로 유의한지 검증하기 위해 분산분석을 실시하였다. 1차 분석 결과, 전체 생체중량, 상부 생체중량 및 근중 모두 R-TR#02, R-TR#01, R-TR#03, T-TR#04 순으로 생체중량이 크고, 근경 및 근장이 긴 것으로 나타났으며, 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).



(a) 전체, 상부 생체중량 및 근중

(b) 근경 및 근장

그림 4.19 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생체중량 및 근경, 근장 (1차)

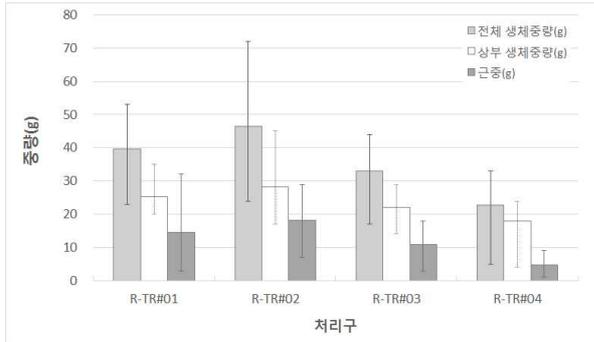
표 4.38 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생체중량 및 근경, 근장 분산분석 및 사후검정 결과 (1차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)	근중(g)	근경(cm)	근장(cm)
R-TR#01	64.7±22.5ab	37.9±9.2a	26.8±15.3ab	3.9±1.0a	10.6±2.5ab
R-TR#02	75.4±17.3a	34.0±7.5a	41.4±13.7a	4.1±0.9a	13.4±1.5b
R-TR#03	46.9±16.8bc	30.4±7.7ab	16.5±11.2b	3.4±0.6a	9.0±3.0a
R-TR#04	35.2±6.6c	22.3±2.9b	12.9±6.8b	3.3±0.7a	8.3±2.6a
F-value	11.385	8.447	10.979	2.265	8.547
p	0.000	0.000	0.000	0.098	0.000

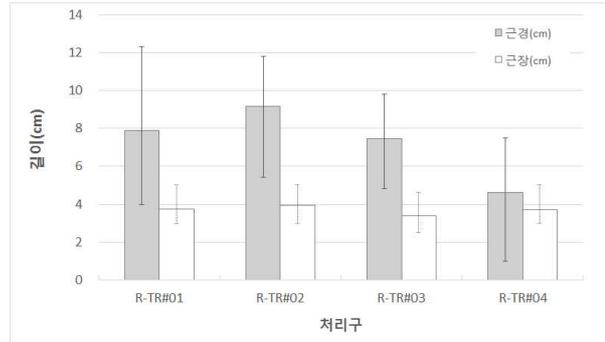
*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

2차 분석 결과, 전체 생체중량, 상부 생체중량, 근중, 근경은 1차 분석결과와 마찬가지로 R-TR#02, R-TR#01, R-TR#03, T-TR#04 순으로 생체중량이 크고, 근경이 긴 것으로 나타났으며, 이들은 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 반면, 2차 분석에서 근장의 경우 평균 3.4-4.0 cm로 처리구별 뚜렷한 경향성이 나타나지 않아 근장은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다 ($p > 0.05$).



(a) 전체, 상부 생체중량 및 근중



(b) 근경 및 근장

그림 4.20 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생체중량 및 근경, 근장 (2차)

표 4.39 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 생체중량 및 근경, 근장 분산분석 및 사후검정 결과 (2차)

처리구	전체 생체중량(g)	상부 생체중량(g)	근중(g)	근경(cm)	근장(cm)
R-TR#01	39.7±10.5ab	25.2±5.4ab	14.5±10.0a	7.9±2.9a	3.7±0.6a
R-TR#02	46.5±13.6a	28.2±7.9b	18.3±8.1a	9.2±2.0a	4.0±0.6a
R-TR#03	32.9±7.4bc	22.0±4.6ab	10.9±4.5ab	7.5±1.7a	3.4±0.7a
R-TR#04	22.8±7.9c	18.0±5.7a	4.8±2.6b	4.6±1.8b	3.7±0.6a
F-value	9.906	5.268	6.882	7.762	1.423
p	0.000	0.004	0.001	0.000	0.252

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level

**Mean±deviation(n=10)

(5) 작물성분 조사 분석

식물체 성분분석은 관개용수 염도수준에 따른 식물체 내 집적 등의 영향을 파악하기 위하여 염분 성분을 대변할 수 있는 Na^+ 을 분석하였다. 생체중량과 동일하게 각 처리구별 10개 대표작물을 수확하여 조사하였으며 각 처리구별 평균값 분석하고 처리구간 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 1차와 2차 처리구별 식물체 Na^+ 성분분석 결과, 모두 처리구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), 모두 처리구의 염도수준이 높아 질수록 식물체 내 Na^+ 집적이 많이 일어났다. 1차의 경우, B-TR#01의 4,284.6 mg/kg 대비 최고 염도수준인 B-TR#04에서 B-TR#01 대비 약 6.9배에 해당하는 29,571 mg/kg으로 나타났으며, 2차의 경우 B-TR#01의 2,440.4 mg/kg 대비 B-TR#04에서 B-TR#01 대비 약 9.5배에 해당하는 23,259.9 mg/kg으로 나타났다.

표 4.40 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 식물체 성분 분석결과 (1차)

구분	Na^+ (mg/kg)			
	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04
16/12/01	4284.6±410.2a	6906.4±1583.3a	24570.3±2380.4b	29571.0±5216.8c
F-value	178.918			
p	0.000			

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level
 **Mean±deviation(n=10)

표 4.41 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 식물체 성분 분석결과 (2차)

구분	Na^+ (mg/kg)			
	R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04
17/01/23	2440.4±335a	7121.0±793.8b	19732.6±2740.3c	23259.9±3477.2d
F-value	194.394			
p	0.000			

*Mean separation by Tukey's HSD (honest significant difference) test, 5% level
 **Mean±deviation(n=10)

(6) 토양환경 조사 분석

20일무의 처리구별 토양환경을 분석하기 위하여 1차 파종전과 수확 후, 2차 파종 전과 수확 후의 총 4번 토양을 샘플링하여 pH, EC, CEC, T-N, T-P, P₂O₅, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, 유기물함량 등 11개 항목을 분석하였으며, 파종 시에는 모든 처리구별 동일한 토양을 사용하였다. 먼저, 1차 파종 전과 수확 후의 토양의 화학적 성분 분석결과를 비교해보면, 토양의 화학적 성분 분석결과 pH의 경우 모든 처리구에서 5.7-6.2 수준으로 비슷하게 나타났으며, EC의 경우 관개용수의 염도가 높아질수록(R-TR#01에서 R-TR#04로 갈수록) EC값이 높아지는 것으로 나타났다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우도 염도가 높을수록 수치가 현저히 높아지는 경향을 보였으며, 수확 후의 R-TR#01의 533.28 mg/kg 대비 약 15.8배 증가한 8,414.35 mg/kg가 나타났다. 2차 토양분석 결과도 살펴보면, 관개용수의 염도가 높아질수록 EC값이 높아지는 것으로 나타났으며, Na⁺의 경우도 수확 후의 R-TR#01의 153.36 mg/kg 대비 약 34.9배 증가한 5,357.60 mg/kg가 나타나 관개용수의 염도가 높아질수록 토양 내 Na⁺의 축적이 많이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 수확 후의 R-TR#01 토양의 경우 파종전의 EC 값인 16.12 dS/m 보다 감소하는 것으로 나타났다.

표 4.42 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 토양 화학적 성분분석 결과 (1차)

구분	파종 전	수확 후			
		R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04
pH	5.7	5.7	5.9	6.2	6.2
CEC(cmol/kg)	93.58	125.51	98.99	108.07	114.95
T-N(%)	1,288.67	578.07	546.43	519.78	531.23
T-P(mg/kg)	1.37	1.15	1.22	1.16	1.13
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1,185.42	231.94	197.44	207.47	201.40
Ca ²⁺ (mg/kg)	12,983.60	20,932.50	22,145.50	21,190.50	18,377.00
Mg ²⁺ (mg/kg)	1,412.96	1,950.90	1,973.65	1,732.85	1,652.00
Na ⁺ (mg/kg)	273.03	533.28	1,504.70	7,311.75	8,414.35
K ⁺ (mg/kg)	1,946.40	893.35	838.70	759.25	738.05
유기물함량(%)	94.10	95.58	94.37	27.54	96.72
EC(dS/m)	16.12	10.77	11.70	24.41	27.81
SAR	0.43	0.67	1.84	9.17	11.27

표 4.43 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 처리구별 토양 화학적 성분분석 결과 (2차)

구분	파종 전	수확 후			
		R-TR#01	R-TR#02	R-TR#03	R-TR#04
pH	5.7	6.0	6.0	6.5	6.5
CEC(cmol/kg)	93.58	110.78	77.86	90.39	99.23
T-N(%)	1,288.67	481.19	512.30	601.73	593.91
T-P(mg/kg)	1.37	0.319	0.737	1.080	1.090
P ₂ O ₅ (mg/kg)	1,185.42	185.16	202.01	258.90	305.50
Ca ²⁺ (mg/kg)	12,983.60	11,720.00	11,844.80	11,083.60	10,489.20
Mg ²⁺ (mg/kg)	1,412.96	1,054.32	1,053.64	915.60	877.92
Na ⁺ (mg/kg)	273.03	153.36	947.32	4,747.60	5,357.60
K ⁺ (mg/kg)	1,946.40	636.32	607.92	711.72	791.80
유기물 함량(%)	94.10	90.27	86.92	90.54	87.19
EC(dS/m)	16.12	7.57	9.67	31.81	33.02
SAR	0.43	0.257	1.581	8.229	9.538

(7) 생육환경 조사 분석

(가) 온도

20일무의 작물생육기간 동안 유리온실의 온도를 살펴보면, 1차 작물재배기간 (10월 15일 ~12월 01일)동안 평균온도는 18.9 °C였으며 최고온도는 25.3 °C, 최저온도는 12.9 °C로 조사되었다. 2차 작물재배 기간 (12월 07일~01월 23일)동안 평균온도는 15.2 °C였으며 최고온도는 18.1 °C, 최저온도는 10.6 °C로 조사되었다. 1차 재배기간보다 2차 재배기간의 온도가 약 3.7 °C정도 낮아진 것으로 조사되었다.

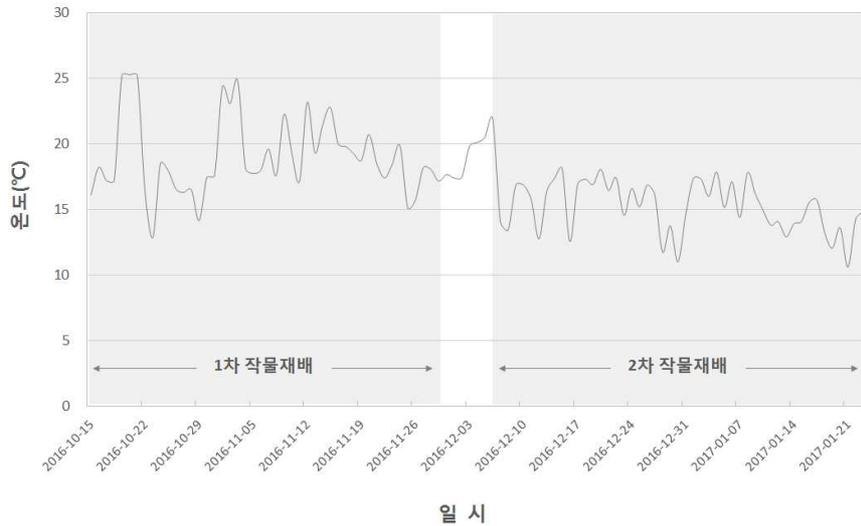


그림 423 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 작물생육기간 온실 내부 온도

(나) 습도

20일무의 1차 작물재배기간 (10월 15일~12월 01일)동안 유리온실의 평균습도는 46.0 %, 최고습도는 80.0 %, 최저습도는 31.06.4 %로 조사되었으며, 2차 작물재배 기간 (12월 07일~01월 23일)동안 평균습도는 35.3 %, 최고습도는 67.0 %, 최저습도는 29.5 %로 조사되었다.

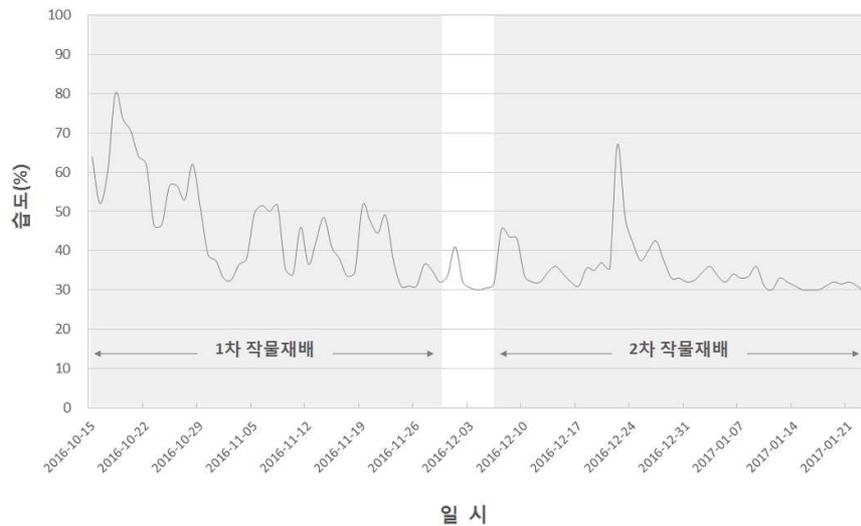


그림 424 생육저해 염도를 고려한 20일무 생육실험의 작물생육기간 온실 내부 습도

3. 기수담수화 시스템의 현장적용성 고찰

기수담수화 시스템의 현장적용을 위한 2가지의 작물생육 실험의 주요 결과를 요약하면 아래의 표와 같다. 취수용수의 염도수준별 작물생육실험은 각 염도별로 기수담수화 시스템 적용(가동)시 제염수준과 그에 따른 작물생육·수질·토양환경을 평가하고자 한 실험이고, 생육저해 염도를 고려한 작물생육실험의 경우 실제 간척지에서 고염도(4.0 dS/m 수준)의 원수로 작물을 재배했을 경우와 기수담수화 시스템 적용(가동)하여 처리된 물로 작물을 재배했을 경우 작물생육·수질·토양환경을 평가하고자 한 실험이다. 생육저해 염도를 고려한 작물생육 실험의 경우 딸기의 엽병장 항목을 제외한 엽수와 엽장, 당도, 총길이, 상부 생체중량, 20일 무의 엽수, 엽장, 전체 생체중량, 상부 생체중량, 근중, 근경과 근장 모든 항목에서 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 모두 염도 수준이 높은 물로 관개할수록 엽수가 적고 엽장을 짧으며, 당도가 낮으며, 수확 후의 생체중량들도 낮은 값들이 나타났다.

표 4.44 기수담수화 시스템의 현장적용을 위한 작물생육실험 결과 요약

구분		취수용수의 염도수준별 작물생육 실험				생육저해 염도를 고려한 작물생육 실험								
대상작물		상추				딸기				20일무				
염도민감도*		MS				S				MS				
실험조건		2반복구 2회				1반복구 1회				1반복구 2회				
관개용수 구분		#01	#02	#03	#04	#01	#02	#03	#04	#01	#02	#03	#04	
기수담수화 시스템 적용(가동) 유무**		-	●	●	●	●	-	-	-	●	-	-	-	
염도변화 (dS/m)	전	0.29	0.90	2.10	3.40	4.00	0.70	1.70	4.00	4.00	0.80	3.40	4.00	
	후	0.29	0.02	0.06	0.11	0.12	0.70	1.70	4.00	0.12	0.80	3.40	4.00	
유의성***	생육	엽수	×				◎				○			
		엽장	△				◎				◎			
		엽폭	×											
		엽병장					×							
	상품성	당도					◎							
		총길이					◎							
	생체중량	전체 생체중량	△								◎			
		상부 생체중량	×				◎				◎			
		근중									◎			
		근경									○			
	근장									○				
작물성분(Na ⁺)		○				◎				◎				

* Sensitive (S), moderately sensitive (MS)

** ● : 시스템 적용, - : 시스템 미적용

*** ◎ : 통계적으로 유의함 ($p < 0.05$), × : 통계적으로 유의하지 않음 ($p > 0.05$)

○ : 1차 재배와 2차 재배 중 1번만 통계적으로 유의함 / △ 2번 반복구 중 1번만 유의함

생육저해 염도를 고려한 작물생육 실험은 고염도의 관개용수로 작물을 재배할 경우와 제염된 관개용수로 작물을 재배할 경우의 작물생육, 수질, 토양환경 변화가 잘 나타났으며, 딸기와 20일무의 염도별, 시기별 생육변화를 살펴보면 아래 그림과 같다. 기수담수화 시스템을 적용하여 제염된 TR#01의 관개용수로 재배한 경우 매우 양호한 생육상태를 나타냈지만, 나머지는 관개용수의 염도가 높아질수록 생육상태가 현저히 떨어지는 것을 육안으로 확인할 수 있다. 특히 염도에 민감한 딸기의 경우, 실제 시설재배지에 대한 염해 피해사례와 동일하게 고염도의 관개용수 (TR#04)에서 작물이 서서히 타들어가면서 고사하였다.

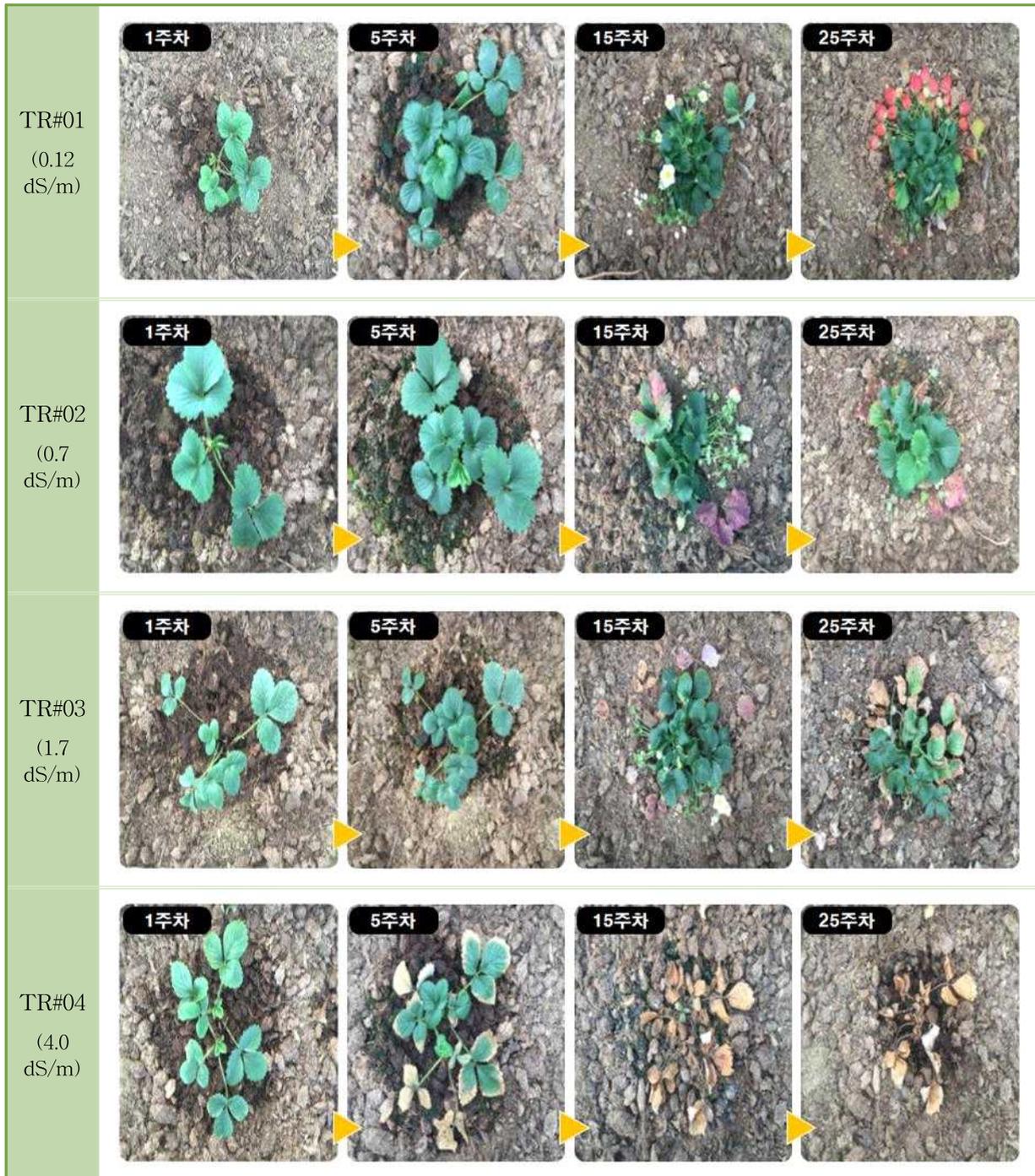


그림 4.25 딸기의 염도수준별·시기별 생육변화

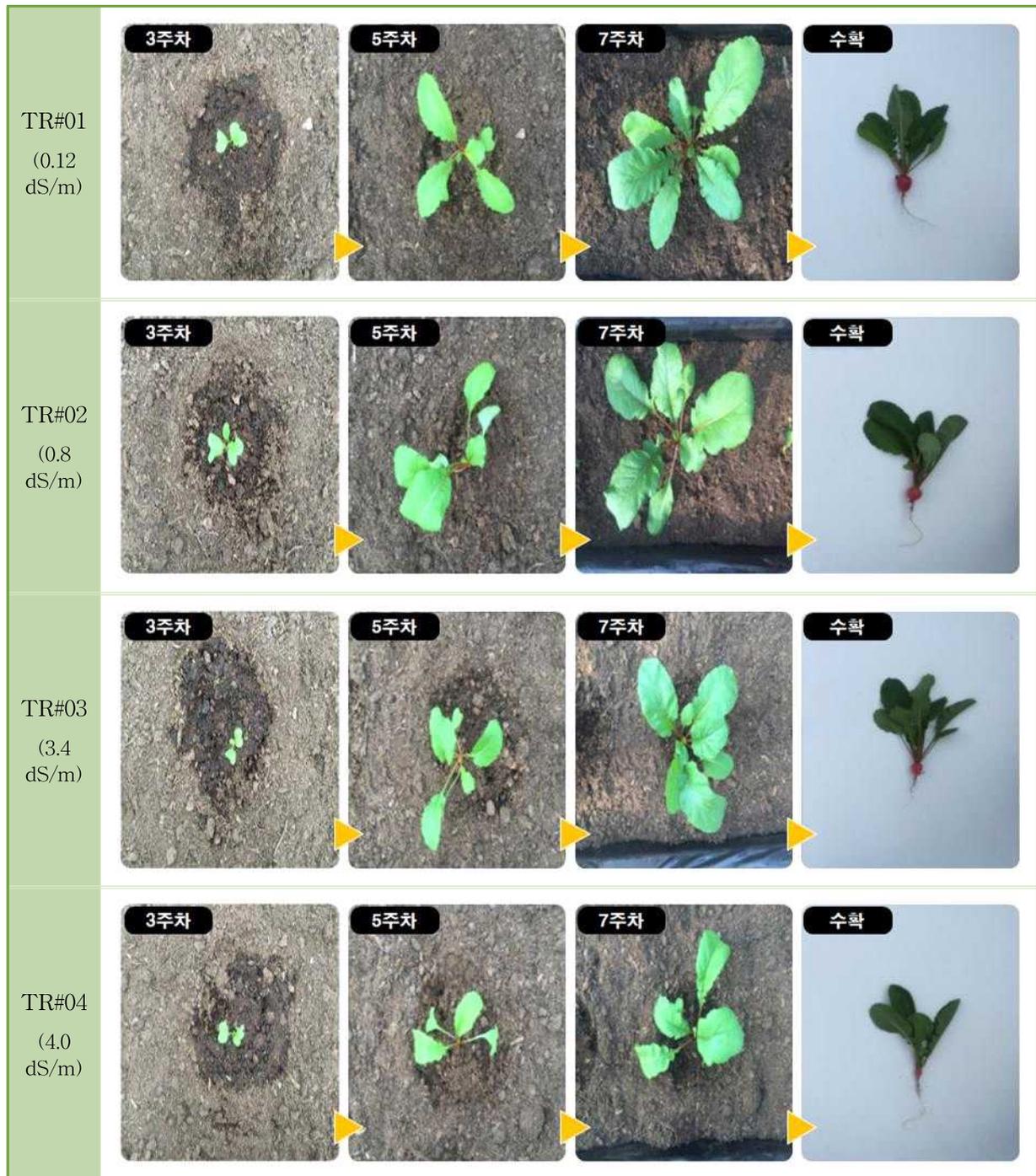


그림 4.26 20일부의 염도수준별·시기별 생육변화

제5절 기수담수화 시스템 공정설계 및 최적화

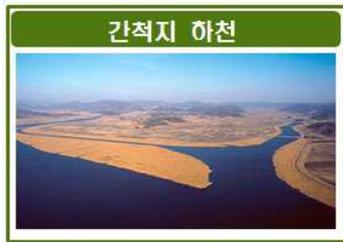
지구상의 존재하는 물 중 97 %가 바닷물이며 담수의 양은 3 %이다. 하지만 빙하나 다른 형태로 존재하는 담수를 빼고 현실적으로 이용 가능한 강이나 호수의 양은 0.0067 %에 불과하다. 무한에 가까운 방대한 양과 기상조건의 관계없이 다량의 수자원 확보가 가능한 해수담수화 산업을 실용화 한다면 부족한 물 문제에 대응할 수 있는 방안이 될 것이다. 이러한 담수화 기술은 최근 물 부족현상을 해결할 수 있는 중요한 해결수단으로 떠오르고 있으며, 지구상의 물의 97 %가 해수인 만큼 무궁무진한 수자원으로서의 가치가 크다고 볼 수 있다. 담수화 기술은 물에서 염분 및 유해한 물질을 제거하는 공정으로 해수와 기수에서 담수로 변환 시키는 것으로 이해할 수 있다. 원수는 총 용존 고형물에 따라 분류되며 이것은 물속에 용해되지 않고 떠있는 물질을 의미한다. 해수는 15,000~50,000 mg/L, 기수는 1,500~15,000 mg/L, 순수는 500 mg/L 이하로 정의된다. 기수는 해수와 강물이 섞이는 지점에 존재하는 물로 해수와 담수의 성질을 동시에 가지고 있으며, 염도가 낮아 적은 비용만으로도 담수화가 가능하다는 장점을 가진다, 따라서 해수보다는 용존 고형물이 적은 기수가 막분리 공정에 좀 더 효율적으로 사용 될 수 있다. 이러한 담수화 공정은 크게 증발법과 막분리법으로 구별되는데 증발법은 많은 운영비 및 초기 투자비가 고가이며 막분리법에 비하여 다량의 에너지가 소모되는 단점을 가지고 있다. 막분리법은 역삼투압법으로 증발법에 비해 저에너지를 사용하며 특히 기수담수화 있어 저압용 막분리를 사용하므로 매우 경제적이다. 다만 모든 막분리 사용에 있어 전처리가 매우 고가이다. 따라서 농업용수 공급을 위한 경제적인 기수담수화 시스템의 처리공정을 설계하고, 제안된 처리공정으로부터 PILOT PLANT를 설계하고자 한다.

1. 기수담수화 시스템 설계인자 분석

간척지 및 기수역 인근의 염분이 일부 포함된 하천수를 취수하여 부유물질 (SS), 이온성 물질 (NaCl, T-N, T-P 등) 등을 ZT (Zeta Potential Tower) 시스템에 의해 농업용수 용도에 적합하도록 저감, 재처리하여 시설원예용수로 공급하고자 한다. 따라서 이 기술에 필요한 공정은 1차 ZT 전처리 장치에서 총 부유물질 및 미생물 억제로 후처리 막의 부하량을 저감하며, 2차 MF 필터로 콜로이드 미세부유물질 제거 후 RO (역삼투) 막에서 이온(NaCl) 물질 제거되는 공정 시스템을 개발 하고자 한다.

가. 설계인자 분석 및 도출

간척지 및 기수역 인근의 시설원예단지를 대상으로 물 처리를 통한 농업용수 공급시스템의 개발을 목적으로 물 처리 수준 결정을 위한 유입수질 설계인자를 분석하기 위하여 현하수처리수의 농업재이용 법규를 기준으로 다음 그림과 같이 설계 인자를 도출하였다.



인자	유입 수질	설계인자 수질	법적 수질
pH	7.5	-	5.8~8.5
BOD (mg/ℓ)	5.1	0.03	8
염소이온 (mg/ℓ)	580.1	11.6	250이하
전기전도도 (μS/cm)	2,000	25	700이하
탁도 (NTU)	3.0	0.02	2
대장균균수 (개/100ml)	2,387	21	200이하
Al (mg/ℓ)	3.377	-	5이하
As (mg/ℓ)	불검출	-	0.05이하
B-total (mg/ℓ)	0.440	-	0.75이하
Cd (mg/ℓ)	불검출	-	0.01이하
Cr ⁺⁶ (mg/ℓ)	불검출	-	0.05이하
Co (mg/ℓ)	불검출	-	0.05이하
Cu (mg/ℓ)	불검출	-	0.2이하
Pb (mg/ℓ)	불검출	-	0.1이하
Li (mg/ℓ)	130.70	2.1	2.5이하
Mn (mg/ℓ)	0.132	-	0.2이하
Hg (mg/ℓ)	불검출	-	0.001이하
Ni (mg/ℓ)	불검출	-	0.2이하
Se (mg/ℓ)	불검출	-	0.02이하
Zn (mg/ℓ)	0.133	-	2이하
CN (mg/ℓ)	불검출	-	불검출
PCB (mg/ℓ)	불검출	-	불검출

그림 5.1 시설농업용수 공급시스템 유입수질 설계

◎ ZT-A SYSTEM (기수탄수화 4ton/day)

운전 인자	유량(m ³ /d)	압력(IN)	EC(μS/cm)
유입 시스템	15	-	700 ~ 2,000
	15	-	-
전처리 ZT 시스템	13	4kg/cm ²	-
MF	12	2kg/cm ²	-
RO시스템	4	9~10kg/cm ²	30 이하

그림 5.2 ZT-A SYSTEM 운전인자

ZT 시스템의 운전인자는 1차 유입시스템 원수를 압송과 동시에 ZT 시스템에서 1차 부유 물질을 처리하며 생산 유량은 13 톤/일이며 펌프 압송 압력은 3.5~6 kg/cm² 사이로 운전된다. 2차 카트리지 MF 필터를 여과 후 RO 멤브레인에서 4 톤/일 생산되며 이때 운전 압력은 저압방식 RO 시스템으로 8~10 kg/cm² 로 운전 인자를 도출하였다.

◎ 기수담수화 시스템

설 계 인 자	내 용	비 고
유입 시스템	일정한 수질 확보 및 유량 공급을 위해 레벨은 0.2M 유지	
전처리 ZT 시스템	4kg/cm ² 압력, 제타 전위 포텐셜 운전	
MF	2kg/cm ² 압력	
RO 처리수조	처리수조 일정 유량 및 EC 측정	
공급시스템	SITE 수위 레벨 제어 방식	

그림 5.3 기수담수화 시스템 주요 설계 인자

주요 설계 인자 도출에 있어 기존 방식과 새로운 방식의 설계인자에 대해 아래와 같이 설명하면 기존 일반적 기수 담수 시스템 인자 유입공급 장치, 디스크 전처리 필터 장치, UF 필터, MF 필터, RO 멤브레인 설계인자 이며, 새로운 방식의 기수담수 시스템은 유입시스템, ZT 전처리 시스템, MF 필터, RO 멤브레인 설계 인자로 기존 방식에서 디스크 전처리 필터, UF 필터를 사용 하지 않으므로 기계 수명, 약품비, 소모품비 등 유지관리비와 초기 시설비를 낮출 수 있는 공정 시스템을 개발 할 수 있다.

검토조건

- 오염물질 농도가 계획수질보다 높게 유입되어 기계 충격 부하시 처리효율 검토
- EC 농도 및 부유물질 증가에 대한 처리효율 검토
- 유입조건(10 ~ 25°C, EC 4,000 , 부유물질 50ppm)

구분	내 용	운영인자검토	
대응 계획	<ul style="list-style-type: none"> • 1차 ZT 전처리 80% 저감 • 2차 MF 20% 저감 • 3차 RO 50% 생산 (안전한 운전) 	온 도	• 유입수는 10°C
		EC 농도	• EC 농도 4,000
검토 결과	<ul style="list-style-type: none"> • EC 농도 및 부유 유기 물질농도 20 ~ 30% 중 가시 농업용수 공급 수질기준 달성가능 	부유물질 농도	• 부유물질 농도 50ppm
		ZT 전처리 압력	4kg/cm ²
		MF 압력	0.5~3kg/cm ²
		RO 압력	10kg/cm ²

그림 5.4 기수담수 시스템 고농도 유입 시 대응방안 인자

특히 유입 원수가 고농도의 부유물질 및 유기물을 함유 할 경우 기존 일반적 기수 담수 시스템은 전처리 문제로 운전을 할 수 없을 경우가 많다. 따라서 고농도의 유입수에 대한 전처리 기술 개발 및 개량이 필요하다. 또한 고농도에 대한 운전 대응 방안에 있어 유입수 조건에 알맞은 시스템 작동 및 처리 효율 극대화과 시스템 유지보수에 필요한 요소가 숙지 되어야 하며 평상시보다 1차에서 처리 효율이 90 %→ 80 % 저감되며 2차또한 20 % 저감 되고 3차 RO는 50 % 생산으로 운전 되어야한다.

나. 기수담수화 시스템 처리공법

(1) 기수담수화 시스템 처리공법 특징

안정적인 수질의 유지와 함께 유지관리측면에서 보다 편리한 공급방법을 수립하기 위한 기수담수화 처리공법을 개발하기 위해 고려할 요소기술 사항은 ① 여과속도 ② 유지관리 ③ 설치비용 측면이다. 특히, 농업용 목적의 수처리 기술은 일반적인 정수처리에 비해 상대적으로 설치비가 저렴하고 필터교체 최소화 및 단순한 운전 등 유지관리 성능이 기술 선택에 있어 매우 중요하다. 다음 표는 기계적 수처리에 사용되는 분리막을 여과대상 입자의 크기에 따라 구분한 표이다.

표 5.1 각 분리막의 운영조건별 분류

구분	분리입경, 분자량	조작압력(kg/cm ²)
역삼투막 (Reverse Osmosis)	분자량 (수십)	해수담수화 50~70
		염수탈염 4~40
나노여과막 (NF; Nanofiltration),	분자량 (최대 수백)	2~15
한외여과막 (UF; Ultrafiltration),	분자량 (1,000~300,000)	흡인방식 : 0.6정도 이상
		가압방식 : 3정도 이상
정밀여과막 (MF; Microfiltration)	분리입경 (0.4~0.01 μ m)	흡인방식 : 0.6정도 이상
		가압방식 : 2정도 이상

(가) 정밀여과막 (MF : Microfiltration Membrane)

정밀여과법에 이용되며 부유물질이나 원충, 세균, 바이러스 등을 체거름 원리에 따라 입자의 크기로 분리를 목적으로 수처리에 이용된다. MF는 크게 Depth 및 Membrane Type으로 구분하여 Depth Type은 마이크로필터, Membrane Type은 Membrane을 사용하기 때문에 분리막 교체가 필요하다. MF막의 특성은 다른 분리막에 비해 높은 투과플럭스를 가지는 반면 수처리 수준은 가장 낮다. 또한 공경이 비교적 크기 때문에 하수처리수 같이 콜로이드성분을 갖고 있는 유입수의 경우 내부 폐색을 일으킬 가능성이 높다. 다음은 MF의 물리적 성능을 요약한 내용이다.

- 공경: 0.01 μ m 이상
- 여과성능: 0.5 m³/m² · 일 이상
- 탁도제거: 0.05 NTU 이하
- 여과작용: 용질입자의 크기와 분리막의 공극에 의한 체거름 작용
- 제거 대상 물질 : 부유물질, 콜로이드, 세균, 현탁질, 조류, 박테리아 등
- 분리 능력 표시 : 공칭분획경(Pore Size)

(나) 한외여과막 (UF : Ultrafiltration Membrane)

세척을 통하여 지속적으로 사용 가능하고, 비대칭성 구조로 선택분리기능 가진 표면 활성층 및 다공성의 지지층으로 구성되어 있다. 여과원리는 멤브레인의 기공크기 (Pore Size)보

다 큰 물질이 우선 걸러지고 기공크기보다 작아서 통과한 물질도 확산 작용에 의해 제거하는 여과기이다. 다음은 UF의 물리적 성능을 요약한 내용이다.

- 공경: 0.01~0.001 μm
- 여과성능: 0.5 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 이상
- 탁도제거: 0.05 NTU 이하
- 여과작용: 체거름 작용
- 제거대상: 분자량 5,000~30만 정도의 세균, 콜로이드, 단백질, 고분자 유기물 등
- 분리능력표시: 분획분자량(MWCO)
- ※ 분획 분자량(MWCO; Molecular Weight of Cut-Off): UF막에서 사용되는 단위, 막에서 90% 이상 저지되는 표준 고분자물질의 분자량으로 표시
- 조작압력: 2~5 kg/cm^2 정도



그림 5.5 UF 멤브레인 구조

(다) 나노여과막 (NF : Nanofiltration Membrane)

정밀여과법에 이용되며 이온이나 저분자량(유기물, 농약, 맛/냄새물질, 합성세제, 칼슘이온, 마그네슘이온, 황산이온, 등) 물질을 제거하는 목적으로 사용된다. 분획분자량은 RO막과 UF막의 중간적 규모에 해당되고 유기물에 대해서는 분자량 200~500 정도의 분획분자량을 가지며 주로 2가 이온이나 저분자 물질이 분리대상이 된다. 주로 생활용수 목적으로 사용되는데 조작압력이 비교적 높아 경제성이 문제로 지적되고 있다.

- 공경: 0.005~0.001 μm
- 여과성능: 0.05 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 이상
- 여과작용: 체거름 작용과 확산 작용, 즉 삼투현상을 응용
- 제거대상: 분자량 5,000~30만 정도의 세균, 콜로이드, 단백질, 고분자 유기물 등
- 분리능력표시: 분획 분자량 (MWCO)
- 조작압력: 5~40 kg/cm^2 정도

(라) 역삼투여과막 (RO : Reverse Osmosis)

이온성 물질인 염분과 금속성 물질을 제거하는 목적으로 이용된다. RO 고압펌프를 사용하는 해수담수화용 공정과 RO 저압펌프를 사용하는 금속이온제거 및 기수의 담수화 공정으로 사용되고 있다.

- 공경: 0.001~0.0001 μm
- 여과성능: 0.01 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 이상
- 여과작용: 체거름 작용과 확산 작용, 즉 삼투현상을 응용
- 염화나트륨제거율: 93 % 미만
- 제거 대상물질: 금속이온, 염소이온, 해수중의 염분 등
- 분리 능력 표시: 분획 분자량 (MWCO)
- 조작압력: 50~75 kg/cm^2 정도

RO 멤브레인 구조는 일반적으로 나선형 모듈 (Spiral-wound module), 관상형 모듈 (Tubular Type), 중공사형 모듈 (Hollow - Fiber module), 평판형 모듈 (Plate & Frame type module) 및 모노리스형 모듈 (Monolith type module) 형태로 설계한다.

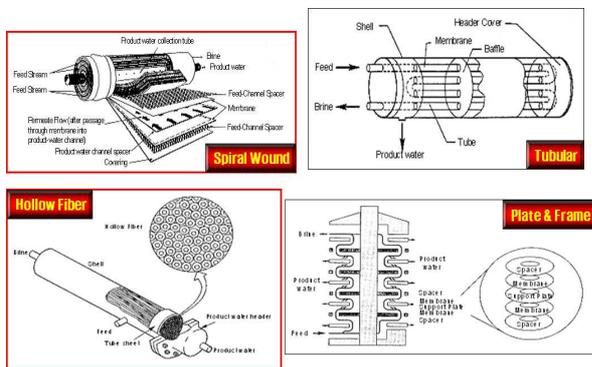


그림 5.6 RO Membrane 구조

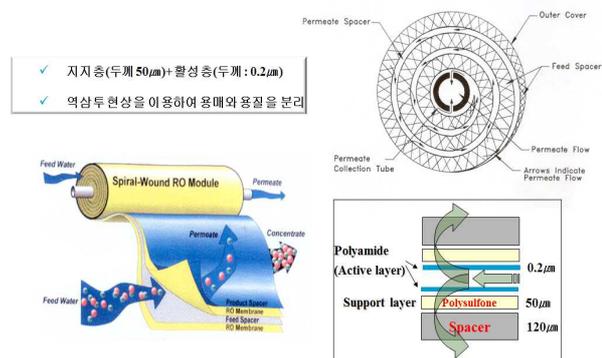


그림 5.7 RO Membrane 재료 구성

나선형 모듈은 입구가 한쪽인 봉투와 같은 형태의 평막 사이에 생산수가 흐를 수 있는 공간을 두었으며, 막과 막 사이에는 Mesh Space를 두어 원수가 흐를 수 있도록 한다. 막과 막의 표면사이에 Polypropylene 재질의 메쉬 스페이서를 삽입하여 와류를 증대시켜 물질전달을 촉진시키고 여과물질의 농도가 분극되는 것을 감소시킨다. 공급수가 모듈을 통과할 때 분극 현상이 점차 증가됨에 따라 압력 저하되고, 막 분리 구동력 감소의 원인이 된다. 즉 Module은 2장의 평막 사이에 통수가 가능한 지지체를 넣고 막의 외면에는 그물형태의 Spacer를 적층시킨 후 RollCake형태로 말아서 만든다.

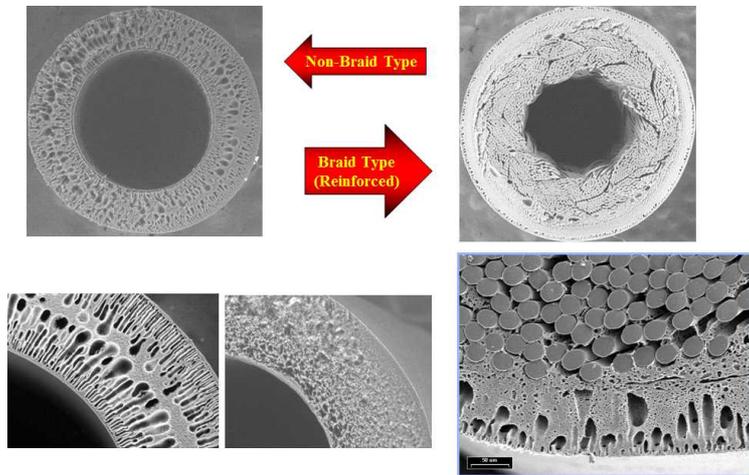


그림 5.8 RO Membrane 표면 구조

위의 그림은 중공사 모듈로서 투과 방식은 막 내측에 유입하는 내압식과 막 이측에서 원수를 유입하는 외압식이 있다. 중공사형 막은 사람의 머리카락보다 직경이 작은 매우 미세한 방향성 폴리아미드로 만들어 지는데 섬유는 표면 위에 0.1~1 μm 사이의 매우 얇고 촘촘한 층을 가지는 비대칭적인 것인 반면, 외층아래는 상대적으로 두꺼운 20~30 μm 다공성층이 존재한다. 따라서 중공사형 막은 자기지지형이며 두꺼운 벽을 가진 실린더와 유사하다. 외경과 내경의 비가 2:1정도가 되는 중공사는 파괴 없이 높은 운전압력을 견딜 정도의 강도를 갖기 때문에 다른 시스템과 비교하여 극도로 뾰뾰하게 주어진 부피를 채울 수 있다.

다음 그림은 MF, UF, NF, RO 및 PF(모래여과)에 대해 처리되는 물질을 여과공경 및 분획 분자량에 따라 구분한 그림으로 농업용 목적으로는 대상유입수의 성상과 이용목적에 따라 기계적 수처리 공정을 구성할 때 이용된다.

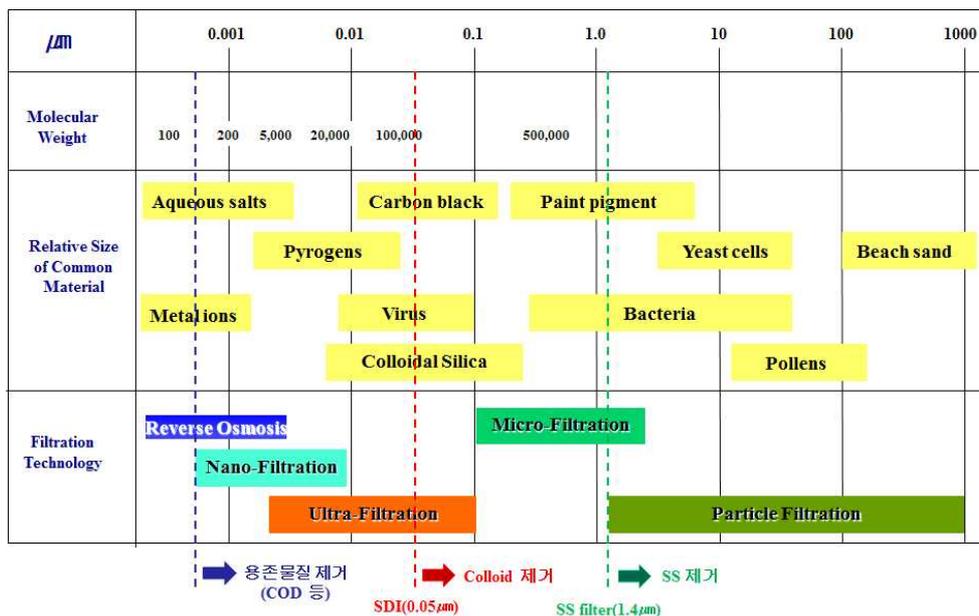


그림 5.9 FILTER 분리크기별 오염원 제거 효과

(2) 기수담수화 시스템 처리공법의 종류

(가) 일반적 분리막 공법

국내에서 많이 상용화된 재이용 기술로써 본 기술의 공정은 가압식 (UF) + (RO) 시스템으로 구성되고 있으며, 생활용수 및 음용수의 기준에 맞는 처리수 생산으로 고가의 장비와 고생산수, 고에너지, 고유지관리비로 농업용수 적용함에 있어 처리비용(수익성)과 환경영향에 문제점이 야기되고 있다. 또한 본 공정은 막의 장기적 운전을 위해서는 과도한 전처리 시설이 필요하며 막의 오염을 억제하기 위해 빈번한 화학세정이 필요하며 막의 교체 및 약품세척으로 인한 폐수가 발생하는 등 농업용수 적용에는 효율성이 많이 떨어진다.

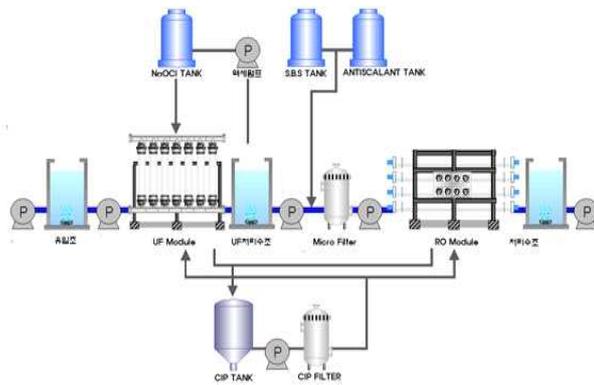


그림 5.10 분리막 공법

(나) 전기 전처리 + 분리막 혼합 공법

기존 초 순수 (공업용수), 생활용수 (음용수)에서 개발한 시스템의 활용범위를 보다 저에너지 저유지관리비 시스템으로 개발하여 농업 재이용수에 맞게 SS, 탁도, 대장균, 염분을 제거하여 농어촌지역에 안전한 농업용수 공급을 목적으로 한다. 공정을 살펴보면 회석 전처리 시스템 + (UF) + (RO)시스템으로 구성되어 있으며 회석 공정을 실현함으로써 후단의 막의 성능을 안정적으로 유지 및 향상시킬 수 있다. 하지만 여전히 막 오염과 막 세정이 공정 효율에 영향을 주게 되며 막의 특성을 고려한 최적의 막 세정 방법과 세정 주기 및 폐수 감소를 위한 공정개발이 필요하다.

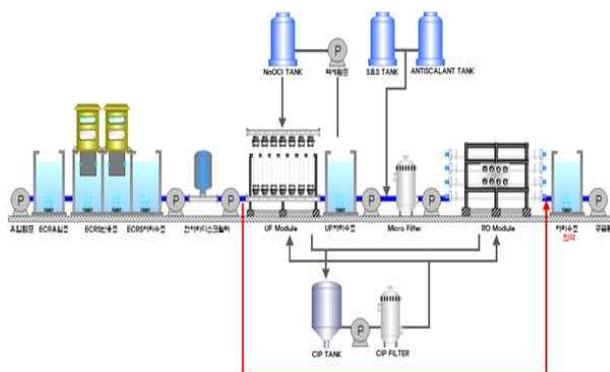


그림 5.11 전기전처리 + 분리막 공법

(다) Chemical-less 막 세정 시스템을 장착한 전기 전처리 + 분리막 혼합 공법

간척지, 하천 및 기수(汽水)를 담수화하여 농업용수 사용을 목적으로 공정은 희석 전처리 시스템 + (UF) + (RO) + Chemical-less 시스템으로 구성 되어 있다. 막 공정의 유입수는 비교적 높은 농도의 다양한 오염물이 함유되어 있어 막의 오염 가능성이 높다. 따라서 이러한 막오염을 억제하기 위한 Chemical-less 시스템을 적용하였으며 본 세정공정으로 막의 세정 횟수 폐수발생량을 50 % 이상 줄일 수 있다. 하지만 Chemical-less의 적용으로 막 성능이 증가하였지만 막의 반영구적 사용은 어려워 기존 전처리로 사용하는 MF/UF의 설치비용 및 운전비용을 감소 할 수 있는 새로운 소재나 공정의 개발이 필요하다.

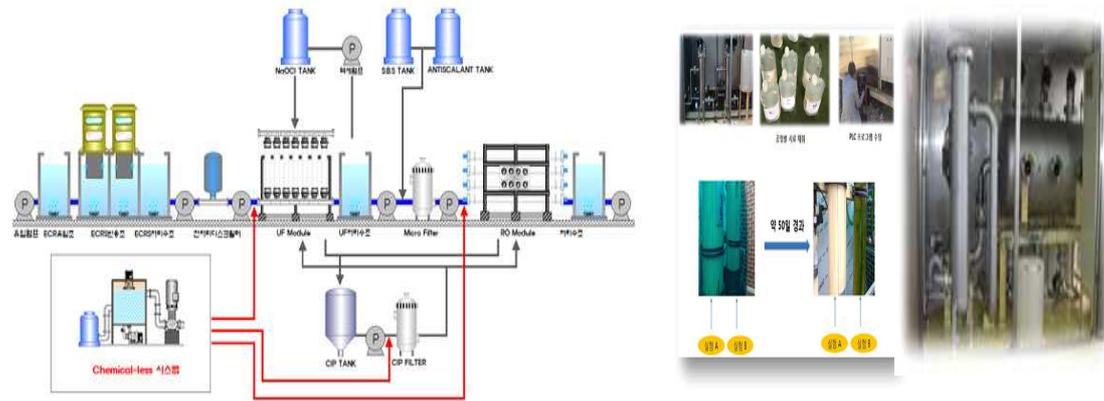


그림 5.12 Chemical-less 막 세정 시스템을 장착한 분리막 공법

(라) ASF 전처리 여과기 + 분리막 공법

ASF (Auto Strainer Filter) 는 필터를 교체하지 않고 반영구적으로 사용할 목적으로 스테인리스를 재료로 만든 필터를 말하며 필터망 (mesh) 사이즈와 병렬식 배치를 통해 다양한 용도로 사용된다. 농업용 재이용하기 위한 방법으로 제염을 위한 기수 및 해수 담수화 기술을 적용시 경제적 유지관리측면에서 RO 전처리로 사용되는 MF/UF 막의 수명이 2~3 년으로 짧아 막 교체비용 및 약품비용, 폐수량 문제가 야기됨에 따라 내구성 10년 이상 사용 가능한 친환경적인 RO 전처리 시스템이 개발로 새로운 하수재이용 기술의 방향을 제시하게 되었다. 본 기술 공정은 다음 그림과 같으며 전처리 희석 멀티 3단 ASF 시스템 + (RO) + Chemical-less 세정 시스템으로 경쟁력 있는 고품질의 농업용수를 제공 할 수 있을 것이다.

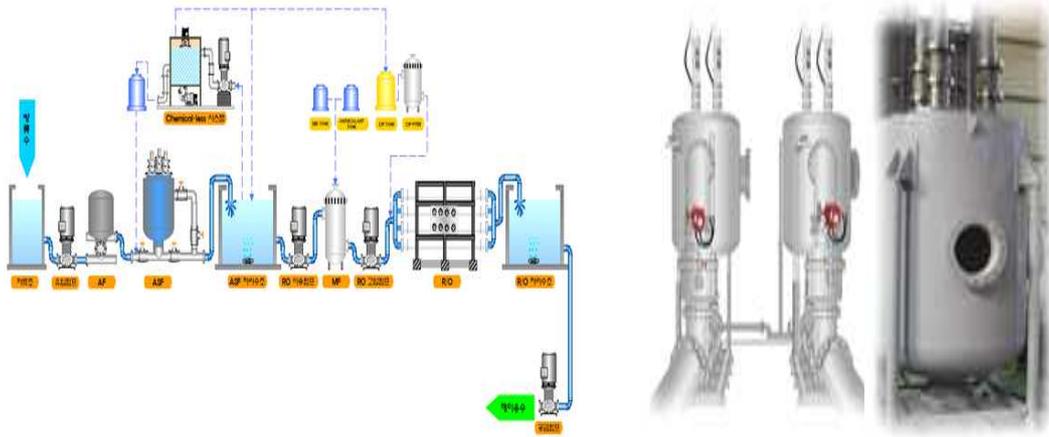


그림 5.13 ASF 전처리 여과기 + 분리막 공법

(마) ZT-타워 전처리 + 분리막 공법

ZT (Zeta Potential)란 물속에 전위를 발생시켜 제타전위를 최소화함으로써 물속의 함유한 유기물의 응집력을 최대화함으로써 이를 부상시켜 제거하는 기술이다. 농업용수 재이용 방법으로 제염을 위한 기수 및 해수 담수화 기술 적용시 경제적 유지관리측면에서 RO 전처리로 사용되는 UF 막의 수명이 2~3년으로 짧아 막 교체비용 야기된다. 따라서 UF 막 대체로 사용이 가능한 ZT 타워 고액 분리전처리 시스템을 새로운 기술 방향으로 제시하게 되었다. 본 기술 공정은 다음 그림과 같으며 극미세버블 + ZT제너레이터 + (RO) 시스템으로 경쟁력 있는 고품질의 농업용수를 제공 할 수 있을 것이다.

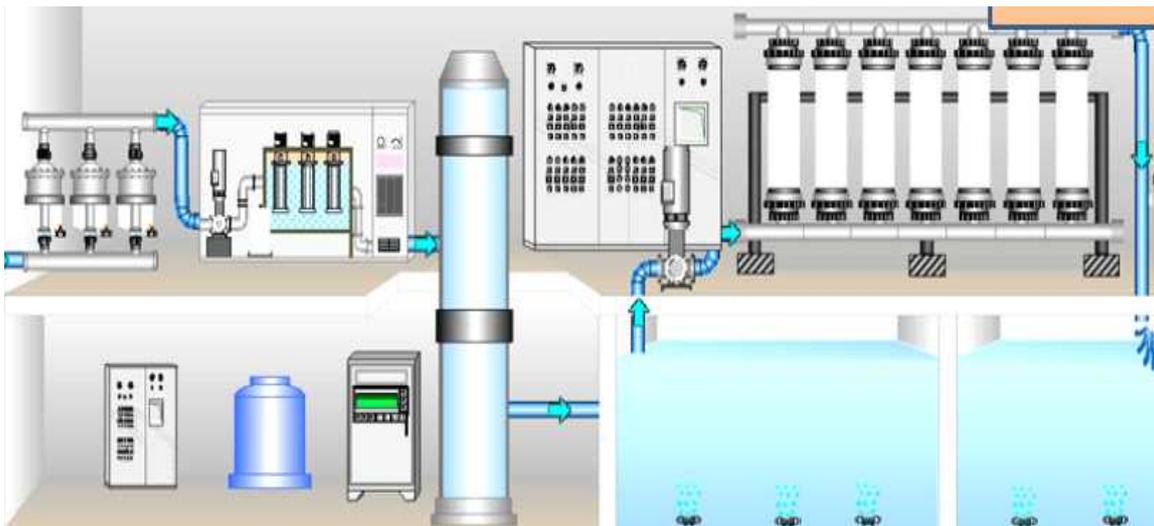


그림 5.14 ZT-타워 전처리 + 분리막 공법

(바) 기수담수화 처리공법 비교

ECRF (전처리+ 분리막 회석브랜딩 공법)는 저에너지 고효율 농업용수 생산에 적합한 공법으로 원수의 염분 농도에 따라 회석 배수를 다르게 하여 운전 하는 방법이고, 침지식 + RO 분리막 공법은 침지식 분리막을 전처리로 사용되는 방법으로 고농의 원수 부유물질에 강하며 막 수명이 길고 앞단의 전전처리가 필요 없으나 초기 시설비용이 매우 비싸 적용하기 어려운 것으로 도출되었다. 외압식 UF+ RO 공법은 설치 시 미관이 양호 하며 세척이 용하고 침지식에 비해 에너지 효율이 우수하나 고농도 부유물질 유입 시 전전처리가 제대로 이루어지지 않으면 운영하기 어려운 것으로 도출되었다.

표 5.2 기수담수화 처리공법 경제성 (염분1,500ppm)

구 분		ECRF 분리막 혼형 1	침지식UF + RO 분리막 2	외압식 UF + RO 분리막 3
초기투자비 (5,000 톤/day 기준)	기계시공비	3,450,000,000원	4,850,000,000원	3,920,000,000원
유지관리비 (년간)	전력비	32,514,300원	91,253,000원	83,747,273원
	약품비	13,667,435원	19,951,425원	37,264,560원
	소모품비	89,986,667원	206,706,667원	145,040,000원
	계	136,168,402원	317,911,092원	266,051,833원
단가(원) / 톤		76	177	148

세가지 공법을 비교해보면 초기 투자비는 ECRF 분리막 혼형 3,450,000,000원 침지식 UF + RO 분리막 4,850,000,000원 외압식 UF + RO 분리막 3,920,000,000원으로 도출 되며, 유지관리비는 전력비, 약품비, 소모품비를 각각 합산한 금액은 ECRF 분리막 혼형 연간 136,168,402원 , 침지식UF + RO 분리막 외압식 연간 317,911,092원, 외압식 UF + RO 분리막 266,051,833원 금액으로 결과를 도출 하였으며 마지막으로 각각 공법의 톤당 단가를 살펴보면 ECRF 분리막 혼형 76원, 침지식UF + RO 분리막 177원, 외압식 UF + RO 분리막 148원으로 도출되었다.

표 5.3 기수담수화 처리공법 비교 (염분 1,500ppm)

구분	ECRF 분리막 혼형	침지식UF + RO 분리막	외압식 UF + RO 분리막
공정도			
장점	<ul style="list-style-type: none"> 막 수명이 길고 시스템 구성이 간단하여 공정자동화가 용이 제거하고자 하는 오염물질 완벽하게 제거 원수의 수질변화에도 처리수 수질은 거의 일정 자동운전으로 유지관리가 용이하며 운영인력 최소화가 가능 부지면적 축소로 통한 잉여부지 활용가능 Chemical-less 시스템으로 회수율 향상을 통한 시설비 및 운영비 최소화 membrane분리막 + 회석공법으로 농업용수에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> 막 수명이 길고 시스템 구성이 간단하여 공정자동화가 용이 전처리 공정이 불필요 일반적으로 고농도 및 고점도 용액처리가 가능하여 하·폐수처리에 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 미관 양호하여 이미지 개선 효과 큼 모듈 형태 제품별로 유사하여 시스템제작이 용이 침지식에 비해 Flux 큼 대형화가 용이하며 공정자동화가 용이 세척이 용이
단점	<ul style="list-style-type: none"> 전처리가 필요 고농도 폐수 적용 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> 세정주기가 비교적 김 가압식에 비해 Flux 낮음 수중 설치로 미관 개선 효과 낮음 설치를 위한 넓은 부지 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 막의 장기 운전을 위해서는 과도한 전처리가 필요(설비비, 운전비용 상승) 막 오염으로 인한 빈번한 역세척, 공기세정, 펌프의 유속 증가 등으로 설비비 및 운전비용 추가 빈번한 화학세정으로 막성능 저하, 비용발생 및 환경오염 발생 등의 문제발생 운전조건이 까다로움 고농도 폐수 적용 어려움

표 5.4 상수도와 기수담수화 시스템 원예공급 비교표

구분	광역상수도 활용(안)	하천수 활용(안) (기수담수화 SYSTEM)	비 고		
시 설 개 요	<p>(광역상수도)-----> 온실</p> <p>↓</p> <p>일반원예단지(Q=2,900m³/일, 40ha)</p> <p>첨단유리온실로 공급</p>	<p>(Q=2,900m³/일, 40ha)</p> <p>하천수를 취수하여 기수담수화 시스템에서 재처리 후 원예용수 공급</p>	- 원예용수 염분 목표수질 250ppm		
장 점	- 평상시 안정적인 양질의 농업용수 확보 가능	- 목표수질에 적합한 최적의 농업용수 공급 가능 (염도 조절장치 설치로 회석수 이용 가능) - 상수도 대비 생산 원가 및 유지관리비가 낮아 경제적			
단 점	- 장래 화성시 인구증가로 지속적인 용수공급 여부 불확실 및 한발시 농업용수 단수 우려 - 초기 부담금(원인자 부담금, 배수지)이 크고, 유지관리비(상수도 요금) 과중 - 따라서 향후 농업용수 확보가 불확실하며, 국민 정서상 위배	- 하천수(유입수)의 안정적 수량 확보 필요 - 유입수 수질에 따라 유지관리비 상승 우려	-갈수량 : Q=11,255m ³ /일		
소 요 비 용	초기 시설비	3,457백만원 (원인자 부담금: 2,382, 배수지 부담금: 1,015, 관로설치비: 60)	3,156백만원(공사비: 2,871, 제경비: 2,500)		
	연 간 유 지 관 리 비	전력비	-	12백만원	
		약품비	-	21백만원	
		소모품비	-	4백만원	
		수도료	400mm/년×40ha×1,000원/m ³ =160백만원/년	-	
		운영 인건비	-	25백만원	
계	160백만원	62백만원			

2. 기수담수화 시스템 공정설계

가. 기수담수화 시스템 공정도

기수담수화 시스템 공정은 1차 ZT 타워 전처리 장치에서 입자성 부유물질 및 COD를 저감하며 MF 필터에서 콜로이드성 미세부유물질 제거 후 RO (역삼투) 막에서 이온 (NaCl)물질 제거되는 공정으로 각각의 농축수는 리사이클하여 운전되는 시스템이다.

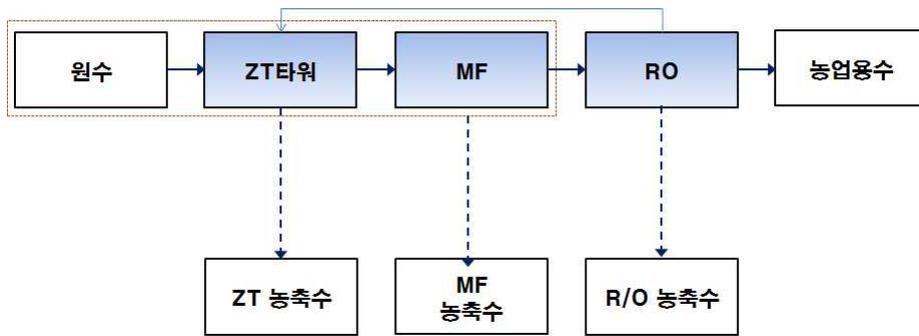


그림 5.15 기수담수화 시스템 공정도

나. 기수담수화 시스템 공정별 특징

기수담수화 시스템 공정을 구성하는 1차 유입 공급 시스템, ZT-타워 전처리 시스템, MF 필터, 그리고 RO 분리막 등의 공정별 특징 및 사양을 정리하면 다음과 같다.

(1) 1차 유입 공급 시스템

- ① 극미세 제너레이터 펌프 (3마력)으로 극미세 버블 발생 동시 공급한다.
- ② 유입펌프 제어 판넬 (ON/OFF) 제어방식이다.

(2) ZT-타워 전처리 시스템

- ① 제타전위를 이용한 초고속 응집/분리 전처리 시스템은 순간 응집제가 라익믹스 되어 초고속 응집 복합형성 및 분리 부상
- ② 1차 입자성 부유물질 및 COD 저감 효과

(3) MF 필터

- ① 카트리 타입 FILTER(150 mm * 1,000 L)으로 실시간 여과한다.
- ② 2차 콜로이드성 미세부유물질 탁도 제거 하여 후단 RO 분리막의 부하량 감소 효과를 가져 온다.

(4) RO 분리막

- ① 분리 RO막 스킴드는 하루 4톤 생산하는 막으로 저압력식이다.
- ② 이온성 물질인 Na, Cl을 제거하여 농업용수 250 ppm 이하 공급이 목적이다.

다. 초고속 응집·분리 전처리 시스템

(1) 응집 메카니즘

응집을 위해 완속/급속 체류조가 필요하며 또한 급 응집을 위해서는 환경적 요소가 필요하다. 온도, pH, TOC (유기물)에 따라 15~30분간 혼합하여 SS, TP을 제거 할 수 있는 방법 등이 있으나 긴 접촉을 위해 체류조가 필요하므로 초기 부지면적이 커지므로 비효율적이다. 또한 느린 처리 속도로 많은 물량을 처리하기 어려운 단점이 있다. 그러나, 본 초고속 응집 전자유도 모듈기술은 장치 내부에 벤츄리 구조로 액체의 용해효율을 높일 수 있는 형태로 구비되어 있으며 좌측에서 우측으로 액체가 유입되면서 관을 통과한다. 이때 위쪽 밸브에서 관내부로 응집제를 유입수 조건에 따라 일정량 흡입되면서 전자 유도 촉매 단자로 혼합·유입된다. 응집 전자 유도촉매는 +, - 배열 정렬에 의해 유입수 콜로이드 입자가 천연 응집제와 결합하여 극미세기포 응집복합체를 형성하게 된다. 유입수가 초고속 응집 전자유도 촉매 모듈 내부로 유입시 순간 천연 응집제를 주입하면 부유물질은 응집제와 극미세버블과 결합하여 응집 및 부상 되어 처리된다. 그리고 수중의 인은 불용성 화합물로 만들어 제거하는 방법이다. 본 기술은 부유물질을 제거하는 전처리 기술이다.

마이크로버블을 이용하여 부유물질 제거 하는 경우, 일반적으로 가압부상 방식을 많이 사용하고 있다. 가압부상 원리는 물 분자가 클러스터 형태로 응집되어 있는 것이 일반적이다. 클러스터 상태의 물은 운동에너지가 낮고 분자운동에 의한 마찰에너지의 발생도 없는 상태이다. 전기장장치로 물분자를 구성하는 수소원자에 자기 모멘트를 가하여 회전 운동시 킴으로써 물분자 클러스터를 쪼개어 물분자 사이에 공극을 형성하게 한다.

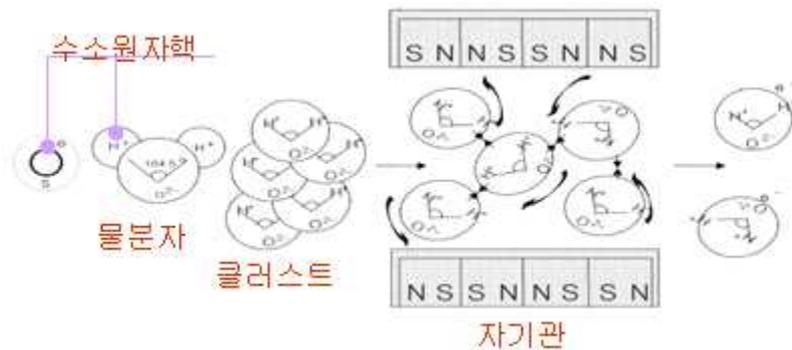


그림 5.16 (+) 전하 (-) 전하 물 클러스터

공기가 공기 이온화장치의 (+) 전극판과 (-) 전극판을 거치면서 일정 전하를 띠는 이온화 공기를 형성시켜 ZT 제너레이터와 극미세 버블 펌프를 이용하여 일정 공극을 형성하고 있는 활성수에 주입시키며, 공기 혼화장치를 통해 이온화 공기를 활성수에 용해시켜 활성 용해수를 생성한다.

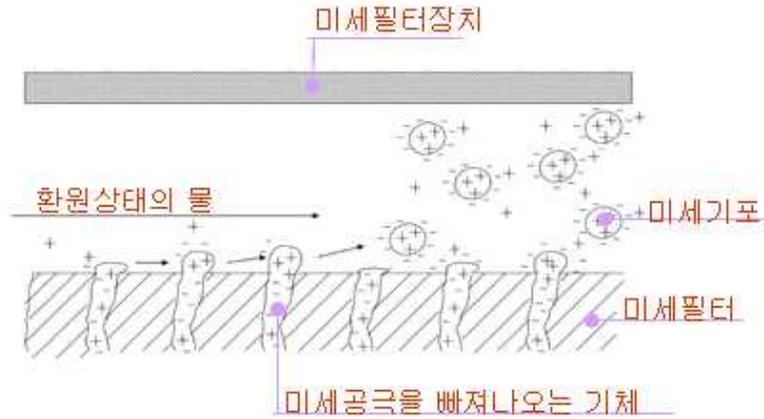


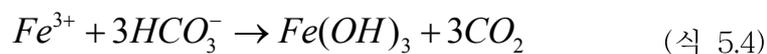
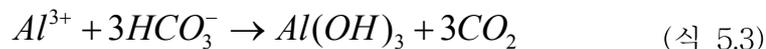
그림 5.17 극미세 기포와 활성 용해수

생성된 활성 용해수는 가압을 통해 2차 혼화·용해되어 짧은 시간에 보다 많은 공기를 용해시켜 활성가압수를 생성하게 된다. 전기장 장치는 활성 가압수 안에 포함된 오염물질에 강한 전압을 통한 전기장을 통해 제타 변위를 변화시켜 오염물질을 응집시켜 플록화 되도록 한다. 분사장치의 일정 압력 하에 활성가압수가 수중으로 분사되면서 압력차에 의해 용해되어 있는 이온화 공기가 일정 전하를 띠는 활성미세기포로 용출되면서 플록화된 오염물질 및 수중 부유오염물질을 수면 위로 부상시킨다.

응집제 이용하여 인을 제거하는 경우, 응집제로서는 일반적으로 금속염이 많이 이용된다. 금속염 응집제로서는 황산반토[Al₂(SO₄)₃ · 18H₂O], 폴리염화알루미늄(PAC)[(AlCl₃)_n], 알루미늄산 소다[NaAlO₃], 염화제2철[FeCl₃], 황산제1철[FeSO₄], 황산제2철[Fe₂(SO₄)₃] 등이 있는데, 주로 황산반토(Alum), 염화제2철 및 PAC가 주로 이용되고 있다. 처리 대상수에 알루미늄염이나 철염 등의 금속염을 첨가하면, 수중의 올트린산 및 축합인산은 금속염과 반응하여 다음 식과 같이 난용성 염을 생성한다.



또, 금속염은 동시에 수중의 중탄산염과 반응하여 다음의 식과 같이 수산화알루미늄 및 수산화철의 플록을 형성한다. 인은 이것에 의해서도 흡착제거 된다.



금속염은 종류에 따라 최적 응집 pH가 다르며, 알루미늄염의 경우는 pH 6 전후, 철 염의 경우는 pH 5 전후이다. 인산염을 형성하기 위한 PO₄³⁻와 Al, Fe의 몰비는 이론적으로는 1이지만, 위와 같이 수산화물도 형성되어 Al, Fe가 소비되므로 몰비를 1보다 크게 하지 않

으면 인 제거율은 향상되지 않는다.

한편, 황산반토(Alum) 첨가에 의한 슬러지 발생량은 다음과 같이 계산한다.

$$W = \frac{P}{31}[122 + 78(n-1)] \quad (\text{식 5.5})$$

- W : 발생 슬러지 양(g/m^3 처리수)
- P : 인 농도(mg/L)
- n : Al/P 몰비
- 122 : 형성되는 인산알루미늄의 분자량
- 78 : 형성되는 수산화알루미늄의 분자량
- $n = 2$ 의 경우 $W = 6.45 \cdot P$

(2) 응집제와 극미세버블 관계

응집처리에 있어서 가장 중요한 조작인자는 응집제의 주입율이다. 지금까지 황산반토를 이용한 인 제거 실적은 많은 대부분 유량비례에 주입 방식을 많이 채택하고 있다. 황산반토의 정량 주입방식도 생각할 수 있지만 어떤 방식이든 Al/P 몰비를 3 정도로 설정하면 원수 중의 인 농도 시간 변동에 대응 가능한 안정된 처리가 이루어진다. 또한 초고속 부상은 수중의 콜로이드나 고형물 입자를 타워 모듈 구조 방법으로 급부상 시켜 제거하는 방법으로서 분리기술의 단위조작임과 동시에 콜로이드성 입자의 선별·분리, 용질의 분별에 응용되는 중요한 단위조작의 하나이다. 부상하는 콜로이드 입자에 안정적인 극 미세기포를 붙여 순간적 많은 버블이 부상 속도를 현저하게 빠르게 할 수 있다. 또한 타워 모듈 구조 설계로 액체가 시계방향으로 돌면서 상승하여 대류(재부상)현상을 없이 일정하게 부상시킬 수 있으며, 이 방법은 일반적으로 부유물질을 마이크로 버블로 가압부상 시키는 방법이나 또는 현탁 입자의 농축에 있어 침강시키는 방법보다 분리 속도를 크게 할 수 있는 경우가 많다.

초고속 응집 부상분리법에서 중요한 것은 빠른 응집 반응과 초고속 부상분리, 안정적 미세 버블량의 문제이다. 콜로이드성 유입원수에 다수의 극미세버블을 발생시키면, 그것이 입자에 +, - 정렬 배열 상태로 미세버블에 부착하고 버블자체 부력에 의하여 상승한다. 극 미세버블과 밀 입자간의 접촉부착의 메커니즘은 다음과 같다. 버블과 버블 사이에 안정적 부착력으로 계면장력에 의한 분자간 인력이다.

극미세버블은 물에 공기를 압력 약 $2.5 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ 로 용해시켜(공기용해수), 상압으로 복원시키면서 처리수와 혼합하는 방법이며, 일반적으로 처리수에 대한 공기용해수의 첨가량은 약 30%(보통, 물은 오수처리수가 쓰이며, 이때 물은 순환하게 되므로 원수유입량에 대한 순환 처리수량의 비를 순환비라 하며, 이때의 순환비는 약 30%가 된다.)정도이다. 극미세버블 ZT 제너레이터 부상분리법의 특징은 첫째, 부스터 개념의 극미세버블에 의하여 부상속도를 크게 함으로써 설비를 작게 할 수 있고, 둘째 ZT 제너레이터 부상분리에서 침강과 부상의 경계에 있는 물질을 분리하고, 셋째 위의 두 항의 효과를 올리기 위한 초고속응집유도장치, 그리고 넷째 분리효과를 높이기 위한 응집제의 주입 등이다.

가압수의 용해공기량 측정은 용해조 설계에 필요인자이다. 공기의 가압 용해는 Henry 법칙에 따르나, 용해장치의 형식, 용해시간, 액 성상 등에 따라 포화용해량이 변화한다. Henry

법칙에 의하면 용해공기량은 압력 및 온도에 관계된다. 방출되는 공기량은 가압 상태하의 용해량과 대기압하의 용해량의 차이므로 이론적으로 다음 식이 성립한다.

$$V_G = C_{so}(P-1) \quad (\text{식 5.6})$$

위 식에서 C_{so} 는 대기압하의 공기포화농도(mg/L), P 는 가압수 압력(atm), V_G 는 가스 방출량이다. 실제로 가압수로 사용하는 물에서 방출 가스량을 측정된 결과를 아래 그림과 같이 작성하고, 이론 방출 공기량과 비교하여 분석하여 본다. $\beta = P_0/P_1$ 라면, 실측치의 관계식은 다음 식과 같이 표시된다.

$$V_G = C_{so}(P-1) \quad (\text{식 5.7})$$

각종 처리 원수에 대하여 β 값을 구해두면 일일이 실험할 것 없이 위 식을 이용하여 방출 공기량을 구할 수 있다.

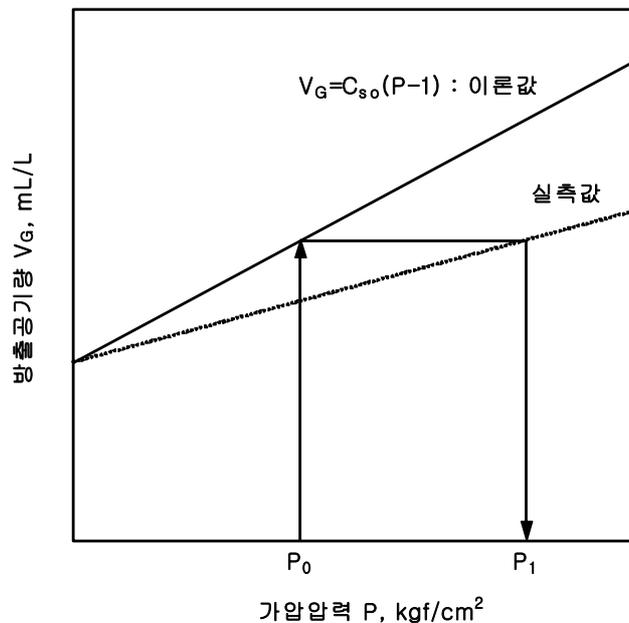


그림 5.18 압력과 실제 방출공기량과의 관계

라. 정밀여과

가. 기 능: 물속에 용존된 부유물질 및 탁도 제거용으로 사용된다.
원수의 부유물질을 제거하는데 탁월한 효과가 있다.
주기적으로 교체하여야 한다.

나. 특 징: 필터의 교체가 쉽다.

여과 미크론을 선택하여 관리 할 수 있다.
심층 여과능력을 최대한 발휘

다. 용 도: R/O 순수기 전처리용

라. 경제성: 설치비가 저렴하고, 설치면적이 적다.
조작이 간편하고, 휠타 교환이 쉽다.
여과능력이 크고, 저항이 적다.

마. 타입 및 부대시설 : ELEMENT HOUSING OR BAG 형 FILTER, 전면배관, 입/출구 압력계 1조, 입/출구 샘플 콕 1개, 용량은 R/O생산량을 충분히 충족되어야 한다.

마. 역삼투압

(1) RO UNIT의 구조

RO 멤브레인은 설비의 회수율, 현장의 공간, 장비 규모 등을 고려한 특성을 가지고 있다.

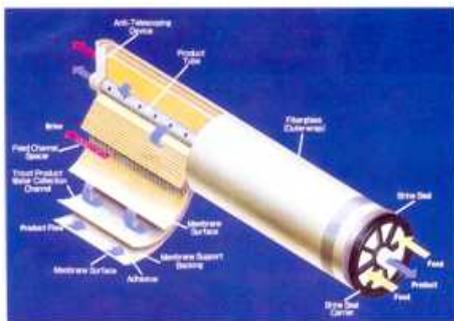
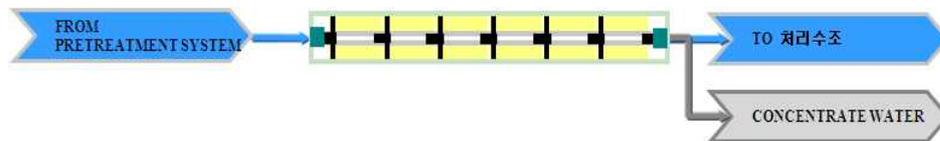


그림 5.19 RO 멤브레인 구조 및 설치

- ① MEMBRANE ELEMENT는 지지층 (두께 약 60 μm)과 활성층 (두께 0.2~0.8 μm) 으로 구성되어 있다.
- ② 운전형태는 외압식 운전으로 원수가 막 외부로 유입되어 처리수가 내부로 흐르도록 한다.
- ③ 모듈은 위 그림과 같이 각 모듈이 평행 또는 수직으로 이루고 일정한 간격을 이룰 수 있도록 배열하되 필요에 따라 개별운전이 가능하도록 설치하고, 모듈의 유지보수 시 장착과 탈착이 용이한 구조로 설계, 설치되어야 한다.
- ④ 유입수, 처리수, 농축수 라인에 압력전송계를 설치하고, RO 모듈로 인입되는 배관과 농축수 배관에 압력 조절 밸브를 달아 시스템을 조정할 수 있도록 한다.
- ⑤ MEMBRANE교체시 VESSEL 외부로 꺼내기 용이토록 RO SKID 좌우로는 배관이 형성되지 않도록 설계해야 한다.

- ⑥ 배관의 재질은 내약품성, 내미생물 침식성을 갖는 소재의 재질로 설계한다.
- ⑦ SKID의 FRAME의 재질, 크기, 형태는 막 모듈과 헤더 배관 등이 견고하게 장착될 수 있는 구조가 되도록 고려하여 설계해야 한다.
- ⑧ RO UNIT에 부착된 모든 배관과 VALVE, 유량계 등의 계장품은 내구성을 가진 재질을 선정하고, 시스템에 적절한 요소로 구성한다.

(2) 역삼투압 (RO) 장치

원수중의 이온성분, 무기물, 유기염류, 광물질, 미세입자, PYROGEN 등을 제거하여 염분 없는 물을 만들며, MEMBRANE은 FILMTEC, OSMONISIS등의 제품으로 VESSEL은 300PSI 8040 VESSEL을 사용하며, VESSEL의 IN/OUT PORT는 SIDE PORT TYPE 이다. 또한 VESSEL의 재질은 FRP, 각 VESSEL의 생산수 OUTLET은 CLEAN PVC 또는 SEAMLESS SUS TUBE이 있다.

(3) 재질구성

- ① 모듈본체 : FRP
- ② MEMBRANE : PA
- ③ 스킴드 프레임 : C.S + EPOXY
- ④ 내부 배관 : STS304 + PVC
- ⑤ BUTTERFLY VALVE : STS304
- ⑥ 제어 판넬

(4) 설치방법

설치 방법은 배관공사 경우 각 구성기기 간의 필요한 배관을 설치하며 필요시 배관공사 작업운전 시 수력학적 부가하중 및 불평형력, 진동 발생 등을 고려하여 충분히 지지될 수 있도록 기초 BOLT등을 견고히 설치하도록 한다. 벽 구조물과 300 mm 이상 떨어져 설치하며, 운전 감시 및 보수 점검의 용이성, 안전성, 합리성을 감안하여 능률적이 되도록 설치하며 필요시 위험 방지 장치 등을 설치한다.

3. 기수담수화 시스템 PILOT PLANT 제작 및 적용

가. 기수담수화 시스템 PILOT PLANT 제작

(1) PILOT PLANT 용량계산 사양

(가) 용량 계산 유입, 전처리, 후처리 수질 조건

PILOT PLANT 설계 및 제작을 위한 초기조건을 용량 계산과 유입, 전처리, 그리고 후처리 수질 조건은 다음 표와 같이 설정하였다.

표 5.5 PILOT PLANT 전처리/ 후처리 수질 설계 조건

구 분		유입 (원수)	전처리	후처리
			ZT-타워 + MF 필터	RO
SS	mg/L	30	1	0.01
탁도	NTU	15	0.5	0.01
COD	mg/L	10	3	1.5
BOD	mg/L	10	3	1
TN	mg/L	10	7	5
TP	mg/L	3	0.1	0.02
EC	$\mu\text{s}/\text{cm}$	2,000이하	-	50
pH		5~8	5~8	5~8
대장균	개/mL	3,000	30	무 검출

PILOT PLANT 유입 설계조건 원수 SS 30 mg/L 일 때 전처리공정인 ZT타워 + MF 필터는 1이하 이며 후처리 생산수는 0.01 mg/L 이다. 유입수 탁도는 15 NTU이며 전처리 공정에서 0.5mg/l 이하 처리되어야 후처리 공정인 RO 멤브레이 부하량 없이 이온성 물질을 처리할 수 있다. COD 원수 유입농도는 10 mg/L 이며 전처리공정 처리시 3mg/L 이하로 처리되며 후처리 공정인 멤브레인에서 1 mg/L 이하로 처리 된다. 특히 염분제거에 있어 원수 EC 농도 2,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이하 이며 후처리 공정 RO 멤브레인에서 50 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이하로 처리된다. 또한 대장균은 전후처리 공정 시 살균 및 필터링 되므로 무 검출 된다.

(나) 전처리 ZT-타워 설계계산

- 설계유입 유량 기준 : 15 m³/일
- 체류시간 : 30초 이내
- 유효용적 : 15 m³/일 × 1일/1,440분 × 0.5분 = 0.005m³
- 설계용량 : 0.005 m³
- : 0.005 m³ ÷ 1.5 m = 0.003 m² (타워 모듈 면적)

위와 같은 초고속 응집 공정과 부상분리 공정 설계를 위한 계산식으로 원수유입→초고속 ZT 제너레이터 촉매 모듈장치에서 타워형 부상분리조로 연결되는 공정이며 이때 순간 라인 믹스 되어 초고속 유도 전자 응집 촉매 모듈 혼합 응집 반응 시간이 0.3초 이내 응집 반응이 일어난다. 부상분리공정은 응집된 원수를 초고속 부상분리 타워조에서 빠르게 부상 시키며 상부에 부상스컴 저류조 (OVER FLOW) 되어 고품 농축수는 외부로 처리된다. 원수유입 되면 타워 하부 상단부에서 처리수 다음 공정의 수조로 보내어진다. 타워 규격은 W 300 mm × H 1300 mm 크기며 처리 시간은 30초 이내 처리된다.

(다) 전처리 MF FILTER 설계계산

- 처리용량(Q) : 10 m³/d
- 가동시간 : 24 hr/d
- * 부유물질 유입조건
- 유입수 SS : 3~5 mg/L 이내
- 처리수 SS : 0.5 mg/L 이내
- 24hr 연속운전이며, LEVEL "H"에서 ON, LEVEL "L"에서 OFF
- Train 당 처리용량 (Flow Rate per Train) : 10 m³/d /24 hr = 0.4 m³/hr
- 여과능력(막 표면적당 처리유량) : 0.065 m³/m²/hr
- 필요여과면적 (A) = $\frac{0.54\text{m}^3/\text{hr}}{0.065\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}} = 8.4\text{m}^2$
- Module 1개 당 유효 막면적 (A) = 50 m²/ea
- 필요 Module 수 $L_{re} = \frac{A_{re}}{A} = \frac{8.4\text{m}^2}{50\text{m}^2/\text{ea}} = 1\text{ea}$
- 총 실제 설계 Module 수 (Na) : 1ea

* 여과면적 검토 (필요여과면적 < 실제여과면적)

$$8.4\text{m}^2 < 50\text{m}^2 \quad \text{OK}$$

$$\text{- 여과 Flux,s} = \frac{0.54\text{m}^3/\text{hr}}{50\text{m}^2} = 0.0108 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hr}$$

- 여과 Flux 검토 (여과능력 < 여과 Flux)

$$0.065\text{m}^3/\text{m}^2/\text{hr} > 0.0108\text{m}^3/\text{m}^2/\text{hr} \quad \text{OK}$$

ZT-타워 모듈 장치에서 1차 처리후 MF 필터는 2차 미세 부유물질 및 탁도를 제거하기 위한 공정으로 위와 같은 처리를 위해 처리용량 설계 계산식을 유도하였다.

< 이온막 설계 계산 >

- 유입수량 = 12m³/d
- 처리수량(Q) = 4m³/d
- 여과기 가동시간 = 24hr/d
- * 유입수 CONDUCTIVITY 조건
- 유입수 COND. = 2,000 $\mu\text{s/cm}$ 이내, 처리수 COND. = 250 $\mu\text{s/cm}$ 이하
- 가동조건 : 24HR 연속운전이며 LEVEL "H"에서 ON, LEVEL "L"에서 OFF
- 처리용량 (Flow Rate per Train) 9.6 m³/d = 0.4 m³/hr
- 여과능력(이온막 표면적당 처리수 유량) = 52 $\ell/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 이하
- 필요여과면적(Are) = 7.7m²이상 (A) = 7.9m²/ea
- 이온막 1개 당 유효 막면적
- 필요 이온막 수 (Nre) = $\frac{A_{re}}{A} = \frac{7.7\text{m}^2}{7.9\text{m}^2/\text{ea}} = 1\text{ea}$ 이상
- 총 실제 설계 이온막 수 (Na) = 1ea
- 실제 여과면적(Aa) = Na × A = 1 ea × 7.9 m²/ea = 7.9 m²
- 막면적 검토 → 필요막면적 < 실제막면적 → 4595.9 m² < 5128.08 (OK)
- 처리수 Flux,s = 0.4 m³/hr / 7.9 m² = 0.0507 m³/m² · hr
- 처리수 FLUX 검토 → 처리능력 > 처리수 FLUX → 0.052 m³/m² · hr > 0.0507 m³/m² · hr (OK)

후처리 과정으로 이온성 물질인 Na, Cl 성분을 제거하기 위해 필요한 RO 멤브레인 설계 용량 계산식은 유입수량 12 톤/일 처리수량 1 톤/일 회수율 30 % 저용량 설계 되었으며 유입수 EC 2,000 $\mu\text{s/cm}$ 에서 처리수 EC 250 $\mu\text{s/cm}$ 이하 생산된다. 현재 세계적인 RO 형태는 크게 3가지로 구분되는데 가정용 음용수로 사용하고 있는 작은 멤브레인과 파일럿 실험 및 저용량 (4~10 톤/일)생산을 위한 RO는 4인치 멤브레인과 산업용 대량 타입은 8인치 멤브레인으로 (100~10,000 톤/일) 사용된다. 따라서 현재 저용량 생산을 위한 타입으로 설계에 적용하였다.

(2) PILOT PLANT 공정도 및 제작도면

PILOT PLANT FLOW Sheet를 보면 원수 탱크의 물을 압송하여 ZT타워로 이송하여 처리와 동시 응집제를 동시 라인 믹싱 되며 처리수는 MF 필터로 여과 후 RO 멤브레인 분리막에서 최종 처리하여 농작물로 공급한다.

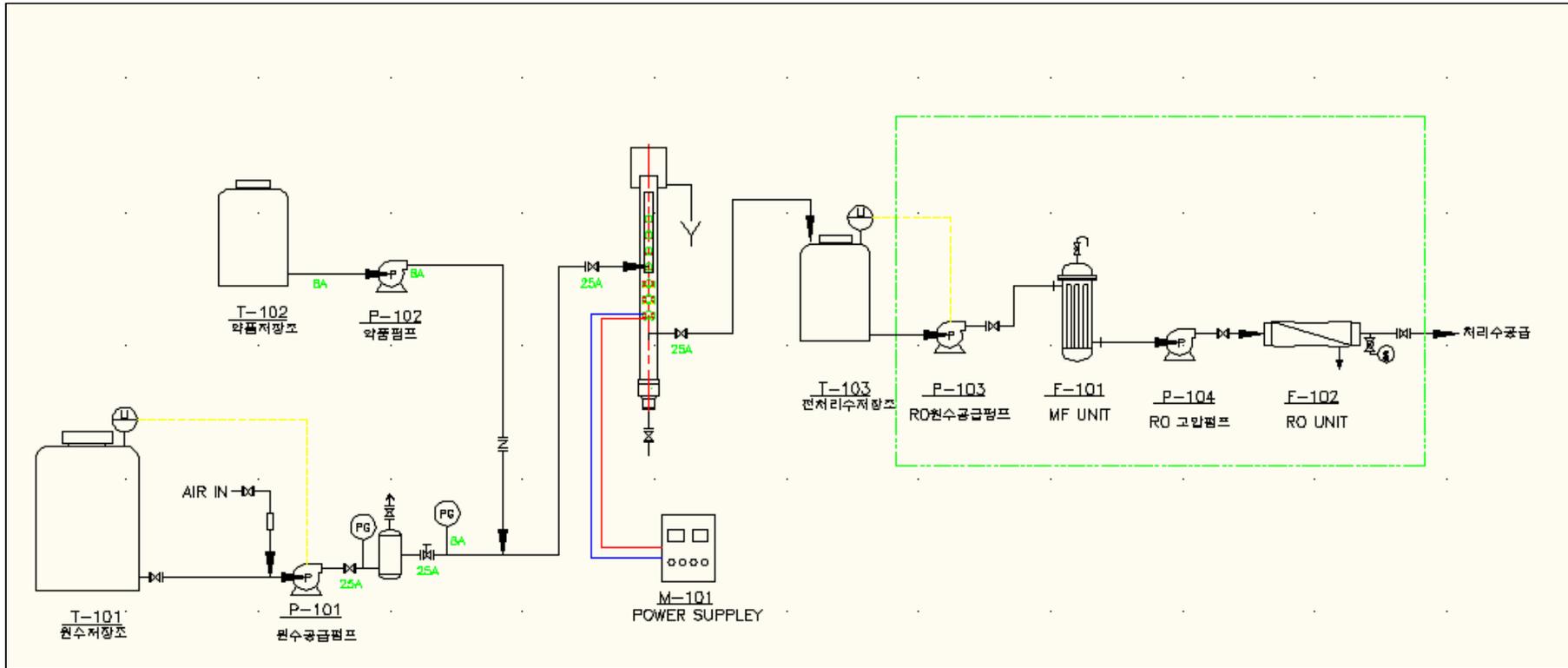


그림 5.20 PILOT PLANT 공정

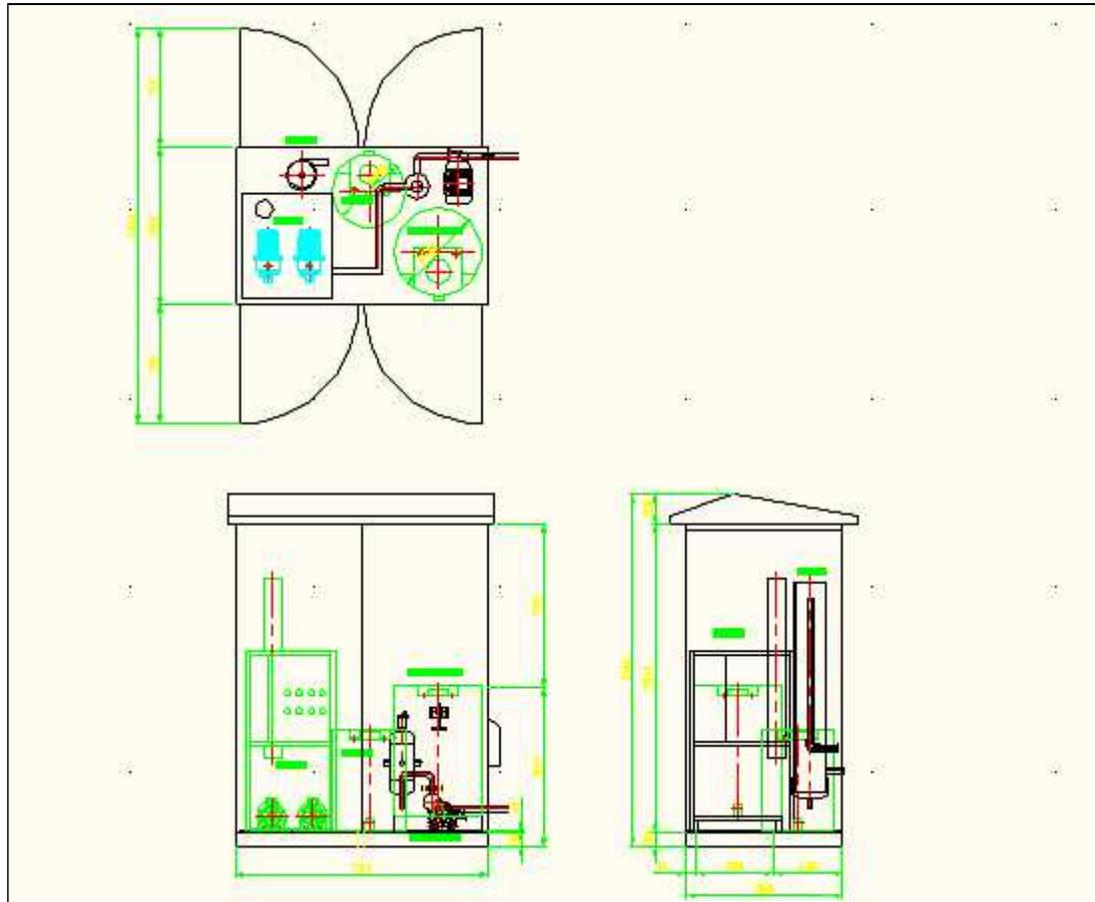


그림 5.21 PILOT PLANT 도면

(3) PILOT PLANT 시스템의 구성품
 제작된 PILOT PLANT 시스템의 구성품은 다음 그림과 같다.



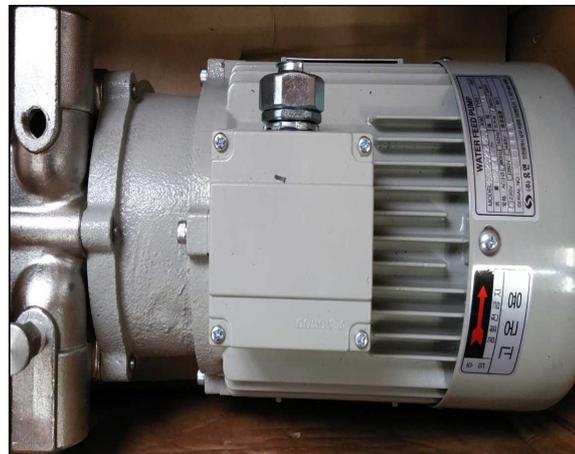
ZT-A 기수담수화 시스템 외형1



ZT-A 기수담수화 시스템 외형2



ZT-제너레이터 촉매



마이크로 버블 제너레이터 펌프



상부 타워 커버



밸브 A

그림 5.22 PILOT PLANT 시스템의 구성품



밸브 B



정량 펌프



PVC 엘보



유니온



ZT-A 부상 분리 타워



기체용해 탱크

그림 5.22 PILOT PLANT 시스템의 구성품 (계속)



약품 탱크



마이크로 필터 하우스



RO 공급 펌프



RO 베셀 및 멤브레인



RO FEED 펌프



RO 제어반 및 베셀 설치

그림 5.22 PILOT PLANT 시스템의 구성품 (계속)

나. 기수담수화 시스템 PILOT PLANT 실험

(1) 극미세버블 실험 및 테스트

1차 전처리를 위한 초고속 분상분리 타워 촉매 모듈에 의해 발생된 기포의 사이즈를 측정하기 위해 타워 내에 극미세버블을 생성시키고 일정시간 경과 후 타워 위로 올라오는 기포를 SEM 분석하였다. 분석으로 기포의 직경 및 부상속도를 측정하였다. 한편, 수중에서 기포는 밀도차에 의해 어느 정도의 상승속도를 갖게 된다. 기포의 체류시간은 용해효율에 크게 영향을 미치게 되며, 기포의 입자가 작으면 작을수록 수중에서의 체류시간은 길어지며 그만큼 용해효율은 증가하게 된다. 입자의 운동 방정식은 기포의 경우, 관성력=부력-중력-저항력(마찰력)으로 나타나며 다음과 같이 정의 된다.

$$V_p \cdot \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} = V_p \cdot \rho_w \cdot g - V_p \cdot \rho_p \cdot g - \frac{1}{2} C_D \cdot A_p \cdot \rho_p \cdot v^2 \quad (\text{식 7.8})$$

기포의 직경을 d_p 라 하면,

$$\frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_w \cdot g - \frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot g - \frac{1}{2} C_D \cdot \frac{\pi d_p^2}{4} \cdot \rho_p \cdot v^2 \quad (\text{식 7.9})$$

wherein, v = terminal velocity, m/sec

ρ_p = mass density of particle, kg/m³

ρ_w = mass density of fluid, kg/m³

g = acceleration due to gravitation, 9.81 m/sec²

d_p = diameter of particle, m

V_p = volume of particle, m³

A_p = sectional area of particle, m²

C_D = dimensionless drag coefficient

그리고, drag coefficient C_D 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} 1 > R_e : C_D &= \frac{24}{R_e} = \frac{24\mu}{v\rho_p d_p} \\ 1 < R_e < 1,000 : C_D &= \frac{24}{R_e} + \frac{3}{R_e^{0.5}} + 0.34 \text{ or } = \frac{18.5}{R_e^{0.5}} \\ R_e > 1,000 : C_D &= 0.34 \text{ to } 0.40 \end{aligned} \quad (\text{식 7.10})$$

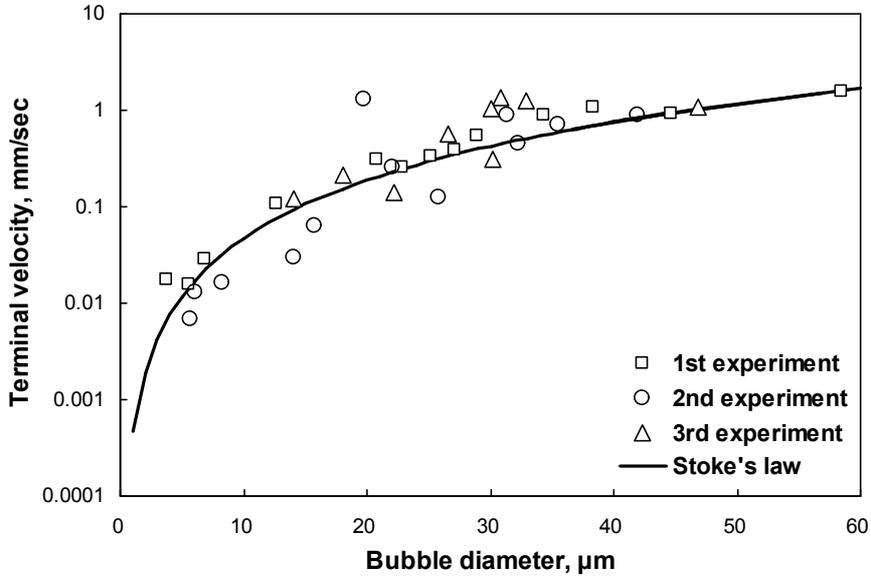


그림 5.23 극미세버블의 직경과 종단속도와의 관계

기포의 운동방정식을 이용하고 기포의 여러 가지 직경에 대한 점성저항, 관성저항을 고려하여 종단속도에 이를 때까지의 시간 등을 구하여, 실험에서 얻어진 값과 비교하였다. 또한, SEM 분석을 통해 균일하고 연속성 있는 극미세버블 발생을 확인할 수 있었다.

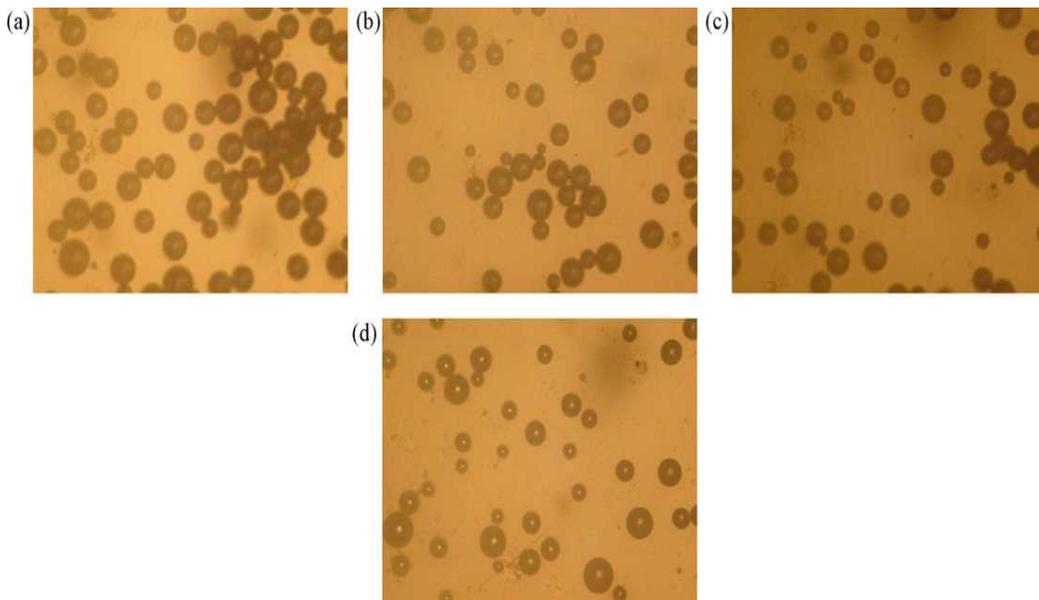


그림 5.24 SEM 분석한 극미세버블 입자

극미세버블 입자의 분포를 조사하기 위해 레이저빔을 이용한 입자분석기를 이용하여 버블 입자의 분포를 조사하였다. 극미세버블 입자 측정에 사용한 장비는 ANKERSMID사 (네덜란드)의 "Eye Tech"를 이용하였다. Eye Tech는 고속회전하는 레이저빔이 샘플중의 각각의 입자를 스캔하여 레이저빔이 입자에 의해 차단되면, 오토다이오드 검출기의 수광량이 감소하고 전압전하가 발생한다. 레이저빔 스캔속도가 일정하기 때문에 차단된 시간에 의해 직접

입자의 크기를 측정한다. 측정범위는 0.1 μm~3,600 μm이고, 펄스파 형태분석에 의해 입자중심을 벗어나거나 레이저빔 밖을 통과한 경우, 데이터는 제거되기 때문에 고정밀도의 분석이 가능하다. 분석시간은 2초간 측정하였으며, 극미세버블을 지속적으로 발생시키면서 측정하였다. 마이크로버블 측정에 있어서 버블생성 후 일정시간이 경과하게 되면 거대 버블은 부상으로 사라지고, 작은 사이즈의 버블만 남게 되어 정확한 사이즈 측정이 어렵다. 따라서 버블을 연속적으로 발생시키면서, 짧은 시간에 측정할 수 있어야 정확한 측정이 가능하다.

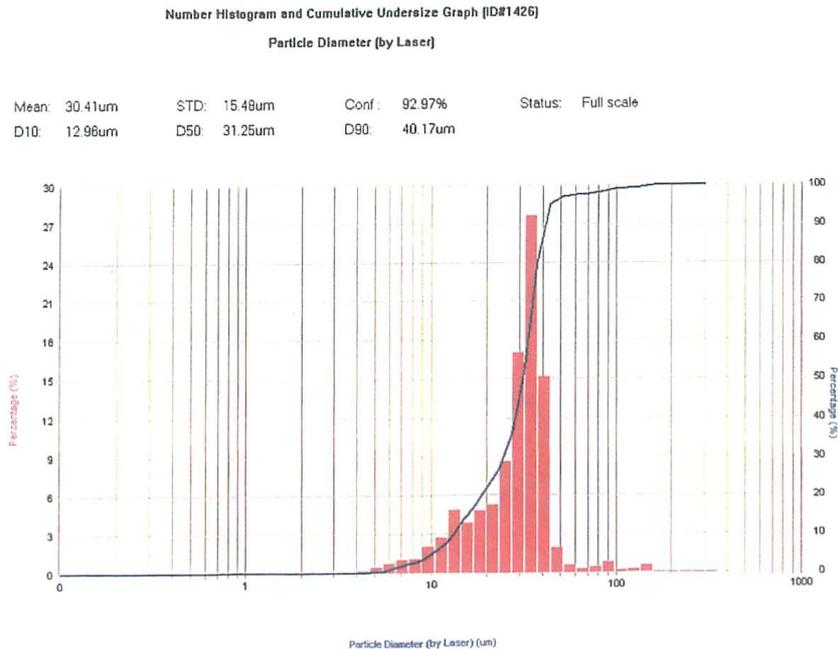


그림 5.25 레이저빔에 의한 극미세버블 사이즈 측정

분석결과는 기체용해탱크의 가압압력이 3 kg_f/cm²인 조건에서 생성된 마이크로버블 사이즈 분포를 나타낸 것이다. 레이저빔을 이용한 분석결과에서 전체 발생량의 10 % 정도가 10 μm 이하이고, 전체 발생량의 50 % 정도가 30 μm로 조사되었으며, 40 μm 이상의 입자 크기는 전체의 10% 미만인 것으로 조사되었다. 평균 입자사이즈는 30 μm로 조사되었다.

한편, 압력변화에 따른 마이크로버블 입자 사이즈 변화는 자유에너지의 변화를 기초로 설명할 수 있으며, 실제 관찰에서도 그 변화가 관측되었다. 예를 들어, 공기로 포화된 액체로부터 반경 r에서 생성된 한 개의 구형기포가 이상기체 법칙을 따르며, 또한 Henry의 법칙이 용존공기량과 공기의 분압에 적용된다고 가정하면, 그 압력이 용존압력(P_a)에서 대기압(P₀)로 감소될 때 그 기포표면의 자유에너지의 변화는 Gibbs와 Ward에 의해서 다음과 같이 주어진다. 기포의 직경이 커질수록 자유에너지의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 너무 큰 압력변화는 상대적으로 큰 기포를 생성시킬 수 있는 가능성이 높은 의미이기도 하다.

$$\Delta F = \sum_i N n_i (C n_i - C l_i) - (P n - P l) V_a + \sigma A$$

$$= (P_0 + 4\rho / d_b) \cdot \frac{1}{6} \pi d_b^3 \cdot \ln \left(\frac{P_0 + 4\rho / d_b}{P_A} \right) + \frac{1}{3} \pi d_b^2 \cdot \sigma \quad (\text{식 7.11})$$

ΔF	: 자유에너지(erg)	σ	: 표면장력(dyne/cm ²)
V_a	: 표면적(cm ²)	d_b	: 기포의 반경(cm)
N	: 몰수	d_{bc}	: 기포의 임계경(dyne/cm ²)
C	: 몰의 화학적단위(erg/mole)	N	: within bubble
γ	: 계수	l	: liquid after bubble nucleation
P_o	: 대기압(dyne/cm ²)	i	: i component
P_a	: 용존압력(dyne/cm ²)		

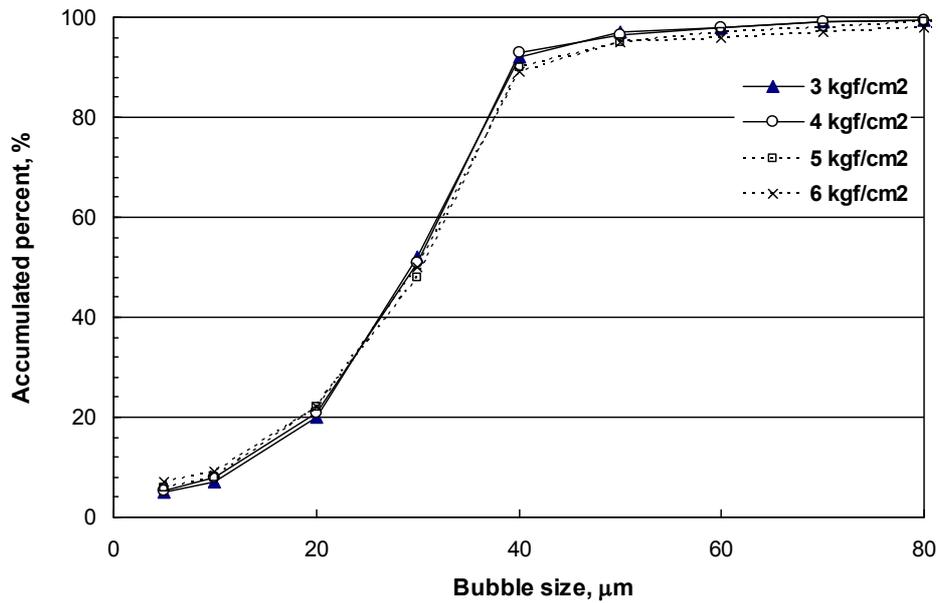


그림 5.26 압력변화에 따른 마이크로버블 사이즈 변화

압력변화에 따른 마이크로버블 입자 사이즈 분포 변화를 나타낸 것이다. 가압압력이 3, 4 kgf/cm²과 5, 6 kgf/cm²에서 확연히 차이가 나는 것을 알 수 있다. 압력이 높은 경우에는 10 μm 이하의 입자 생성율이 높은 반면에 40 μm 이상의 입자 생성율도 높은 것을 알 수 있다. 거대입자의 갯수면에서는 많은 양은 아니지만, 실제 운전에 있어서 거대 버블은 주변의 마이크로버블과 결합하거나 동반 상승하여 상당량의 마이크로버블수를 감소시키는 효과를 가져온다. 따라서 마이크로버블 생성에 있어서는 과도한 압력 증가는 오히려 부상에 필요한 버블 생성에 역효과를 가져오는 것으로 판단된다.

(2) 극미세버블 부상분리 기술

수중에 필요한 양의 산소를 전달하기 위해서는 기-액계면이 만들어져야 하는데 그러므로 물속에 인위적으로 기포를 주입시켜 기체와 물의 경계면을 더 많이 만들어줌으로서 기체를 액체에 전달할 수 있는 원리에 따라 유입펌프 일체형 극미세버블 장치에 의해 고농도의 10 ~ 30 μm의 크기의 이온화된 극미세버블을 다량으로 발생시켜 오염물질을 순간적으로 흡착되거나 유기물의 용존성을 상승시킨다.

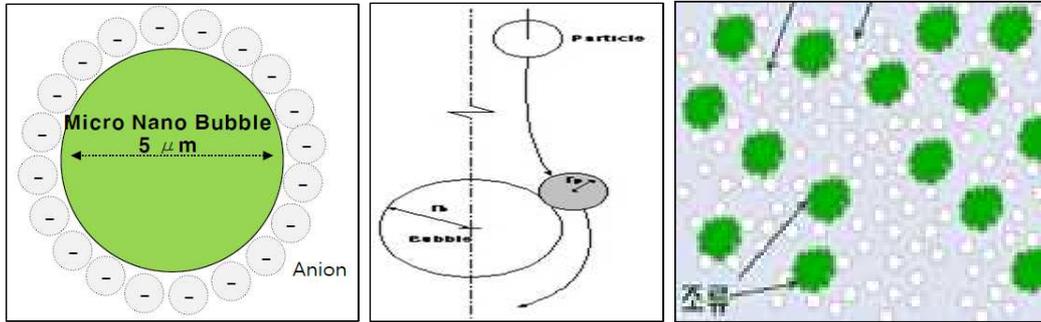


그림 5.27 극미세버블에 의한 부유물질의 흡착

(3) 제타제너레이터 촉매모듈에 의한 순간 응집유도 복합체 플록 형성

전자기유도는 자기장이 변하는 곳에 있는 도체에 전위차(전압)가 발생하는 현상을 말한다. 마이클 패러데이 법칙에 의해 인가된 전압은 자속밀도가 변화하거나, 도체가 일정하지 않은 자속밀도가 퍼져있는 공간을 움직일 때 적용할 수 있는데 이온화된 극미세버블에 흡착된 입자들이 압송관로로 따라 유도시 관로내벽에 부착된 제타제너레이터 촉매 모듈로부터 0.3 초 이내의 순간 응집유도 복합체를 형성하게 된다. 제타제너레이터 촉매 모듈은 유기물질 산화분해에 관여하지 않고 단순히 이온화된 극미세버블에 흡착된 입자들이 응집제 주입과 함께 순간적으로 전자(-, +)유도하여 상호 응집유도 복합체로 분리되고 플록형성을 가속화시키는 것을 목적으로 한다.

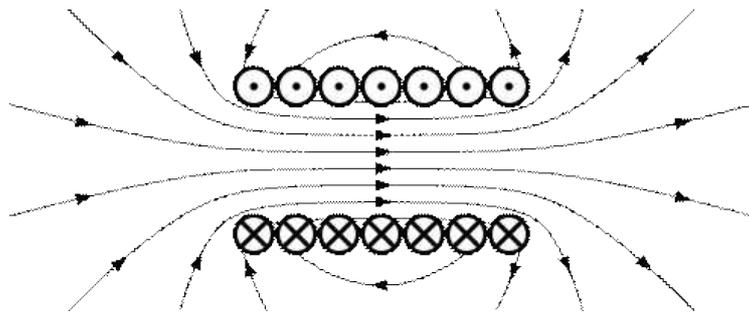


그림 5.28 ZT - 제타제너레이터 촉매 모듈

특히 전자기유도 모듈로부터 인가된 전압은 전기적으로 이온화된 용존오염물질은 극미세버블의 표면에 결합하여 미세기포 복합체를 형성을 더욱 상승시키고 또한 오염물질과 응집제가 순간혼합에 의해 이루어지면서 응집제 미세기포는 기존의 다량의 응집제 투입방식 대비 1/10 이하 수준으로 순간응집 플록반응을 유도한다.

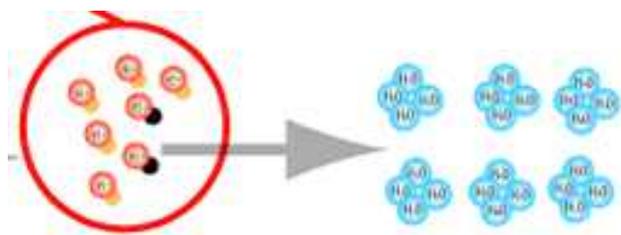


그림 5.29 전자기유도 작용에 의해 미세기포 복합체 형성 가속화

ZT 제너레이터로 촉매로부터 수소/산소 가스에 의한 응집 가속화 및 부상분리 2단계로부터 관로를 통해 이송된 유체는 3단계 부상분리 타워에서 내부측면에 부착된 전기모듈로부터 발생된 수소와 산소기포를 이용하여 고액 분리한다. 이 때 발생하는 미세기포는 크기는 약 20~40 μm 정도로 매우 작고, 작은 기포 크기로 인하여 부상속도가 5~20분의 제한조건을 탈피하기 위해 1단계/2단계 외부압송 관로로부터 미세기포 복합체와 연계하여 상승속도를 가속화하여 부상속도를 20초 이내로 급상승시켰다. 특히 전기부상 속도를 가속화하기 위해 특수 제작된 전기부상 촉매모듈의 구조와 배열, 인가된 전압의 크기 등의 운전조건을 최적화하였다. ZT 제너레이터 모듈은 2단계 순간 전자유도 작용과 달리 전기부상 20초 이내 연속적으로 양극과 음극사에 전류를 통과시켜 연속적인 수소/산소가스 발생을 유도시킨다.

(4) ZT 제너레이터 촉매 모듈 실험

촉매 단자의 간격을 1, 2, 3 mm 간격으로 각각 설치한 3개의 촉매를 1개의 세트에 하여 각각의 간격에 대해서 전압을 5, 10, 15, 20, 25, 30 V로 고정하여 수돗물을 용수로 하였을 때, 최대 전류값을 표시하였다. 촉매간의 간격이 적을수록 소요되는 전류값이 증가되어 더욱 많은 미세기포가 발생되고, 브라운 가스가 최종적으로 생성되는 것으로 관찰되었다. 촉매의 간격이 1 mm 조건에서 전압이 5V, 30V 일 때 0.18, 3.32 A가 소모되었다. 소요되는 전류는 전압이 증가할수록 또한 촉매간의 간격이 좁을수록 증가하는 것으로 나타났으며, 아래와 같이 정비례 하였다.

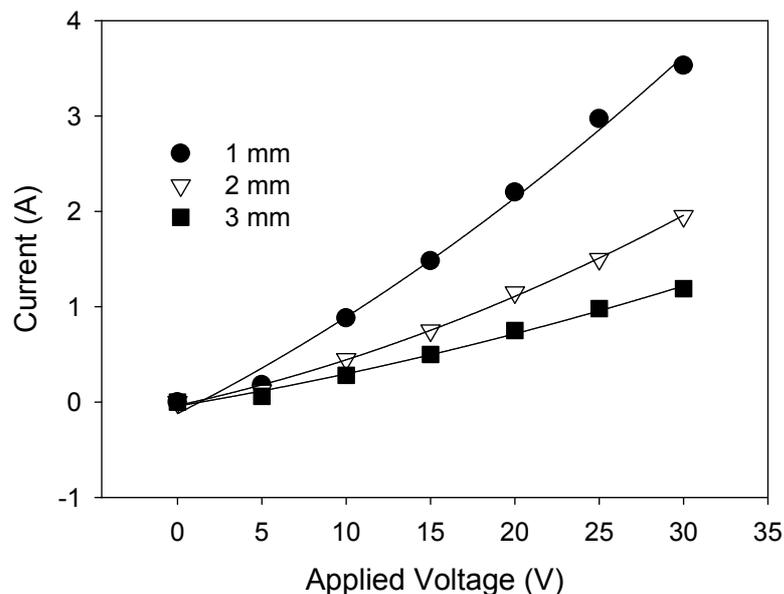


그림 5.30 적용 전압과 전류와의 관계

여러 조건에 대한 가스 발생량의 특징 분석은 응집된 미세조류의 부상 유무, 부상 속도, 미세조류 농도, 설비의 설계 시 경제성과 깊은 관련이 있기 때문에 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 인가전압 5V, 촉매간격 1, 2, 3 mm 조건별 브라운가스 발생량은 2.5, 1.1, 0.6 mL/min순으로 감소하였으며 30V 조건에서는 35.7, 21.4, 10.5 mL/min순으로 반비례 하였다.

미세기포 발생 특징은 전류와 전압이 클 때, 촉매간의 간격이 좁을 때, 브라운 가스 발생량은 증가하였다. 이는 촉매의 수명과 사용되는 에너지와 처리해야하는 미세조류의 양적 관계를 최적화 할 때, 기초 자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.

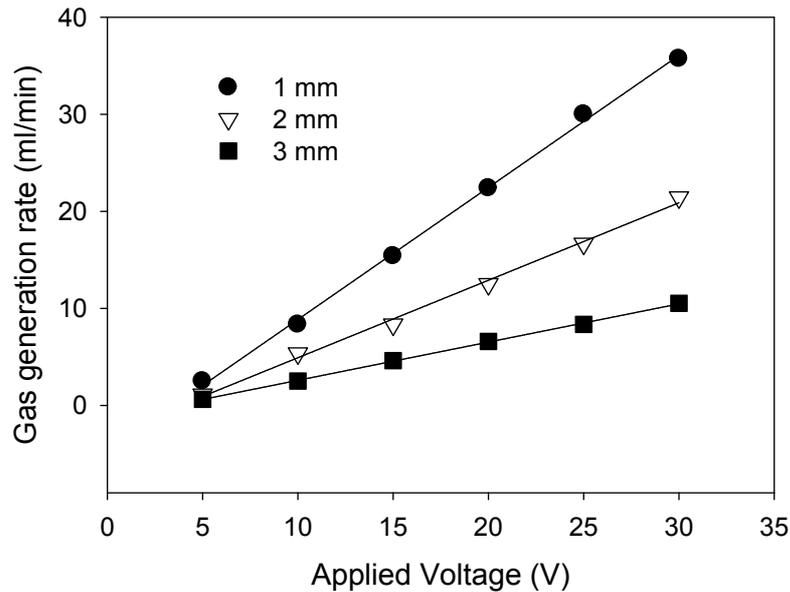


그림 5.31 적용 전압 (5 to 30V)에 따른 브라운가스 발생량

다. 기수담수화 시스템 PILOT PLANT 적용

(1) PILOT PLANT를 이용하여 현장 실험

기수를 초고속 고액분리 시스템에서 전기적으로 응집 및 부유를 유발 시키고, 미세버블 함유 부유물과 처리수를 분리한다. 2차 전처리 MF 필터를 이용하여 미세부유물질을 제거 후 역삼투압 장치를 이용하여 염분농축수와 담수를 분리하여 농업용수를 생산한다. 일반적으로 간척지나 하천의 물을 이용하여 농업용수로 활용시 모래 또는 유기성 부유물질이 많이 유입펌프 시스템으로 압송되는데 이로 인해 RO 이온막이 손상 될 수 있기 때문에 1차 ZT-타워 2차 MF 필터로 부유물질을 완벽하게 제거한다.



그림 5.32 기수담수 PILOT PLANT 시스템 현장 설치

기계부하 테스트 및 공정별 처리 능력을 테스트하기 위하여 시화 갈대 하천에 기수담수 PILOT PLANT를 설치하여 테스트하였다.

표 5.6 기수담수화 시스템 처리효율 실험 결과 (1차)

구분 일자	유량(m ³ /d)	Influent SS(mg/l)	Influent pH	Influent COD(mg/l)	Influent 탁도(NTU)	Influent EC(μs/cm)
15/5/18	14	15	7.0	6.0	12	310
15/5/19	15	18	7.2	4.8	14	245
15/5/20	14	13	7.2	5.0	10	198
15/5/22	13	12.5	7.2	6.4	8	168
15/5/26	14	10.0	7.0	9.1	9	172
15/5/27	16	13.8	7.2	8.0	6	156
15/5/28	14.8	16.0	6.9	5.9	9	169
15/5/29	15	15.0	7.2	7.0	7	158
평균	14.5	14.2	7.1	6.5	9.3	197

표 5.7 기수담수화 시스템 처리효율 실험 결과 (2차)

구분 일자	유량(m ³ /d)	Effluent SS(mg/l)	Effluent pH	Effluent COD(mg/l)	Effluent 탁도(NTU)	Effluent EC(μs/cm)
15/5/18	4.7	0.2	6.91	1.6	0.1	37
15/5/19	3.7	0.1	7.13	1.8	0.1	34
15/5/20	5.5	1.0	7.13	2.0	0.8	20
15/5/22	4.6	0.5	7.08	1.4	0.5	5
15/5/26	4.8	0.3	7.00	2.5	0.6	34
15/5/27	3.9	0.1	7.06	1.8	0.1	5
15/5/28	3.8	0.2	6.76	1.8	0.1	22
15/5/29	3.9	0.1	7.06	2.0	0.2	41
평균	4.3	0.3	7.0	1.9	0.3	24.8

위와 같이 기계 수질 항목별 측정 결과 유입유량 대비 생산수는 25 % 회수율 결과가 나왔으며 부유물질, pH, COD, 탁도, EC 결과 값은 아래 그래프의 결과를 나타내고 있다.

(2) PILOT PLANT 처리효율 실험결과

1차 입자성 부유물질은 전처리 파트인 ZT제너레이터 타워 모듈 장치에서 전량 처리 되었으며 밀입자성 부유물질은 MF 필터에서 제거되었으며 유입수 최고값 SS 은 18 mg/L 이며 처리수 최고 값은 1 mg/L으로 처리 효율은 97.8 % 제거율을 나타내었다.

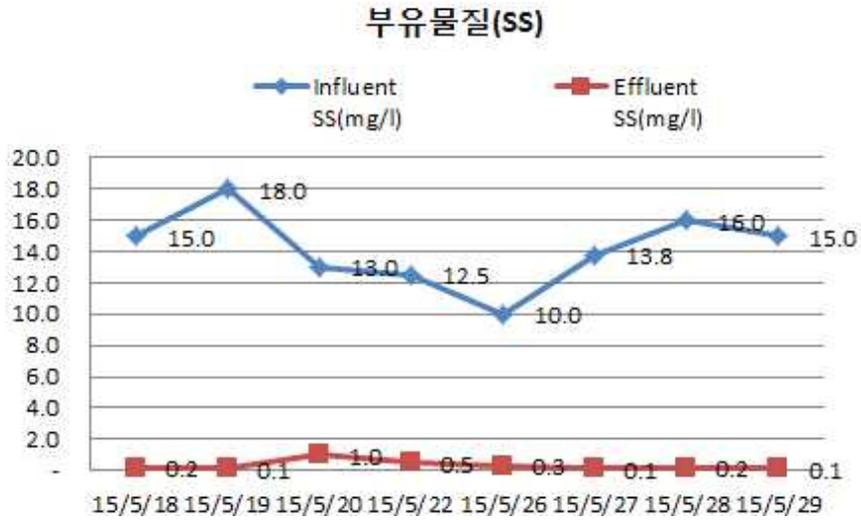


그림 5.33 부유물질 처리 효율

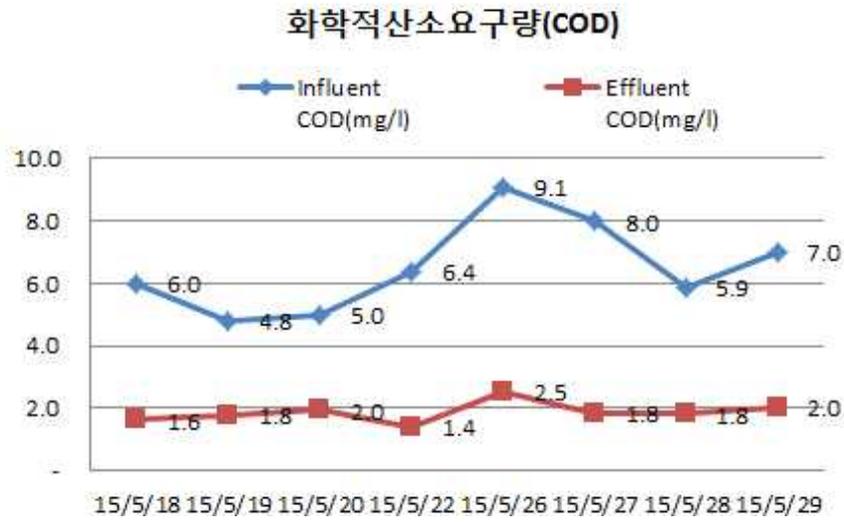


그림 5.34 COD 처리 효율

COD은 전처리 파트인 ZT제너레이터 타워 모듈 장치에서 60 % 저감 되었고 후처리 part RO 멤브레인에서 30 %저감되어 처리되었다. 유입수 최고 값 COD은 9.1 mg/L 이며 처리 수 최고 값은 2.5 mg/L의 처리 효율은 71.2 % 제거율 결과를 얻을 수 있었다.

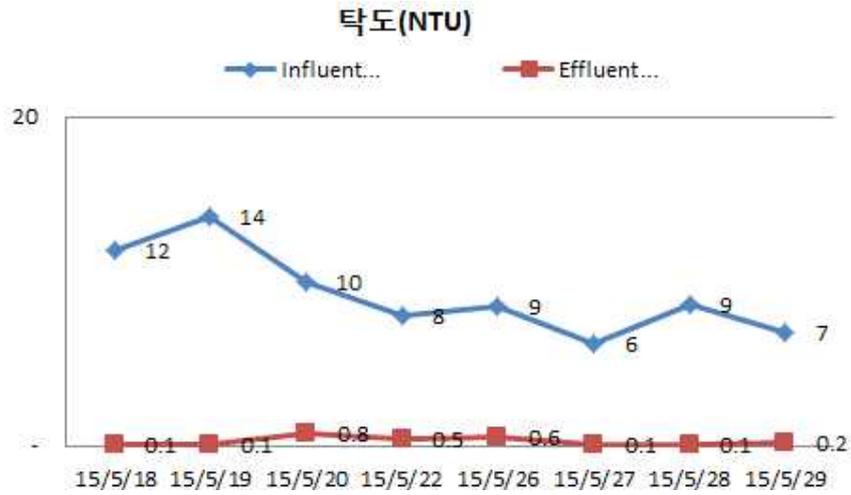


그림 5.35 탁도 처리 효율

탁도는 전처리 파트인 ZT제너레이터 타워 모듈 장치에서 70 % 저감 되었고 후처리 파트 MF 필터에서 30 % 저감되어 처리되었다. 유입수 최고 탁도 값은 14 NTU이며 처리수 최고 값은 0.8 NTU 처리 효율은 79.8 % 제거율 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 서울대학교 평창캠퍼스 유리온실 PILOT PLANT 현장적용

서울대학교 평창 바이오단지 온실에 기수담수화 성능을 실험하기 위해 설치하였으며, 기수담수시스템 PILOT PLANT와 내부 설치 그림은 다음과 같다. 원수 극미세 제너레이터 펌프와 ZT 타워 모듈, MF, RO 멤브레인을 설치하였다.



그림 5.36 서울대학교 평창캠퍼스 유리온실 설치



그림 5.37 서울대학교 바이오단지 온실 내부

(가) 시스템 처리 전후 관개용수 수질 비교

기수담수화 시스템을 적용하여 나타난 관개용수 수질 처리효율을 다음 표에 나타내었다. 1반복구 시스템 처리전후 관개용수 분석결과, pH의 경우 처리 전 8.0 수준으로 나타났으나 시스템 처리 후에는 6.5~6.9 수준으로 약간 낮아지는 경향을 보였다. 염도 수준을 나타내는 EC의 경우 모든 처리구에서 97 % 이상의 처리효율을 보였으며 시스템 처리 후 TR#02에서는 0.01 dS/m, TR#03 0.03 dS/m, TR#04 0.09 dS/m로 모두 0.10 dS/m 이하로 나타나 대조구인 TR#01 (0.24dS/m) 보다 낮은 값을 보였다. 치환성 양이온 Na^+ 의 경우 TR#02 2.39 mg/L, TR#03 6.49 mg/L, TR#04 16.23 mg/L의 값으로 모든 처리구에서 97% 처리효율을 보였으며 TR#02, TR#03 처리구는 대조구 (8.86 mg/L)보다 낮은 값이 나타났다. 다른 양이온 Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 T-P의 경우 모든 처리구에서 약 100%의 처리효율을 나타냈으며, T-N 또한 85% 이상의 높은 처리효율을 나타나 모든 처리구에서 0.43 mg/L 이하의 값이 나타났다. Cl⁻의 경우 모든 처리구에서 98%이상의 처리효율을 보였으며 TR#02 (2.1 mg/L), TR#03 (8.1 mg/L)에서는 대조구 TR#01 (15.8 mg/L)보다 낮은 값을 보였다.

2반복구 시스템 처리전후 관개용수 분석결과, pH의 경우 처리 전 8.0 수준으로 나타났으나 시스템 처리 후에는 약 6.5 수준으로 약간 낮아지는 경향을 보였다. 염도 수준을 나타내는 EC의 경우 모든 처리구에서 97 % 이상의 처리효율을 보였으며 시스템 처리 후 TR#02에서는 0.02 dS/m, TR#03 0.05 dS/m, TR#04 0.09 dS/m로 모두 0.1dS/m 이하로 나타나 대조구인 TR#01 (0.24 dS/m)보다 낮은 값을 보였다 . 치환성 양이온 Na^+ 의 경우 모든 처리구에서 97 % 의 처리효율로 TR#02 3.55 mg/L, TR#03 10.49 mg/L, TR#04 17.52 mg/L의 값을 나타냈다. 다른 양이온 Ca^{2+} , Mg^{2+} 은 모든 처리구에서 약 100 %의 처리효율을 나타냈으며, T-N에서 또한 모든 처리구에서 87% 이상의 처리효율을 나타냈다. Cl⁻의 경우 모든 처

리구에서 97%이상의 처리효율을 보였으며 SO_4^{2-} 는 100%의 처리효율을 보였다.

1,2 반복구 모두 pH 값은 약간 감소하는 경향이 나타났으며 EC값 또한 모든 처리구에서 97% 이상의 처리효율로 대조구로 사용된 수돗물의 EC보다 낮은 값을 보였다. 또한 Na^+ 와 Cl^- 이온의 경우 97% 이상의 처리효율이 나타났으며 다른 양이온 Ca^{2+} , Mg^{2+} 에서는 100% 처리효율이 나타났다.

표 5.8 시스템 처리 전후 관개용수 수질

반복구	구분	처리구	시스템 처리 전	시스템 처리 후	처리효율(%)
1	pH	TR#01-1	7.9	-	-
		TR#02-1	8.0	6.9	-
		TR#03-1	8.0	6.5	-
		TR#04-1	7.9	6.6	-
	EC	TR#01-1	0.24	-	-
		TR#02-1	0.87	0.01	99%
		TR#03-1	2.00	0.03	99%
		TR#04-1	3.23	0.09	97%
	DO (mg/L)	TR#01-1	9.4	-	-
		TR#02-1	9.5	9.4	-
		TR#03-1	10.1	9.6	-
		TR#04-1	10.0	9.2	-
	BOD (mg/L)	TR#01-1	0.5	-	-
		TR#02-1	0.6	0.5	17%
		TR#03-1	0.7	0.6	14%
		TR#04-1	1.6	0.4	75%
	COD (mg/L)	TR#01-1	0.6	-	-
		TR#02-1	0.7	0.5	29%
		TR#03-1	0.8	0.6	25%
		TR#04-1	2.5	0.5	80%
	T-N (mg/L)	TR#01-1	2.85	-	-
		TR#02-1	3.01	0.24	92%
		TR#03-1	3.00	0.29	90%
		TR#04-1	2.94	0.43	85%
	T-P (mg/L)	TR#01-1	0.004	-	-
		TR#02-1	0.008	ND	100%
		TR#03-1	0.005	ND	100%
		TR#04-1	0.005	ND	100%

반복구	구분	처리구	시스템 처리 전	시스템 처리 후	처리효율(%)
	SS (mg/L)	TR#01-1	3.0	-	
		TR#02-1	2.0	ND	100%
		TR#03-1	6.0	1.0	83%
		TR#04-1	10.0	1.0	90%
	Ca ²⁺ (mg/L)	TR#01-1	31.12	-	-
		TR#02-1	31.61	ND	100%
		TR#03-1	31.78	0.02	100%
		TR#04-1	32.16	0.18	99%
	Mg ²⁺ (mg/L)	TR#01-1	5.55	-	-
		TR#02-1	5.62	ND	100%
		TR#03-1	5.66	0.01	100%
		TR#04-1	5.73	0.02	100%
	Na ⁺ (mg/L)	TR#01-1	8.86	-	
		TR#02-1	134.54	2.39	98%
		TR#03-1	377.41	6.49	98%
		TR#04-1	626.29	16.23	97%
	K ⁺ (mg/L)	TR#01-1	1.83	-	-
		TR#02-1	1.86	0.27	86%
		TR#03-1	1.87	0.28	85%
		TR#04-1	2.01	0.74	63%
	Cl ⁻ (mg/L)	TR#01-1	15.8	-	-
		TR#02-1	210.5	2.1	99%
		TR#03-1	578.7	8.1	99%
		TR#04-1	994.5	23.2	98%
	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	TR#01-1	10.6		-
		TR#02-1	10.6	ND	100%
		TR#03-1	10.7	ND	100%
		TR#04-1	10.9	ND	100%
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	TR#01-1	2.66	-	-	
	TR#02-1	2.62	0.13	95%	
	TR#03-1	2.63	0.19	93%	
	TR#04-1	2.63	0.03	99%	

반복구	구분	처리구	시스템 처리 전	시스템 처리 후	처리효율(%)
	Fe (mg/L)	TR#01-1	0.046	-	-
		TR#02-1	0.047	0.025	47%
		TR#03-1	0.021	0.021	-
		TR#04-1	0.034	0.027	21%
	SAR	TR#01-1	0.272	-	-
		TR#02-1	4.094	-	-
		TR#03-1	11.452	6.615	42%
		TR#04-1	18.891	6.841	64%
2	pH	TR#02-2	8.1	6.5	-
		TR#03-2	8.0	6.6	-
		TR#04-2	8.0	6.5	-
	EC	TR#02-2	0.87	0.02	98%
		TR#03-2	2.01	0.05	98%
		TR#04-2	3.30	0.09	97%
	DO (mg/L)	TR#02-2	10.6	9.5	-
		TR#03-2	9.1	9.5	-
		TR#04-2	10.1	10.4	-
	BOD (mg/L)	TR#02-2	0.9	0.5	44%
		TR#03-2	0.9	0.5	44%
		TR#04-2	1.3	0.4	69%
	COD (mg/L)	TR#02-2	1.2	0.6	50%
		TR#03-2	1.3	0.6	54%
		TR#04-2	2.4	0.5	79%
	T-N (mg/L)	TR#02-2	3.02	0.23	92%
		TR#03-2	2.94	0.36	88%
		TR#04-2	2.99	0.38	87%
	T-P (mg/L)	TR#02-2	0.008	0.005	38%
		TR#03-2	0.006	0.006	-
		TR#04-2	0.013	ND	100%
	SS (mg/L)	TR#02-2	4.0	3.0	25%
		TR#03-2	8.0	1.0	88%
		TR#04-2	12.0	4.0	67%

반복구	구분	처리구	시스템 처리 전	시스템 처리 후	처리효율(%)
	Ca ²⁺ (mg/L)	TR#02-2	32.76	0.01	100%
		TR#03-2	32.82	0.07	100%
		TR#04-2	32.18	0.09	100%
	Mg ²⁺ (mg/L)	TR#02-2	5.84	ND	100%
		TR#03-2	5.84	0.01	100%
		TR#04-2	5.73	0.01	100%
	Na ⁺ (mg/L)	TR#02-2	131.7	3.55	97%
		TR#03-2	368.6	10.49	97%
		TR#04-2	635.2	17.52	97%
	K ⁺ (mg/L)	TR#02-2	1.92	0.28	85%
		TR#03-2	1.93	0.3	84%
		TR#04-2	1.96	0.27	86%
	Cl ⁻ (mg/L)	TR#02-2	206.0	3.6	98%
		TR#03-2	580.5	13.9	98%
		TR#04-2	986.0	25.4	97%
	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	TR#02-2	11.0	ND	100%
		TR#03-2	11.0	ND	100%
		TR#04-2	10.7	ND	100%
	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	TR#02-2	2.70	0.15	94%
		TR#03-2	2.70	0.26	90%
		TR#04-2	2.62	0.28	89%
	Fe (mg/L)	TR#02-2	0.029	0.024	17%
		TR#03-2	0.031	0.027	13%
		TR#04-2	0.066	0.025	62%
	SAR	TR#02-2	3.936	-	-
		TR#03-2	11.008	6.939	37%
		TR#04-2	19.155	10.444	45%

(나) 시스템 배출수 수질 분석

시스템 처리 후 배출되는 배출수의 수질을 처리 전 수질과 비교하여 다음 표에 나타내었다. pH의 경우 처리 전과 동일한 8.0 수준으로 나타났으며 EC의 경우 TR#02, TR#03에서 처리전보다 27~56 % 증가되어 배출되는 경향을 보였지만 TR#04 배출수는 처리 전보다 EC 값이 감소되어 배출되었다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 TR#02, TR#03 배출수 농도가 28~64 % 증가하였으나 TR#04 배출수는 감소되어 배출되는 것으로 분석되었다. 다른 양이온 Ca²⁺, Mg²⁺에서는 모든 처리구에서 배출수 농도가 증가되는 것으로 나타났다. TR#02, TR#03 처리구에서는 대부분의 수질항목의 배출수 농도가 처리 전보다 증가하는 경향을 보인 반면, TR#04 에서는 처리 전보다 EC, Na⁺, Cl⁻ 항목 등의 배출수 농도가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.

표 5.9 시스템 배출수 수질

구분	시스템 처리전			시스템 배출수		
	TR#02	TR#03	TR#04	TR#02	TR#03	TR#04
pH	8.0	8.0	7.9	7.9	8.0	8.0
EC	0.87	2.00	3.23	1.36	2.53	1.68
DO(mg/L)	9.5	10.1	10.0	10.2	8.4	9.6
BOD(mg/L)	0.6	0.7	1.6	0.9	0.9	0.8
COD(mg/L)	0.7	0.8	2.5	1.0	1.6	1.2
T-N(mg/L)	3.01	3.00	2.94	4.10	3.78	4.04
T-P(mg/L)	0.008	0.005	0.005	0.009	0.003	0.005
SS(mg/L)	2.0	6.0	10.0	4.0	10.0	12.0
Ca ²⁺ (mg/L)	31.61	31.78	32.16	44.73	41.31	44.41
Mg ²⁺ (mg/L)	5.62	5.66	5.73	7.98	7.38	7.96
Na ⁺ (mg/L)	134.54	377.41	626.29	221.50	483.57	285.79
K ⁺ (mg/L)	1.86	1.87	2.01	2.62	2.41	2.53
Cl ⁻ (mg/L)	210.5	578.7	994.5	347.7	735.7	450.8
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	10.6	10.7	10.9	15.3	14.0	15.2
NO ₃ -N(mg/L)	2.62	2.63	2.63	3.66	3.38	3.60
Fe(mg/L)	0.047	0.021	0.034	0.029	0.036	0.033
SAR	4.094	11.452	18.891	5.664	12.866	7.331

4. 기수담수화 시스템 공정개선 및 최적운영조건 도출

가. 회수율 향상

RO 성능영향 인자를 보면 압력, 온도, 유입수 농도, pH 따라 생산수량이 달라진다. 특히 온도가 낮은 겨울 경우 RO의 생산 유량이 급속히 줄어드는 경향이 있어 보통 4계절을 가지고 있는 나라는 겨울 같은 경우 RO 멤브레인 외관에 열선 처리를 하여 온도를 일정하게 유지 시켜 사용한다. 그리고 압력은 유입 농도와 상관관계가 있어 농도가 높으면 압력은 상승하고 회수율은 줄어든다. 또한 pH 높고, 낮으면 막의 손상이 되므로 항상 일정하게 Antiscalant, SBS 산화제를 주입하여 운영한다.

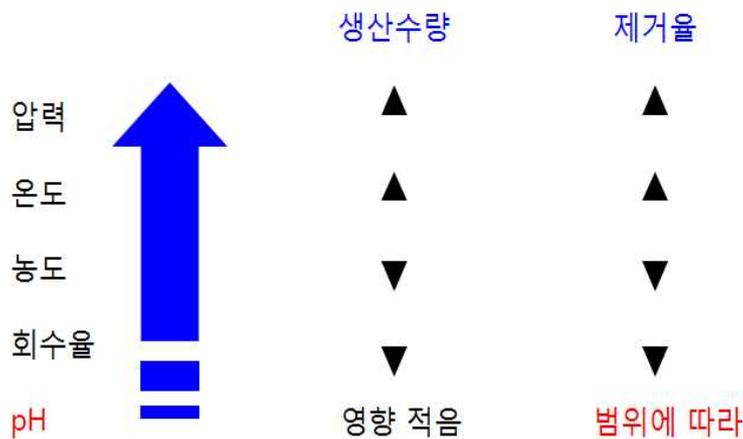


그림 5.38 RO 분리막 회수율에 대한 양향 인자

1. 삼투압 농도 변화에 따라 가동압에 영향
2. 삼투압 농도 변화에 따라 제거율에 영향

$$\blacksquare \% \text{ Recovery} = (\text{Permeate Flow} / \text{Feed Flow}) * 100$$

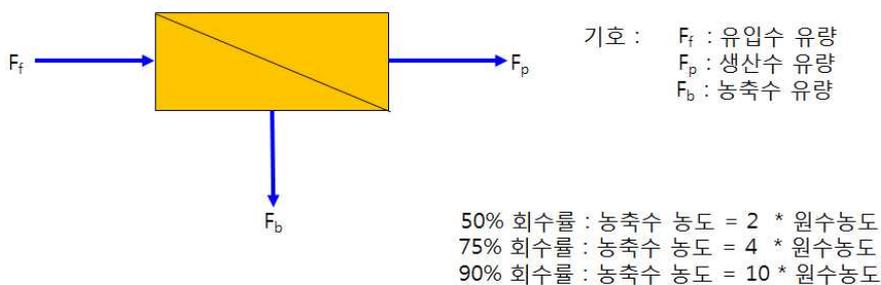
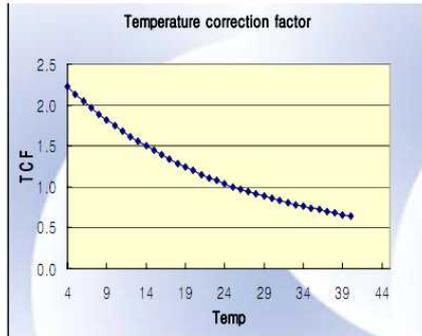


그림 5.39 RO 분리막 회수율 변화

삼투압 농도에 따른 생산수 회수율의 변화를 살펴보면, 50 % 회수율의 경우 2*원수농도, 75 % 회수율은 4*원수농도, 90 % 회수율은 10*원수농도 상수 값을 이용한 회수율 퍼센트 및 제거율을 파악할 수 있다.

온도 상승에 따라 유량 및 이온의 투과 속도가 증가하기 때문에 보정이 필요



증가 정도 : 유량 3% 증가/1°C

계산식 : $TCF = \exp \left[u \cdot \left(\frac{1}{273+T} - \frac{1}{298} \right) \right]$

그림 5.40 온도에 따른 RO 회수율

온도변화에 따른 회수율을 살펴보면 1도씩 증가 되면 유량이 3 % 가량 증가되는 것을 볼 수 있었으며, 4 °C에 시작하여 40 °C 까지 여과 유량 및 이온 투과 속도가 증가되는 결과를 측정할 수 있었다.

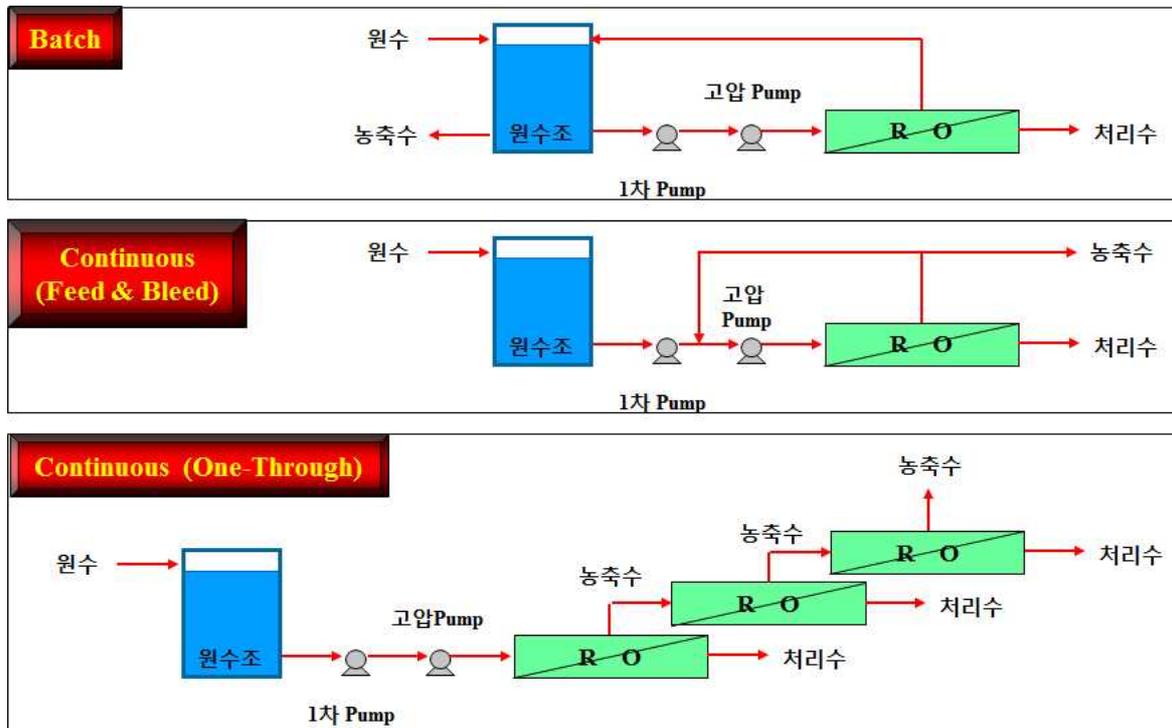


그림 5.41 RO 배열 방식

RO 운전 방법은 1단계 원수조에서 고압으로 RO 멤브레인을 통과 시켜 처리수를 생산하고 농축수를 배출 방식 2단계는 다단 운전 방식으로 1단계 → 2단계 → 3단계로 운전되는 방식으로 생산수량이 증가된다.

나. 방류수 활용

처리수는 미열이 발산하는데 열을 하우스 보온에 이용하여 수막 재배에 활용 가능하며, 특히 겨울철에 강수량이 적기 때문에 순환식 수막재배 시스템에 연계 하여 사용 가능하다.



그림 5.42 수막 재배 시설

계속되는 고유가로 인하여 시설재배농가의 난방비 부담이 가중되고 있어 유류를 사용하지 않고 지하수가 갖고 있는 자연 에너지를 이용해 수막 보온 재배하는 원예시설이 점차 증가하고 있으나 수막 하우스가 밀집되어 있는 재배단지에서는 지하수 부족현상이 심화되어 충분한 수막보온 효과를 얻을 수 없는 문제점이 나타나고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 처리수를 흘려버리지 않고 회수하여 다시 사용하는 순환식 수막시스템을 적용이 필요하다. 순환식 수막시스템은 농업수처리장치 처리수를 재활용하는 방식으로 설계하여 가열장치, 순환수 회수장치, 살수 및 회수펌프, 제어장치 등으로 구성 된다. 순환식 수막시스템의 제어장치는 온도센서에 의해 자동으로 작동 및 정지하도록 하였으며, 처리수의 공급 사정에 따라 완전 순환식 및 부분 순환식 형태로 유연성 있게 제어되도록 설계가 필요하다.

다. 전·후처리 공정 시스템의 개발

농도별 운전 모식 공정 방안은 다음과 같다. 첫째 유입수 염분 농도에 따라 EC 센서를 이용하여 저농도, 고농도를 측정하여 저농도일 경우 1단계 → 2단계 MF 필터 처리 + UV 소독 하여 농업용수로 사용 방안이다. 둘째 EC 센서를 이용하여 저농도, 고농도를 측정하여 고농도 일 경우 1단계 → 2단계 MF 필터 처리 → 3단계 이온 RO막 처리하여 농업용수로 사용 방안이다. 마지막으로 EC 센서를 측정하여 중간 농도 일 경우 1단계 → 2단계 MF 필터 처리 → 3단계 이온 RO막 처리하고 2단계 처리수와 3단계 처리수를 희석하여 농업용수로 사용하는 방안 등이 있다.

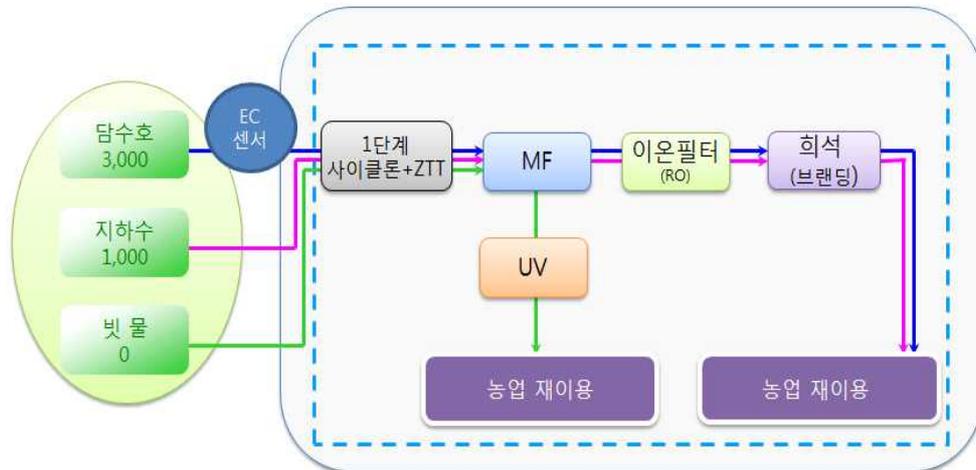


그림 5.43 도별 운전 모식도

라. 원예단지 유형별 모듈 표준화 및 최적화

본 연구에서는 원예단지를 대상작물, 관개방법, 그리고 관개용수원을 기준으로 유형구분을 실시하였다. 본 연구를 통해 제안된 수질기준(안)에서 알 수 있듯이, 대상작물에 관계없이 일정수준의 관개용수 수질이 담보되어야 한다. 또한, 관개방법에 따라 기수담수화 시스템의 구조변경은 가능하나 공정설계를 달리하는 요소가 되지는 않는다. 기수담수화 시스템의 공정을 설계하고 표준화하는 과정에서 앞선 원예단지 유형구분의 기준이 되는 요소 중 시스템의 입력값인 유입수 수질을 결정하는 관개용수원이 기수담수화 시스템의 모듈을 최적화하는 가장 주요한 요소가 된다. 따라서 관개용수원의 종류에 따라 기수담수화 시스템의 모듈을 표준화 및 최적화 하였다.

(1) 지표수

지표수 유형은 하천이나 강에서 원수 펌프로 압송하여 처리 하는 방식으로 지표수는 부유물질, 탁도, 염분 발생 시 기수담수화 시스템을 적용한다. 다음 그림은 지표수 기수담수화 시스템의 표준 공정을 보여준다.

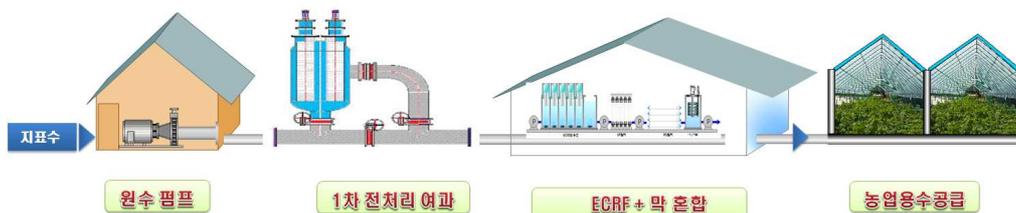


그림 5.44 지표수 기수담수화 시스템 유형

지표수 기수담수화 시스템에서는 1차 전처리 여과를 통해 유입원수를 1차적으로 처리하고, ECRF+막 혼합 공정을 통해 적합한 수준의 농업용수 수질을 담보하도록 한다.

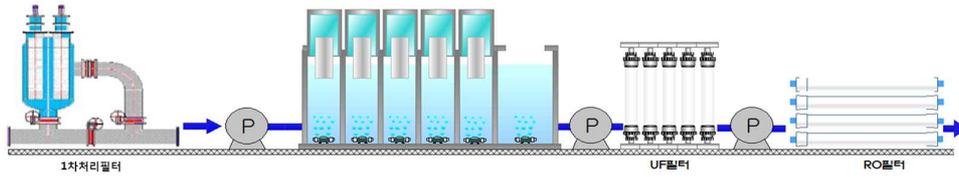


그림 5.45 ECRF + 막 혼합 공법

ECRF+막 혼합 공정은 1차 스트레나 방식 자동 여과 후 전기응집 살균을 실시하고, UF 필터로 미세 부유물질을 제거한 후, RO 멤브레인으로 이온성 물질을 제거하고 농업용수로 공급하는 공정을 갖는다.

(2) 지하수

지하수 유형은 땅 속에서 원수 펌프로 압송하여 처리 하는 방식으로 지표수에 비해 부유 물질, 탁도, 염분이 낮은 농도이므로 가장 간단한 처리 방식으로 기수담수화 시스템을 적용한다. 다음 그림은 지하수 기수담수화 시스템의 표준 공정을 보여준다.



그림 5.46 지하수 기수담수화 시스템 유형

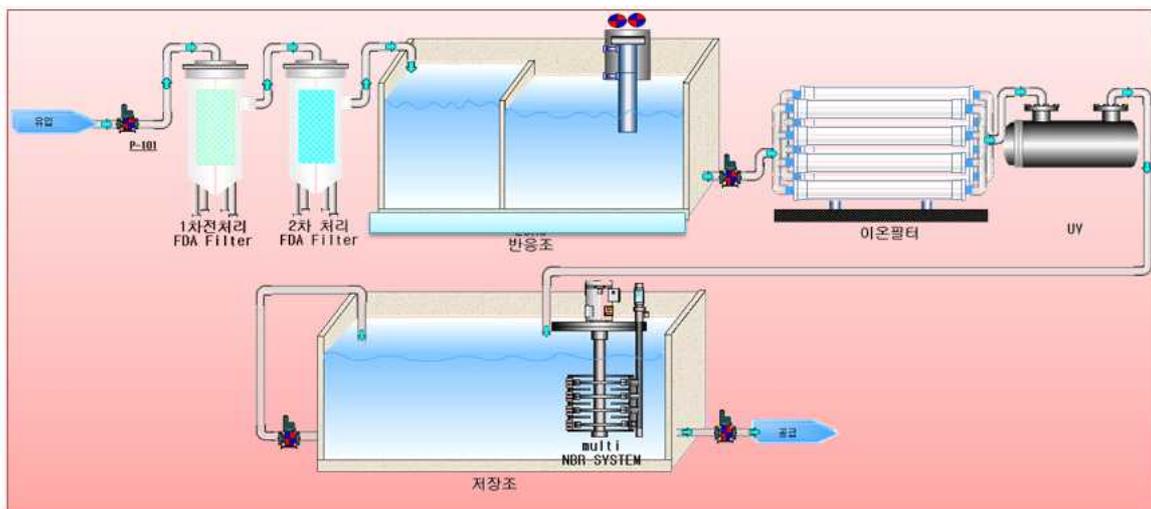


그림 5.47 압력식 분리막 공법

관개용수원이 지하수인 경우의 압력식 분리막 공법은 1차 부유물질 제거 후 전처리 반응조에서 저장된 물을 이온 RO 필터로 제거 후 UV T살균하여 저류 탱크에 저장 한다. 이때 저류조 안에 극미세 제너레이터로 DO 농도를 증가 시켜 보관하며 필요시 사용한다.

(3) 하수처리수

하수처리장 유형은 하수처리수를 원수 펌프로 압송하여 처리하는 방식으로 물 성상이 기존 2가지 유형보다 매우 어려운 물 처리로 유기성 부유물질, 이온성 물질, 용존성 물질이 많이 함유하고 있어 전처리가 무엇보다 중요한 처리 방식이며 기수담화 시스템이다. 다음 그림은 하수처리수 기수담수화 시스템의 표준 공정을 보여준다.



그림 5.48 하수처리수 기수담수화 시스템 유형

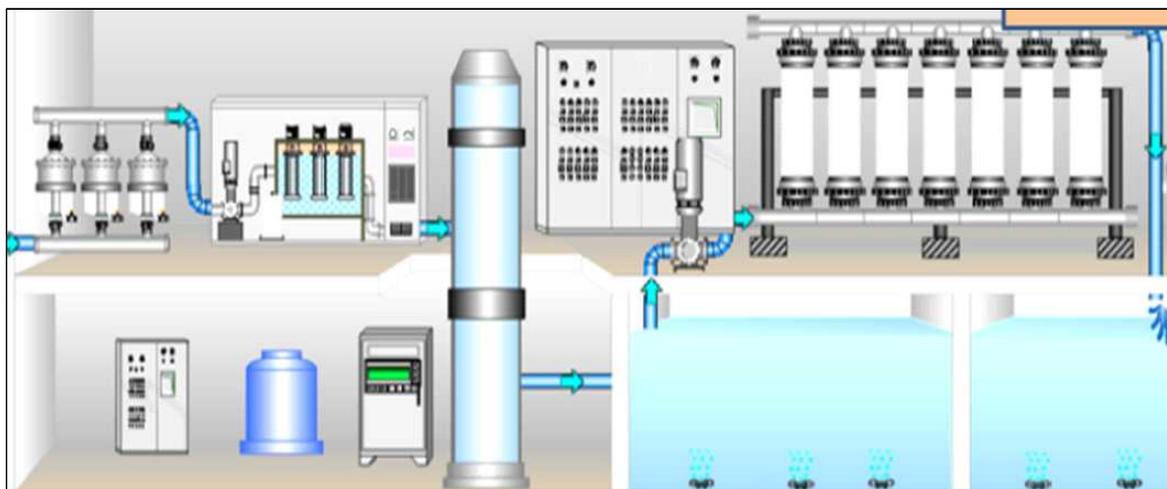


그림 5.49 ZT 시스템 공법

하수처리장 방류수를 이용하여 농업용수 공급 시 하수처리수는 유기물과 용존성 물질이 많이 함유하고 있어 1차 전처리가 무엇보다 중요하며 사이클론을 이용한 큰 입자성 부유물질을 제거하며 초고속 응집화를 위한 ZT 제너레이터가 가벼운 부유물질을 제거 후 UF 저장조로 이송되어 UF필에서 처리된 물은 RO 멤브레인에서 이온성 물질을 제거한다.

제6절 기수담수화 시스템 현장지구 선정 및 목표수질 설정

포장단위의 실험 및 공정 설계를 통해 개발된 기수담수화 시스템의 공정을 개선하고, 다양한 농업환경에서 현장적용성을 평가하기 위해서는 실제 영농 현장에의 적용이 필요하다. 기수담수화 시스템의 현장적용 실험 대상지를 선정하기 위해서는 기수를 관개용수로 공급할 가능성이 있는 원예단지에 안전하고 경제적인 농업용수를 공급하고자 하는 연구목적에 맞는 시설재배지를 우선적으로 고려하여야 한다. 또한, 연구과제의 원활한 수행을 위해서는 경작농민과 적절한 소통이 가능하여야 하며, 작물재배 농가의 연구과제에 대한 이해도가 높아야 하는 등 현실적인 조건을 충족시킬 수 있는 지역을 대상으로 함이 바람직하다.

기수담수화 시스템의 테스트베드 지역을 발굴하기 위해서는 먼저 염해가 의심되는 용수원을 농업용수로 사용하고 있는 지역의 구분이 필요하다. 이를 위해서는 시설재배지의 전국적인 모니터링 시스템이 구비되어야 하지만 현재 국토부 및 환경부의 지하수관측망과 지하수수질측정망은 이와 같은 내용을 포함하고 있지 않다. 또한, 단일 연구과제에서 실측모니터링을 수행하는 것에도 시간적 경제적 제한이 따른다. 따라서 테스트베드 지역을 발굴하기 위해서는 기존의 조사 및 연구사례를 중심으로 염해우심 지역을 발굴하거나 기존의 국토부 및 환경부의 전국적인 지하수수질측정 자료에 기반한 간접적인 평가를 통해서 가능하다. 따라서 기수담수화 시스템의 적용성을 평가하기 위해 기수를 관개용수로 하는 시설재배지를 대상으로 현실적 연구수행 가능성을 고려한 테스트베드 지역에 대해 논의하도록 한다. 테스트베드 지역은 기수에 따른 피해가 발생하고 있거나 발생할 가능성이 큰 지역을 우선적으로 고려해야 하며, 기후변화에 대응하여 장기적인 관점에서의 농업용수 이용에의 취약성을 가진 지역도 검토할 수 있다.

1. 대상지역 분류

테스트베드 지역에 우선적으로 검토되어야 할 것은 염해 발생 및 발생가능여부이다. 해안 지역의 대수층에서 민물은 수리학적으로 염수와 연결되어 있으며, 자연조건에서 민물과 염수간의 수리학적 구배는 물을 전체적으로 민물에서 염수방향으로 흐르게 한다. 그러나 지하수 사용량 급증에 의해 수리학적 균형이 깨지게 되면 염수가 민물 쪽으로 지하 이동하는 염수침입이 발생하여 지하수 내 염 농도를 크게 높이게 된다 (이슬비 등, 2008). 이와 같은 염수침입에 따른 작물생육 장애가 발생할 수 있는 염해우심지역으로는 간척지와 기수역 등이 있다. 실제 간척지의 경우, 염해피해에 대비해 내염성 작물 위주로 재배가 이루어지고 있으며, 다수의 연구에서 수확량이 20~30 % 정도 감소하는 것으로 보고되고 있다. 또한, 간척지를 제외하고 바다와 인접한 강 하구에서 염해 피해가 발생하고 있다. 따라서 간척지와 간척지의 기수역을 기수담수화 시스템의 테스트베드 지역으로 분석하였다.

가. 간척지

간척지의 농업적 이용을 위해서는 제염과 지하수위 하강 등을 위한 노력이 필요하다. 우리나라의 대표적인 간척지는 시화, 화옹, 이원, 서산, 남포, 부사, 새만금, 백수, 신안, 영산강, 삼호, 진도, 완도, 강진, 고흥, 남해, 그리고 사천 등이 있다. 농림수산식품부 (2010)는 미처분

상태 및 공사 시행 중인 간척지 12개 지구에 대해 다음과 같이 지구별 특성화 방향과 지구별, 용도별 면적을 설정한 대규모 간척지 활용 기본구상을 고시한 바 있다. 화옹, 시화, 석문, 이원, 남포, 고흥, 영산강, 그리고 새만금 등은 첨단수출원에 또는 일반원에 단지를 조성하도록 기본구상이 고시되어있기 때문에 기수담수화 시스템의 현장적용을 최우선적으로 고려할 수 있다.

표 6.1 간척지별 농업적 활용 기본구상 내용 (농림수산식품부, 2010)

지구명	간척지 농업적 활용 (ha)								
	합계	첨단수출원에	일반원에 단지	채종단지	친환경축산단지	농식품 가공 및 물류지원	관광농업단지	생태환경단지	복합곡물단지
계	30,394	3,000	2,185	1,533	3,000	1,536	394	653	18,093
화 옹	4,482	200	400	677	800	174	84	79	2,068
시 화	3,636	300	116	100	650	120	10	441	1,899
석 문	1,968	200	288	451	534	20	30	120	325
이 원	847	300	-	-	113	10	10	-	414
남 포	825	-	61	-	140	5	20	-	599
삼 산	283	-	-	-	22	3	-	13	245
고 흥	2,057	200	-	-	67	20	10	-	1,760
군 내	464	-	-	-	-	-	-	-	464
보 전	213	-	-	-	-	-	-	-	213
영산강Ⅲ-1	3,093	130	220	-	-	44	30	-	2,669
영산강Ⅲ-2	3,956	170	-	-	100	39	-	-	3,647
새만금	8,570	1,500	1,100	305	574	1,101	200	-	3,790

본 연구에서 개발된 기수담수화 시스템을 현장에 적용하기 위해서는 현 시점에서 간척지 공사가 완료되어 있어야만 한다. 2015년 현재 준공이 완료된 지역에 첨단수출원에 및 일반원에 단지의 조성이 고시된 간척지는 시화, 석문, 남포, 고흥, 이원, 그리고 영산강으로 나타났다.

표 6.2 준공 후 처분 전 및 공사시행 중인 간척지구 현황 (농림축산식품부, 2013)

구분	지구명	위치		면적 (ha)			사업기간	시행자
		도	시군	계	농업	비농업		
	계			54,379	30,394	23,985		
준공후 처분전	소계			14,180	13,225	955		
	석문	충남	당진	2,923	1,968	955	'87-'05	당진군
	남포	충남	보령	825	825	-	'85-'07	보령시
	고흥	전남	고흥	2,057	2,057	-	'91-'08	고흥군
	군내	전남	진도	464	464	-	'91-'08	진도군
	보전	전남	진도	213	213	-	'87-'96	진도군
	이원	충남	태안	847	847	-	'90-'09	태안군
	삼산	전남	장흥	283	283	-	'97-'09	장흥군
	시화	경기	화성	745	745	-	'98-'10	농어촌공사
	영산강Ⅲ-1	전남	영암·해남	2,949	2,949	-	'97-'08	농어촌공사
	영산강Ⅲ-1	전남	해남	2,874	2,874	-	'97-'11	농어촌공사
시행중	소계			40,199	17,169	23,030		
	화옹	경기	화성	4,482	4,482	-	'91-'16	농어촌공사
	시화	경기	화성·안산	2,891	2,891	-	'98-'16	농어촌공사
	영산강Ⅲ-1	전남	영암·해남	2,860	144	2,716	'85-'15	농어촌공사
	영산강Ⅲ-2	전남	해남	1,666	1,082	584	'89-'14	농어촌공사
	새만금	전북	군산·김제·부안	28,300	8,570	19,730	'91-'20	농식품부

하지만 다음 표에서와 같이 각 지방자치단체별 간척지 활용계획에 따르면 실제 농림수산식품부의 기본구상과 차이가 있음을 알 수 있다. 시화간척지의 경우 공사 시행중인 간척지에 대해 첨단수출원에 및 일반원에 단지를 조성할 계획을 가지고 있으며, 현재 조성된 간척지에 대한 원예단지 조성계획은 없는 것으로 나타났다. 석문지구의 경우 농림수산식품부의 고시와 달리 지자체의 토지이용계획에는 원예단지 조성계획이 없는 것으로 조사되었다. 남포지구의 경우 2007년에 방조제 공사와 내부 개담공사가 완료되었으나 보령시와 서천군간의 관할면적 분할과 관련된 행정분쟁이 이루어지고 있어 농림수산식품부의 고시와 달리 지자체의 일반원예단지 조성계획이 아직까지 마련되지 않은 실정이다. 2008년 내부 개담공사가 완료된 고흥지구의 경우, 2014년 150 ha의 일반원예단지 조성, 2015년 30 ha의 첨단수출원예단지 조성을 계획하고 있다. 이원지구의 경우 토양 배수가 불량하고 토양과 담수호의 염분농도가 높아 작물재배가 불리한 여건이지만 지자체에서 2014년부터 첨단수출원예단지를 조성할 계획을 가지고 있다. 영산강지구의 경우, 장기적으로는 첨단수출원에 및 일반원예 단지의 조성계획을 수립하고 있지만, 2016년 이후에나 가능한 것으로 조사되었다. 농림

수산식품부의 기본구상에는 원예단지의 조성계획이 없었으나, 지자체의 개별계획에 원예단지 조성계획을 포함하고 있는 간척지는 군내와 보전지구로 조사되었으며, 두 지구 모두 2017년에 원예단지 조성을 계획하고 있다 (한국농업경영포럼, 2013). 따라서 주무부처인 농림축산식품부의 기본구상과 지자체별 간척지 중단기 이용계획을 고려할 때, 본 연구에서 현장적용이 가능한 지역은 고흥과 이원지구 (화훼단지)로 조사되었다.

표 6.3 지자체의 간척지별 용도별 중단기 이용계획 (한국농업경영포럼, 2013)

(단위: ha)

지구명	합계	첨단 수출 원예	일반 원예 단지	채종 단지	친환경 축산단지	농식품 가공 및 물류지원	관광 농업 단지	생태 환경 단지	복합 곡물 단지
계	18,913	740	517	95	2,537	568	222	76	14,158
화옹	2,434	65			316	339	17	31	1,666
시화	2,036				1,501				535
석문	1,716			16	22	7	46	30	1,595
이원	847	150					10	687	
남포	825				15				810
삼산	283				73				210
고흥	2,075	30	150	6	100	22	100		1,667
군내	378	24	15	53		56	45		185
보전	173	27	9	20	17	11	4	15	70
영산강	5,967	190	343		180				5,254
새만금	2,179	254			313	133			1,479

나. 간척지의 기수역

기수는 해수와 담수가 혼합되어 있는 곳의 물로 민물보다는 염분이 높고 해수보다는 염분이 적다. 보통 1 kg당 염소의 g수(퍼밀)를 염소량이라 하는데, 원양의 바닷물의 염소량은 보통 17~19 ‰이다. 이에 비해 근해나 하구의 염소량은 불명확하여 하한 (0.2~0.5 ‰)과 상한 (16.5~20 ‰)이 연구자에 따라 다르다. 염분의 농도가 낮은 하구 일대를 기수역이라 하는데, 보통 2~3 km이다⁸⁾. 우리나라 시설재배 토양의 상당부분은 과량의 염류가 집적되어 있다. 이는 과량의 화학 비료 및 축분의 시용, 오염된 관개용수의 지속적인 사용에 기인한 것으로 알려져 있으나, 전 세계적으로는 해안지대나 건조지대를 중심으로 염수침입과 같은 자연적인 배경에 의해 많은 농경지 토양이 염류집적으로 어려움을 겪고 있다 (이슬비 등, 2008). 이와 같은 염수침입이 나타날 수 있는 기수역이 서해안과 남해안에 걸쳐 많이 발달해 있으나 많은 부분이 방조제 건설 및 간척사업을 통해 간척지로 개간되었다. 또한, 기

8) 위키백과, 검색어 “기수” [http://ko.wikipedia.org/wiki/%EA%B8%B0%EC%88%98_\(%EB%AC%BC\)](http://ko.wikipedia.org/wiki/%EA%B8%B0%EC%88%98_(%EB%AC%BC)) 2015년 5월 26일 검색

수역은 대부분 논으로 이용되고 있어 시설재배지가 넓게 발달된 곳은 드문 것이 현실이다. 간척지외 기수역 중 시설재배지가 넓게 분포하는 곳으로는 섬진강 하구와 낙동강 하구가 있으며, 낙동강 하구의 김해평야 지대의 경우 낙동강 하구둑이 염해를 차단하고 있어 염해에 따른 피해가 거의 보고되고 있지 않다.

우리나라의 5대강 중 하나인 섬진강은 수질과 생태계가 비교적 잘 보전된 곳으로, 전라남도와 전라북도 그리고 경상남도의 주요한 수자원으로서 중요한 사회적 산업적 문화적 기능을 담당하고 있다. 최근 섬진강 유역에 광양제철소 등 대형 공업단지가 들어서고 주변 도시가 팽창함에 따라 양질의 용수소비량이 급격하게 증가하면서 섬진강 유역에 섬진강댐, 주암댐, 동복댐 등 대규모 다목적댐이 새롭게 건설되었다. 이에 따라 섬진강 하류로 유입되는 수량이 크게 감소되고 있어 섬진강 하류에서 만조 시 해수유입 거리가 상류 쪽으로 크게 확대되고 있는 실정이다. 최근 보고에 따르면 만조 시 바닷물이 해안으로부터 약 40 km 이상 떨어져 있는 하동군 읍내 지역까지 역류하는 것으로 알려져 있다 (초당대학교 환경기술연구소, 2005). 최근 주변 지하수의 염화가 심화되어 생활용수 및 농업용수로서의 가치가 상실되고 있다는 민원이 끊임없이 발생하고 있어 이에 대한 정확한 조사가 필요한 실정이다 (이슬기 등, 2008). 전통적으로 섬진강 하구지역의 하동군 목도리와 광양시 진월면 지역은 오랜 시설재배지 역사를 가지고 있으며, 애호박 및 양상추가 이 지역의 소득 작목으로 재배되고 있다. 이 지역에서는 겨울철 시설재배지 보온을 위해 수막시설을 운영해오고 있으며, 날씨가 추워지기 시작하는 11월 이후 많은 양의 지하수를 이용하여 온실 내를 보온하고 있다. 그러나 최근 섬진강 하구에 위치한 광양시 진월면과 하동군 고전면의 시설재배단지에서 염류피해로 추정되는 작물의 발아율 저하, 생육 및 수량감소, 그리고 품질저하 등의 사례가 지속적으로 발생함에 따라 본 연구의 테스트베드 지역으로 고려할 수 있다.

2. 대상지역의 농업환경

가. 간척지

(1) 고흥간척지

고흥간척지는 1991년 방조제 공사를 착공하여 1998년 완공하였고, 내부 개답공사는 1996년 착공하여 2008년 준공하였으나 아직까지 준공 등록은 되지 않은 상태이다. 준공 등록이 되지 않은 것은 고흥군청에서 토지의 소유권을 가진 농어촌공사에 지속적으로 토지이용 용도변경을 요구하고 있는 상황을 반영한 결과이다. 총 매립면적 3,100 ha로 간척농지 2,057 ha, 담수호 745 ha, 인공습지 280 ha, 항공센터와 활주로가 16.5 ha를 차지하고 있다.

고흥간척지는 광양항과 가까워 농산물 수출에 유리하므로 2010년 농식품부 고시 ‘대규모 간척지 활용 기본구상’에서 첨단수출원에·바이오에너지단지 조성을 특성화 방향으로 설정하였다 (한국농촌경제연구원, 2014). 기본구상에서는 친환경농업, 수도작, 조사료 및 바이오에너지작물을 포함하는 복합곡물단지가 1,760 ha로 가장 큰 부분을 차지하며, 파프리카와 토마토 등을 재배하기 위한 수출전용 첨단유리온실을 갖춘 첨단수출원예단지가 200 ha를 차지한다. 그밖에 초지와 축사를 포함하는 친환경축산단지 67 ha, 유통·가공·물류 등의 기능을 담당하는 지원시설단지 20 ha, 생태습지와 연계하여 경관작물을 식재하는 관광농업단지 10 ha 등의 토지이용계획을 갖고 있다.

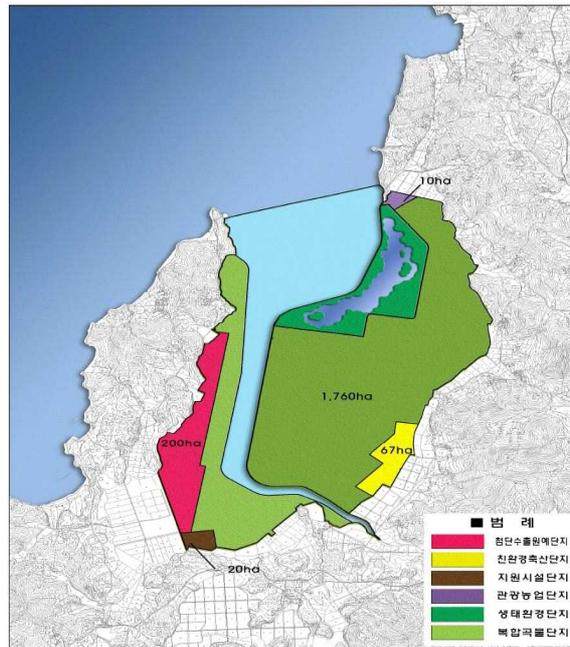


그림 6.1 고흥지구 첨단수출원예·바이오에너지단지 토지이용계획 (농림수신식품부, 2010)

이에 반해, 지자체가 계획한 고흥지구의 연도별 토지이용계획은 다음 표와 같다. 지자체가 계획한 연도별 간척지 토지이용계획은 2017년까지 2,057 ha에 달하며, 복합곡물단지, 원예단지, 관광농업단지, 첨단유리온실단지로 활용될 예정으로 시설재배지 이용이 포함된 것을 확인할 수 있다.

표 6.4 고흥간척지 용도별 사업계획

구분	면적 (ha)	사업내용	연도별 이용계획 (ha)				
			2013	2014	2015	2016	2017
합계	2,057						
복합곡물단지	1,667	복합곡물단지, 조사료	1,431	218			
일반원예단지	150	토양격리재배 시설작물		150			
친환경축산단지	100	축산테마단지		100			
관람농업단지	100	국립농업생태테마공원		40	20	20	20
침단수출원예단지	30	침단수출원예 유리온실			30		
지원시설단지	22	조사료 유통센터, 가축분료 공동자원화센터, 도정시설		15	7		
채종단지	6	채종단지		6			

고흥간척지의 경우 2003년부터 일부지역에 일시경작을 시작하여 2010년과 2011년에는 수도작 1,471 ha와 사료작물 99 ha 등 총 1,570 ha를 경작하였고, 2012년에는 수도작 1,504 ha와 사료작물 155 ha 등 총 1,659 ha를 경작하였다. 사료작물로는 여름에는 옥수수과 피, 겨울에는 이탈리아 라이그라스를 재배하였으며, 2011년에는 해바라기를 재배하였으나 실패하였다 (한국농촌경제연구원, 2014). 개답농지의 표고가 담수호의 수면보다 1 m 더 높은데도 담수호의 수압이 높아 배수가 어려우므로 간이배수장이 필요하며, 배수갑문의 용량이 적어 배수갑문을 확장하거나 추가적인 배수시설이 필요한 실정이다 (한국농촌경제연구원, 2014). 하지만, 고흥간척지의 경우 토양 및 담수호의 염분 농도가 낮아 수도작 등 작물의 재배에 유리한 편인 것으로 평가되고 있다. 담수호의 염분농도가 2008년 현재 1.0 dS/m로 나타났으며, 토양 염분농도는 평균 4.8 dS/m로 1.0~10.5 dS/m의 범위를 보이는 것으로 조사되어 비교적 낮은 토양 염분농도를 나타내는 것으로 분석되었다. 하지만, 지하수 염도는 1.0~46.3 dS/m로 고염도 구간이 많은 면적에 분포하는 것으로 조사되었다 (한국농업경영포럼, 2013).

(2) 이원간척지

이원간척지는 1990년에 착공하여 1997년 방조제 공사를 완공하였고, 2009년 내부 개답공사까지 완공하여 2012년 준공인가를 받았다. 총 매립면적은 1,352 ha로 농지가 847 ha, 담수호가 290 ha이다. 이원간척지가 위치한 태안군은 태안 꽃박람회 등 화훼산업이 발전해 있으며, 이에 따라 2010년의 농림수산물부 고시 ‘대규모 간척지 활용 기본구상’에 포함되어 수출·관광용 화훼단지 조성이라는 특성화 방향으로 간척지 토지이용계획을 설정되었다. 농림수산물부의 기본구상에서는 친환경농업, 수도작, 조사료 및 바이오에너지작물을 포함하는 복합곡물단지가 414 ha로 가장 큰 부분을 차지하며, 화훼중심의 수출전용 침단유리온실을 갖춘 침단수출원예단지가 300 ha를 차지한다. 그밖에 초지와 축사를 포함하는 친환경축산단

지 113 ha, 유통·가공·물류 등의 기능을 담당하는 지원시설단지 10 ha, 꽃 박람회와 연계하여 농업공원을 포함하는 관광농업단지 10 ha 등의 토지이용계획을 갖고 있다 .

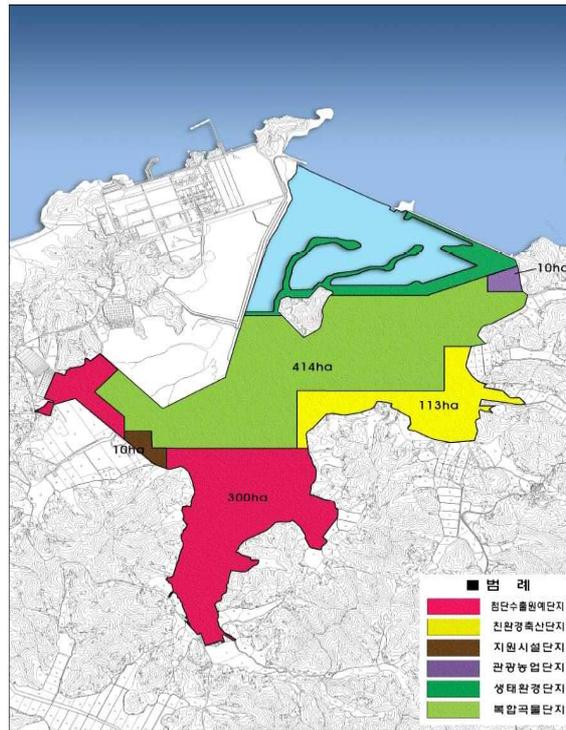


그림 6.2 이원지구 수출·관광용 화훼특화단지 토지이용계획 (농림수신식품부, 2010)

이에 반해, 지자체가 계획한 이원지구의 연도별 토지이용계획은 다음 표와 같다. 지자체가 계획한 연도별 이용계획은 2017년까지 총 847 ha이며, 복합곡물단지, 침단수출 원예단지, 그리고 관광단지로 활용될 예정으로 시설재배지 이용이 포함된 것을 확인할 수 있다.

표 6.5 이원지구 용도별 사업계획

구분	면적 (ha)	사업내용	연도별 이용계획 (ha)				
			2013	2014	2015	2016	2017
합계	847		709				
복합곡물단지	687	수도작	709				▽22
침단수출원예단지	150	수출·관광용 화훼단지		40	30	40	40
관광농업단지	10	태안 꽃박람회와 연계한 관광휴양단지			10		

이원간척지는 2012년에 수도작 709 ha가 일시 경작된 바 있으나, 토양 배수가 불량하고 토양과 담수호의 염분농도가 높아 작물재배가 불리한 여건이다. 간척지구의 담수호 염분농도는 2008년 9.8 dS/m로 나타났으며, 토양 염분농도는 평균 14.6 dS/m로 6.5~37.5 dS/m의 범위로 나타나 높은 염도수준을 보이는 것으로 분석되었다 (한국농업경영포럼, 2013). 또

진월면 인근의 시설재배지 토양의 평균 pH는 전국 시설재배지 토양의 평균값과 유사한 6.4로 분석되었으며, 염류의 농도를 나타내는 EC값은 평균 4.3 dS/m로 2000년대 우리나라 시설재배지 평균 EC 2.9 dS/m보다 크게 높은 것으로 나타났다 (농림과학기술원, 2006, 이슬비 등, 2008). 이는 염류집적지 기준인 EC 4.0 dS/m의 기준을 초과하는 것으로 상당량의 염류가 집적되어 있음을 알 수 있다 (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954). 특히, 특정 시설재배지에서는 최고 EC 10.4 dS/m까지 확인되어 염에 대해 민감한 작물은 밭아 혹은 정식 초기부터 충분히 염해를 입을 수 있을 것으로 판단된다 (이슬비 등, 2008).

해당지역 시설재배지에서는 작물의 수분관리와 겨울철 수막운영을 위해 오랫동안 지하수를 관개용수로 사용해오고 있으며, 대부분의 경우 10 m 깊이 이내의 천층지하수를 개발하여 이용하고 있다. 진월면 인근의 시설재배지의 관개용수인 지하수를 분석한 결과 EC가 평균 2.6 dS/m로 비교적 높은 염을 함유하고 있는 것으로 나타났으며, 30분 이상 관정을 취수한 후에도 육안으로 검은색의 탁수가 지속되는 것을 확인한 바 있다 (이슬비 등, 2008). 또한, 해당지역의 지하수의 평균 염소농도가 407 mg/L로 우리나라 지하수 농업용수 수질기준인 250 mg/L를 크게 초과하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 해당지역과 같이 수막을 운영하는 지역에서는 동절기 물 사용량이 급증하기 때문에 이 시기에 염화가 심화된 강물이 지하수대로 유입되어 지하수 중 염의 농도가 크게 높아질 수 있다. 실제 관개용수 용 지하수의 EC값이 지하수의 사용량이 적었던 6월부터 9월까지 2.0 dS/m를 조금 상회하는 상대적으로 낮은 수준을 유지하였으나 11월 이후 관개수 중 염 농도가 급격하게 증가하여 6.0~8.0 dS/m의 높은 수준을 나타냈다 (이슬비 등, 2008).

이와 같은 농업환경으로 인해 최근 진월면의 시설재배 농가는 진월면에서의 시설재배를 포기하고 인근 지역인 광양시 진상면으로 이주하고 있는 것으로 탐문조사 결과 나타났다. 진월면의 염해피해는 육안으로도 들어날 정도였으며, 오랜 시간 진월면에서 양상추를 재배해 온 많은 농가들이 지속가능한 영농활동이 불가능할 것으로 판단하고 있다. 이것은 지속적인 염수의 관개용수로의 사용에 따른 토양에의 염분집적과 지하수 거동의 변화에 따른 것으로 대대적인 토양개선사업과 관개용수 수처리없이 농업환경을 개선하기 어려울 것으로 판단되었다.

3. 테스트베드 지역 선정 및 염해피해 현황

가. 광양시 청암뜰

본 연구를 위한 간척지의 기수역의 기수담수화 시스템 적용대상 지역으로는 문헌조사와 탐문조사를 통해 현재 염해가 발생하고 있는 전라남도 광양시 진월면 일대로 선정하였다. 앞서 언급한 바와 같이 광양시 진월면 일대가 더 큰 규모로 시설재배지가 존재하나, 이미 염해에 따른 토양환경의 오염정도가 심각하여 기수담수화 시스템만으로는 실질적인 효과를 기대하기 어려운 것으로 판단되었다. 염해피해의 정도가 진월면보다 상대적으로 적은 진월면 일대는 각종 메스컴을 통해서 ‘청암뜰 염해피해’로 보고된 바 있으며, 현장 탐문조사를 통해서도 염해피해를 확인할 수 있었다.

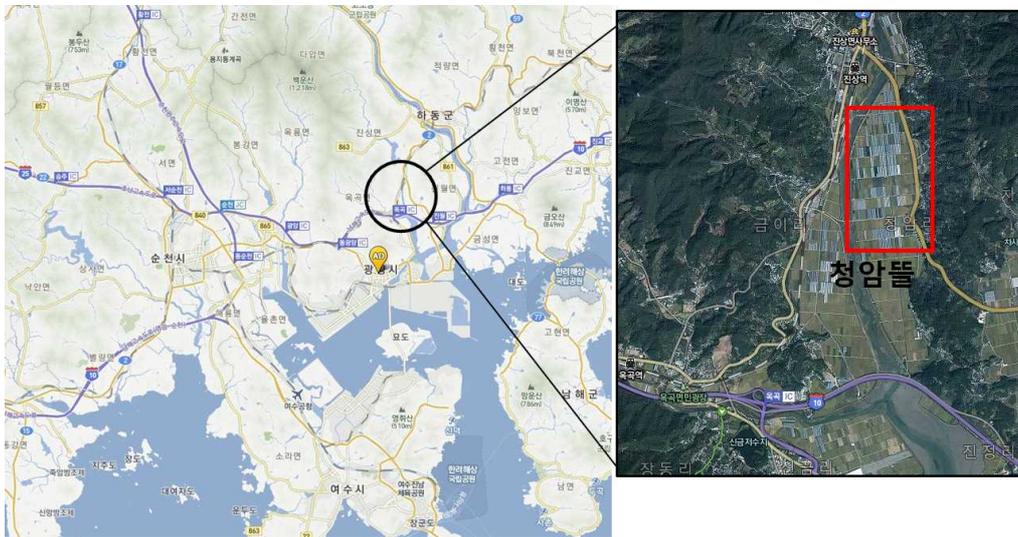


그림 6.4 전라남도 광양시 진월면의 청암뜰



그림 6.5 광양시 진월면에 위치한 청암뜰 시설재배단지 일부전경

논관개용수의 증가와 시설재배작물의 수확으로 염해가 상대적으로 덜한 6월에도 지속적인 염해피해가 발생하는 것으로 나타났다.



고추에 나타난 염해피해



애호박에 나타난 염해피해

그림 6.6 청암뜰에 위치한 시설농가의 염해피해 현황 (2015년 6월)

특히, 이와 같은 염해피해는 모종에 더 크게 나타나는 것으로 조사되었다. 이는 모종의 생육에 관개수의 염분이 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 아래 그림은 청암뜰에 위치한 시설농가에서 시설재배지에 이식하기 위해 육묘 중인 들깨, 가지, 그리고 고추 모종으로 대부분의 모종에서 큰 염해피해가 발생하는 것을 확인할 수 있다.



들깨 모종



가지 모종



고추 모종

그림 6.7 청암뜰 시설재배농가 모종에서 발생한 염해피해 (2015년 6월)

나. 고흥간척지

실제 침단유리온실 및 일반원예단지에 대한 개발계획이 있는 서해안과 남해안의 전국 간척지를 대상으로 분석한 결과 현재 시설원예단지가 조성된 곳은 간척지가 준공되고 해당지 자체가 침단수출원예단지의 조성 계획을 수립하고 있는 이원간척지와 고흥간척지 두 곳으로 조사되었다. 하지만 이원간척지의 경우에는 실제적으로 시설재배지에 대한 영농활동이 이루어지는 것이 아니라 농촌진흥청 국립농업과학원의 간척지 시설원예단지 실증연구의 일환으로 200평 규모의 온실이 설치되어 시설원예단지의 구조적인 타당성을 검증하고 있으며,

이나마 연구과제가 종료되는 2015년 하반기에 철거할 예정으로 본 연구에서 적용할 수 없는 한계가 있는 것으로 조사되었다. 이에 반해, 전라남도 고흥군에 위치한 고흥간척지의 경우, 간척지 내에 규모화된 첨단시설원예단지가 존재하는 것으로 조사되었다. 본 첨단시설원예단지는 7 ha 규모의 대형 시설재배지로서 홍양영농조합법인이 토마토와 파프리카를 재배하고 있다. 현장 방문조사 결과 향후 고흥간척지에 홍양영농조합법인이 주도적으로 시설원예단지를 확장할 계획이 있는 것으로 나타났다. 따라서 간척지를 대상으로 한 중대형 기수담수시스템의 적용대상으로는 고흥간척지를 고려할 수 있다. 다음 그림은 고흥간척지에 위치한 홍양영농조합법인의 시설재배단지의 일부전경을 보여주고 있다.

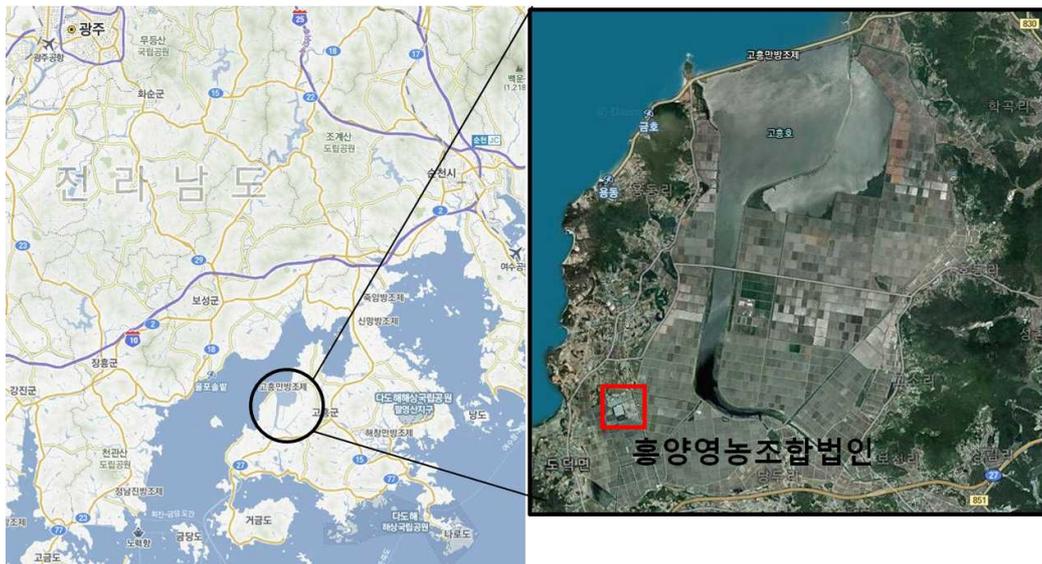


그림 6.8 전라남도 고흥군 고흥간척지의 홍양영농조합법인



그림 6.9 고흥간척지에 위치한 홍양영농조합법인의 시설재배단지 전경

4. 테스트베드 지역의 관개용수 오염수지 분석

개발된 기수담수화 시스템의 현장 적용성을 평가하기 위해서는 적합한 대상지역 선정을 통한 현장실험이 이루어져야 한다. 관개용수의 수질특성을 포함한 농업환경은 현장실험을 위한 기수담수화 시스템의 설계에 있어 가장 중요한 요인으로 대상지의 관개용수 수질특성에 따라 현장에 적용하게 되는 기수담수화 시스템이 달라질 수 있다. 따라서 기수담수화 시스템의 현장적용을 위해서는 대상지역의 관개용수의 오염수지를 분석하여 적합한 목표수질을 설계하고, 이를 통한 맞춤형 기수담수화 시스템의 개발이 필요하다. 현장에 적용하게 될 기수담수화 시스템은 목표수질을 통한 적합한 공정의 설계와 운영기술을 확보하는 것도 중요하지만, 적합한 용량산정을 통한 기수담수화 시스템의 설계용량 결정이 필요하다. 따라서 시설재배지의 증발산현상에 대한 이해를 바탕으로 대상 시설재배작물의 필요수량 산정을 통한 관개용수량을 결정하여야 한다. 이에 기수담수화 시스템 설치·운영 전에 기수담수화 시스템의 적용대상지역인 고흥간척지의 흥양영농조합법인과 광양시 진상면 일대의 시설재배지를 대상으로 관개용수의 오염수지를 분석하고, 흥양영농조합법인의 대상 시설재배작물인 토마토와 광양시 청암뜰의 대상 시설재배작물인 애호박에 대한 관개용수량 산정을 통해 현장 맞춤형 기수담수화 시스템 적용을 위한 목표수질과 용량을 설계하도록 한다.

가. 광양시 청암뜰

광양시 진상면에 위치한 청암뜰은 다수의 언론보도에서와 같이 최근 염해피해가 가장 많이 발생하고 있는 간척지이외 지역으로 연구진행과정에서 개발된 기수담수화 시스템의 pilot plant를 보완하여 적용할 수 있다. 탐문조사 결과 청암뜰에서는 현재도 염해피해가 지속되고 있으며, 문제해결을 위해 관련기관인 전라남도, 한국수자원공사, 그리고 광양시가 원인규명을 위한 용역과제를 추진 중에 있다. 기수담수화 시스템의 현장적용을 위해 관개용수의 오염수지를 파악하고자 염해피해가 발생하고 있는 대상지역의 관개용수를 샘플링하고 수질 분석을 실시하였다. 다음 그림은 청암뜰의 수질샘플링지점을 도시하고 있다.



그림 6.10 청암뜰 수질샘플링지점

수질샘플링지점 청암뜰 1과 2의 수질분석 결과는 아래 표에 나타내었다. 청암뜰 1과 청암뜰 2의 분석결과에 다소간의 차이가 있으나, 유사한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 두 지점 모두 염분수준이 본 연구에서 제안한 수질기준을 크게 초과하고 있으며, 특히, 청암뜰 1의 경우에는 관개용수의 EC 수준이 일반적인 범주의 채소를 재배하기에는 부적합한 것으로 분석되었으며, 청암뜰 2의 경우에도 민감한 채소작물의 관개용수로는 부적합한 것으로 나타났다. 대상지역의 관개용수 수질을 채취한 시점이 논 관개용수 등의 영향으로 겨울철에 비해 우수한 수준임을 감안할 때, 겨울철의 염해피해는 보다 심각할 것으로 판단된다.

표 6.6 청암뜰 시설재배지 관개용수 수질 분석결과

수질항목	기준치*	분석결과	
		청암뜰 1	청암뜰 2
pH	6.0-8.5a	6.7	7.4
EC ($\mu s/cm$)	$\leq 300a$	5,820	830
Ca (mg/L)	$\leq 80a$	206.8	12.9
Mg (mg/L)	$\leq 20a$	240.7	8.3
Na (mg/L)	$\leq 30a$	1,699.2	147.3
염화물 (mg/L)	$\leq 50a$	1607.8	162.0
황화물 (mg/L)	$\leq 50a$	142.2	47.7
Fe (mg/L)	$\leq 1.0a$	0.121	0.224
Mn (mg/L)	$\leq 0.2a$	0.917	0.083
Cu (mg/L)	$\leq 0.2a$	불검출	불검출
Zn (mg/L)	$\leq 0.3a$	0.008	0.003
B (mg/L)	$\leq 0.3a$	0.04	0.06
Cd (mg/L)	$\leq 0.01a$	불검출	불검출
Cr (mg/L)	$\leq 0.05a$	-	-
Ni (mg/L)	$\leq 0.2a$	-	-
Pb (mg/L)	$\leq 0.1a$	불검출	불검출
Co (mg/L)	$\leq 0.05a$	-	-
Li (mg/L)	$\leq 2.5a$	-	-
Mo (mg/L)	$\leq 0.05a$	0.00	0.01
CN (mg/L)	불검출	불검출	불검출
폴리클로리네이티드비페닐 (PCB)	불검출	불검출	불검출
Suspended solids (mg/L)	$\leq 15a$	22.0	13.0
E.coli ($MPN/100mL$)	$\leq 10b$ (max)		
총대장균군수 ($MPN/100mL$)	-	17	5

* 본 연구에서 제안한 수질항목별 기준치임

a 수질기준의 적용을 위한 모니터링 기간에 대한 산술평균값이 본 기준을 만족하여야 함

b 80%이상의 수질 샘플이 불검출이어야 함

수질샘플링지점을 포함하는 시설재배지의 토양환경을 파악하기 위한 시설재배지 토양 샘플링 및 분석을 실시하였다. 토양성분분석 결과는 다음 표와 같다. 일반적으로 토양의 EC가 4.0 dS/m를 초과할 경우 염분에 오염되었다고 판단하며, 이에 따르면 청암뜰 1과 청암뜰 2는 염해에 따른 농작물의 피해를 예상할 수 있다. 따라서 깨끗한 관개용수를 사용한 재염을 수행할 수 있는 관리용수의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

표 6.7 청암뜰 시설재배지 토양성분 분석결과

분석항목	청암뜰 1	청암뜰 2
pH	5.3	6.2
EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	5,590	6,230
유기물함량 (%)	8.50	7.67
총질소 (mg/kg)	457	442
총인 (mg/kg)	2845.8	2732.8
유효인산 (P2O5) (mg/kg)	1257.6	789.4
CEC (cmol/kg)	39.0	26.3
Ca (mg/kg)	2311.1	2702.8
Mg (mg/kg)	464.8	568.8
K (mg/kg)	956.4	971.4
Na (mg/kg)	648.2	469.5

나. 고흡간척지

고흡간척지 홍양영농조합의 경우, 대규모의 시설재배지를 조성하고 있으며 양액재배를 기반으로 하기 때문에 많은 관개용수가 필요하다. 현재 홍양영농조합은 관개용수를 지하수와 우수를 조합하여 사용하고 있으며, 관개용수에 사용되는 지하수 수질은 다음 표와 같다. 고흡간척지는 다른 간척지와 달리 담수호의 염분수준이 양호하며, 이와 같은 상황이 지하수 수질에도 잘 반영된 것을 확인할 수 있다.

표 6.8 홍양영농조합법인 시설재배지 관개용수에 사용되는 지하수 수질현황

분석 항목	분석 결과	단위	분석 결과	단위
pH	6.6			
전기전도도(EC)	0.2	dS/m		
질산이온(NO3)	0.4	mmol/L	26	ppm
염소이온(Cl)	0.4	mmol/L	13	ppm
황(S)	<0.2	mmol/L	<19	ppm
중탄산이온(HCO3)	1.3	mmol/L	81	ppm
인(P)	<0.02	mmol/L	<1	ppm
암모늄이온(NH4)	<0.1	mmol/L	<2	ppm
칼륨(K)	<0.2	mmol/L	<8	ppm
나트륨(Na)	1.0	mmol/L	23	ppm
칼슘(Ca)	0.3	mmol/L	14	ppm
마그네슘(Mg)	<0.2	mmol/L	<5	ppm
규소(Si)	0.48	mmol/L	13	ppm
철(Fe)	<0.2	μmol/L	<0.01	ppm
망간(Mn)	<0.2	μmol/L	<0.01	ppm
아연(Zn)	<0.2	μmol/L	<0.01	ppm
붕소(B)	2.3	μmol/L	0.02	ppm
구리(Cu)	<0.2	μmol/L	<0.01	ppm
몰리브덴(Mo)	<0.2	μmol/L	<0.02	ppm

우수농산물인증을 위해 매년 1회씩 수질검사를 받아야 하며, 양액재배 용수에 대한 수질 분석 결과(2014년 6월)는 다음 표와 같다.

표 6.9 우수농산물인증을 위한 홍양영농조합법인 양액재배 용수 수질분석 결과

수질분석 항목	규격기준	제1농장 분석결과	제2농장 분석결과
pH	6.0-8.5	7.0	6.8
염소이온	250 이하 (mg/L)	67	10
질산성질소	20 이하 (mg/L)	17.5	3.5
비소	0.05 이하 (mg/L)	불검출	불검출
카드뮴	0.01 이하 (mg/L)	불검출	불검출
납	0.1 이하 (mg/L)	불검출	불검출
6가크롬	0.05 이하 (mg/L)	불검출	불검출
수은	0.0010 이하 (mg/L)	불검출	불검출
시안	0.01 이하 (mg/L)	불검출	불검출
페놀	0.005 이하 (mg/L)	불검출	불검출
유기인	0.0005 이하 (mg/L)	불검출	불검출
트리클로로에틸렌	0.03 이하 (mg/L)	불검출	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01 이하 (mg/L)	불검출	불검출
1.1.1-트리클로로에탄	0.3 이하 (mg/L)	불검출	불검출

홍양영농조합은 현재 두개의 농장으로 구성되어 있으며, 두 농장 모두 우수농산물 규격기준에 적합한 것으로 조사되었으며, 이는 상대적으로 우수한 관개용수를 확보하고 있는 것을 의미한다. 하지만 기존에 개발하여 사용하던 관정에서 양액재배에 적합하지 않은 수준의 염소이온농도와 나트륨농도가 지속적으로 모니터링된 바 있으며, 이에 따라 기존에 사용하던 관정을 폐쇄하고, 현재 농장에서 3 km 떨어진 지점에 새롭게 관정을 개발한 바 있다. 또한, 홍양영농조합은 향후 고흥간척지 안에 대규모 첨단유리온실 개발 계획을 가지고 있으며, 개발될 시설재배단지에 관개용수는 지하수만으로는 공급할 수 없다. 이에 홍양영농조합은 시설재배지의 확충에 따른 관개용수를 인근 용수로에서 공급할 계획을 가지고 있다.



그림 6.11 홍양영농조합법인 인근 용수로 전경

따라서 본 연구에서는 지표수를 대상으로 하는 시설재배지 기수담수화 시스템을 개발 및 적용하기 위하여 대상 용수로의 수질을 조사 분석하였다. 아래 그림과 같이 홍양영농조합법인 인근 용수로에서 채취한 향후 사용계획 중인 관개용수의 수질을 분석하였으며, 분석결과는 아래 표에 나타내었다.



그림 6.12 고흥간척지 홍양영농조합법인 수질샘플링지점

홍양영농조합에서 사용계획에 있는 용수로는 EC, Na⁺, 그리고 염화물 등이 본 연구에서 제안한 수질기준을 크게 상회하는 것으로 나타남에 따라 시설재배지에서 사용하기에는 다소간 높은 염분수준으로 분석되었다. 중금속 등 미량원소 함량은 수질기준을 만족시킴에 따라 미량원소에 의한 피해는 거의 없을 것으로 분석되었다. 다만, 현장답사결과 용수로로 생활하수가 흘러드는 점을 감안할 때 하수를 관개용수로 사용할 수도 있는 가능성을 염두한 인체위해성 측면에서의 접근이 필요하다. 특히, 용수로 관개용수 수질 분석결과 다소간 높은 수준의 총대장균군이 검출됨에 따라 *E.coli*보다 총대장균군수의 농도가 더 높은 자연계의 현실을 고려하더라도 본 연구에서 제안된 수질기준을 상회한다고 볼 수 있다. 환경부에서는 하수처리수를 농업용수로 이용함에 있어 수질기준을 제안한 바 있으며, 채소와 같은 직접식용 작물을 대상으로 총대장균군수가 불검출이어야 하지만 용수로의 수질은 이를 크게 상회함에 따라 관개용수로 사용 시 적합한 조치가 필요하다. 따라서 본 용수로를 시설재배용수로 사용하기 위한 기수담수화시스템은 위생과 염분을 모두 고려할 수 있는 공정설계가 필요한 것으로 판단된다.

표 6.10 홍양영농조합 인근 용수로 관개용수 수질 분석결과

수질항목	기준치*	분석결과
pH	6.0-8.5 ^a	7.3
EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	$\leq 300^a$	1,770
Ca (mg/L)	$\leq 80^a$	71.4
Mg (mg/L)	$\leq 20^a$	44.4
Na (mg/L)	$\leq 30^a$	234.5
염화물 (mg/L)	$\leq 50^a$	385.6
황화물 (mg/L)	$\leq 50^a$	83.5
Fe (mg/L)	$\leq 1.0^a$	0.07
Mn (mg/L)	$\leq 0.2^a$	0.004
Cu (mg/L)	$\leq 0.2^a$	불검출
Zn (mg/L)	$\leq 0.3^a$	0.03
B (mg/L)	$\leq 0.3^a$	0.26
Cd (mg/L)	$\leq 0.01^a$	불검출
Cr (mg/L)	$\leq 0.05^a$	-
Ni (mg/L)	$\leq 0.2^a$	-
Pb (mg/L)	$\leq 0.1^a$	불검출
Co (mg/L)	$\leq 0.05^a$	-
Li (mg/L)	$\leq 2.5^a$	-
Mo (mg/L)	$\leq 0.05^a$	0.00
CN (mg/L)	불검출	불검출
폴리클로리네이티드비페닐 (PCB)	불검출	불검출
Suspended solids (mg/L)	$\leq 15^a$	25.0
E.coli ($\text{MPN}/100\text{mL}$)	$\leq 10^b$ (max)	-
총대장균군수 ($\text{MPN}/100\text{mL}$)	-	730

* 본 연구에서 제안한 수질항목별 기준치임

a 수질기준의 적용을 위한 모니터링 기간에 대한 산술평균값이 본 기준을 만족하여야 함

b 80%이상의 수질 샘플이 불검출이어야 함

5. 기수담수화 시스템 목표수질 설정

기수담수화 시스템을 현장에 적용하기 위해서는 대상지역의 수질현황을 포함한 영농환경을 고려하여 시스템의 목표수질을 설정하여야 한다. 목표수질 설정을 통해 기수담수화 시스템의 필수공정과 추가적인 공정 설계를 통한 현장맞춤형 기수담수화 시스템의 제작이 가능하다. 따라서 본 절에서는 현장적용지구의 관개용수 수질현황을 바탕으로 현장적용지구의 대상작물과 시설재배 형태를 고려하여 시설재배용수의 적합한 목표수질을 도출함으로써 현장맞춤형 기수담수화 시스템의 목표수질을 설정하고자 한다.

가. 광양시 청암뜰

청암뜰의 경우 관개용수의 높은 염도를 인한 작물생육 장애가 발생하는 지역으로 개발된 기수담수화 시스템의 설계공정을 따라 현장에 적용할 수 있다. 염도에 따른 작물의 생육장애가 발생함에 따라 염도와 관련된 항목에 중점을 둔 시스템의 목표수질 설정이 필요하다. 특히, FAO (1994)에 따르면 애호박의 경우 관개용수의 염도수준이 3.1 dS/m에서도 수확량의 감소가 발생하지 않는 내염성이 높은 작물임에도 불구하고, 청암뜰의 토양오염 상황과 비닐하우스의 영농방법을 고려하여 보다 엄격하게 제한되어야 한다. 또한, 치환성 양이온이 높은 수준으로 검출됨에 따라 이를 관리할 수 있는 적합한 목표수질과 시스템의 적용이 요구된다. 이와 같은 상황을 고려하여 제안된 목표수질은 다음 표와 같다.

표 6.11 고염도 지하수를 관개하는 청암뜰의 기수담수화 시스템 목표수질

수질항목	기준치*	분석결과 (청암뜰 1)	목표수질
pH	6.0-8.5a	6.7	현재유지
EC ($\mu s/cm$)	$\leq 300a$	5,820	300
Ca (mg/L)	$\leq 80a$	206.8	80
Mg (mg/L)	$\leq 20a$	240.7	20
Na (mg/L)	$\leq 30a$	1,699.2	30
염화물 (mg/L)	$\leq 50a$	1607.8	50
황화물 (mg/L)	$\leq 50a$	142.2	50
Fe (mg/L)	$\leq 1.0a$	0.121	현재유지
Mn (mg/L)	$\leq 0.2a$	0.917	0.2
Cu (mg/L)	$\leq 0.2a$	불검출	현재유지
Zn (mg/L)	$\leq 0.3a$	0.008	현재유지
B (mg/L)	$\leq 0.3a$	0.04	현재유지
Cd (mg/L)	$\leq 0.01a$	불검출	현재유지
Cr (mg/L)	$\leq 0.05a$	-	-
Ni (mg/L)	$\leq 0.2a$	-	-
Pb (mg/L)	$\leq 0.1a$	불검출	현재유지
Co (mg/L)	$\leq 0.05a$	-	-
Li (mg/L)	$\leq 2.5a$	-	-
Mo (mg/L)	$\leq 0.05a$	0.00	현재유지
CN (mg/L)	불검출	불검출	현재유지
폴리클로리네이티드비페닐 (PCB)	불검출	불검출	현재유지
Suspended solids (mg/L)	$\leq 15a$	22.0	10
E.coli ($MPN/100mL$)	$\leq 10b$ (max)	-	-
총대장균군수 ($MPN/100mL$)	-	17	현재유지

* 본 연구에서 제안한 수질항목별 기준치임

a 수질기준의 적용을 위한 모니터링 기간에 대한 산술평균값이 본 기준을 만족하여야 함

b 80%이상의 수질 샘플이 불검출이어야 함

나. 고품간척지

양액재배를 실시하는 영농환경을 감안하여 목표수질을 설정할 필요가 있다. 안전한 양액재배 시설원에 용수를 공급하기 위해서는 관수파이프의 막힘 등의 관개시스템에 문제를 야기하지 않는 수준의 수질이 담보되어야 하며, 우수농산물인증을 받을 수 있는 수준의 관개용수 수질이어야 한다. 현재 홍양영농조합법인은 지표수를 양액재배에 활용하기 위하여 대장균군 등 미생물에 대한 통제를 엄격하게 하고자 노력하고 있으며, 우수농산물인증을 위한 관개용수 수질관리 역시 매우 중요한 사항이다. 앞서 언급한 바와 같이 현재 홍양영농조합법인 인근의 용수로는 생활하수가 유입되고 있는 실정으로 환경부의 하수재이용 수질기준을 따라야 한다. 따라서 토마토 재배를 위해 총대장균군이 검출되지 않아야 한다. 대상작물인 토마토는 염해에 대해 중간정도의 내염성을 가지고 있지만 양액재배 시 보다 우수한 수질이 담보되어야 한다. FAO (1994)에서는 토마토 재배를 위한 적합한 수준의 염도수준을 EC를 기준으로 1.7 dS/m로 제안하고 있으나, 보다 엄격한 관리를 위해서는 재염시설이 반드시 포함되어야 하며, 이를 위한 목표수질을 마련할 필요가 있다.

앞서 제안된 시설재배지 관개용수 수질기준(안)은 일반적인 시설재배지 전반의 관리를 위한 기준으로 수출을 목표로 하는 우수농산물생산을 위해서는 보다 엄격한 관개용수 수질이 필요한 것이 현실이다. 따라서 다음과 같이 현재의 수질상황을 고려하여 기수담수화 시스템의 목표수질을 설정할 수 있다. EC와 치환성 양이온, 그리고 부유물질(SS)에 대해 현재의 관개용수 수질보다 개선된 수준의 목표수질이 요구되며, 특히 총대장균군수의 경우 불검출되어야 하는 것으로 목표수질을 설정하였다.

표 6.12 지표수를 활용한 양액재배 기반의 홍양영농조합법인의 기수담수화 시스템 목표수질

수질항목	기준치*	분석결과	목표수질
pH	6.0-8.5 ^a	7.3	현재유지
EC ($\mu s/cm$)	$\leq 300^a$	1,770	300
Ca (mg/L)	$\leq 80^a$	71.4	60
Mg (mg/L)	$\leq 20^a$	44.4	20
Na (mg/L)	$\leq 30^a$	234.5	20
염화물 (mg/L)	$\leq 50^a$	385.6	20
황화물 (mg/L)	$\leq 50^a$	83.5	20
Fe (mg/L)	$\leq 1.0^a$	0.07	현재유지
Mn (mg/L)	$\leq 0.2^a$	0.004	현재유지
Cu (mg/L)	$\leq 0.2^a$	불검출	현재유지
Zn (mg/L)	$\leq 0.3^a$	0.03	현재유지
B (mg/L)	$\leq 0.3^a$	0.26	현재유지
Cd (mg/L)	$\leq 0.01^a$	불검출	현재유지
Cr (mg/L)	$\leq 0.05^a$	-	-
Ni (mg/L)	$\leq 0.2^a$	-	-
Pb (mg/L)	$\leq 0.1^a$	불검출	현재유지
Co (mg/L)	$\leq 0.05^a$	-	-
Li (mg/L)	$\leq 2.5^a$	-	-
Mo (mg/L)	$\leq 0.05^a$	0.00	현재유지
CN (mg/L)	불검출	불검출	현재유지
폴리클로리네이티드비페닐 (PCB)	불검출	불검출	현재유지
Suspended solids (mg/L)	$\leq 15^a$	25.0	10
E.coli ($MPN/100mL$)	$\leq 10^b$ (max)	-	-
총대장균군수 ($MPN/100mL$)	-	730	불검출

* 본 연구에서 제안한 수질항목별 기준치임

a 수질기준의 적용을 위한 모니터링 기간에 대한 산술평균값이 본 기준을 만족하여야 함

b 80%이상의 수질 샘플이 불검출이어야 함

제7절 기수담수화 시스템 설계·제작 및 현장운영 평가

바닷가 인근 간척지는 조석현상에 의해 해수가 유입되고 하천으로부터 담수가 유입되어 만나는 기수역이 형성된다. 기수역에서의 염분농도는 내륙지방에 비해 비교적 높은 편이며, 높은 염분농도는 작물생육 및 수확량에 영향을 미치게 된다. 콩 및 당근, 상추, 양파와 같은 채소류는 염해에 취약한 작물로서 전기전도도가 700~800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 초과하면 작물생육에 피해가 발생한다. 높은 염분농도에서는 뿌리 장애와 함께 병을 일으키는 병원균수가 증가하기 때문에 토마토의 근부병이나 오이의 덩굴쪄짐병 등이 많이 발생할 수 있다. 이와 같은 높은 염분농도의 관개로 인해 시설원예단지에서 재배 가능한 작물이 제한될 수 있다. 또한, 원예 지구에서 염분이 섞인 지하수에 의한 피해와 가뭄에 따른 염분농도 증가에 의해 피해를 입는 사례가 발생되고 있어 농업용수 확보에 어려움을 겪고 있다. 염해피해와 함께 첨단시설 원예단지의 경우 양액재배, 점적관개 등이 많이 이용되며, 부유물 유입이 많게 되면 막힘현상으로 인해 관개효율이 떨어지므로 이를 개선하기 위한 수처리기술 적용이 필요하다.

관개용수의 높은 염분농도로 인한 작물성장 저해 및 수확량 감소 등의 농작물 피해를 감소하고 간척농지의 활용성을 제고하기 위해서 염분제거를 위한 기수담수화 기술 개발이 필요하다. 이와 같은 기수담수화 기술은 농업용수 공급을 목적으로 함에 따라 설치비가 저렴하고 유지관리 비용이 적게 소요되어야 하며, 농업용수 특성상 짧은 시간 동안에 많은 수량을 처리해야 하므로 저비용, 고효율의 시스템 설계 및 제작하며 현장 운영을 통해 작물 생육 현황을 비교하고자 한다.

1. 기수담수화 시스템 테스트베드 설계

가. 시설원예단지 규모별 기수담수화 시스템

기수담수화 시스템의 테스트베드 지역으로 선정된 광양시 청암뜰과 고흥간척지 흥양영농조합법인을 대상으로 다음과 같이 소규모와 중·대규모 시설원예단지 설계하였다. 소규모 시설원예단지 기수담수화 시스템은 일공급용량이 20톤 이하의 소용량이며, 중·대용량은 1 ha 정도의 시설원예단지에 처리수를 공급할 수 있도록 구성하였다.

(1) 소규모 시설원예단지 기수담수화 시스템 (20 톤/일 이하)

소규모 시설원예단지 기수담수화 시스템은 다음 그림과 같은 공정으로 이루어진다.

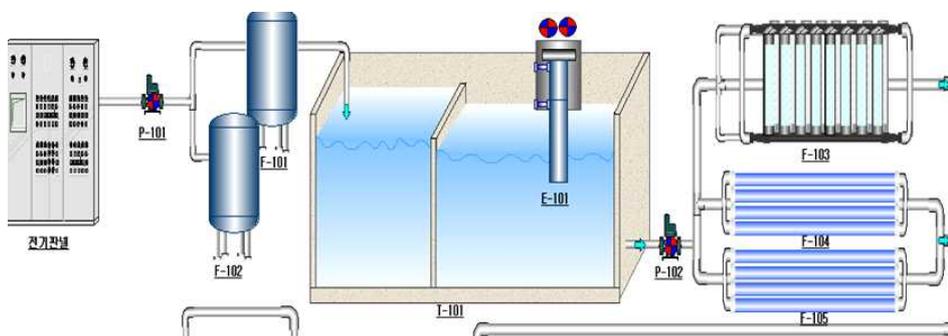


그림 7.1 소규모 기수담수화 시스템 모식도

(가) 소규모 기수담수화 시스템 설계 시 고려 사항

- 유입원수 배수지 확보
- 농축수 처리 방안 및 재활용
- 고형물 퇴비화 및 연료화 사용
- 저류조 탱크를 이용하여 매일 조금씩 물량을 확보 (20시간운전)
- 실내, 실외 설치에 따른 시설물 타입 선택
- 시스템 유지 관리 및 운전 교육

(나) 시스템 연계 활용 방안

- 처리수와 배출수의 수막재배 활용
- 농업용수 뿐 아니라 농기자재 세척수 활용

(2) 중·대규모 시설원예단지 기수담수화 시스템 (100 톤/일 이상)

중·대규모 시설원예단지 기수담수화 시스템은 다음 그림과 같은 공정으로 이루어진다.

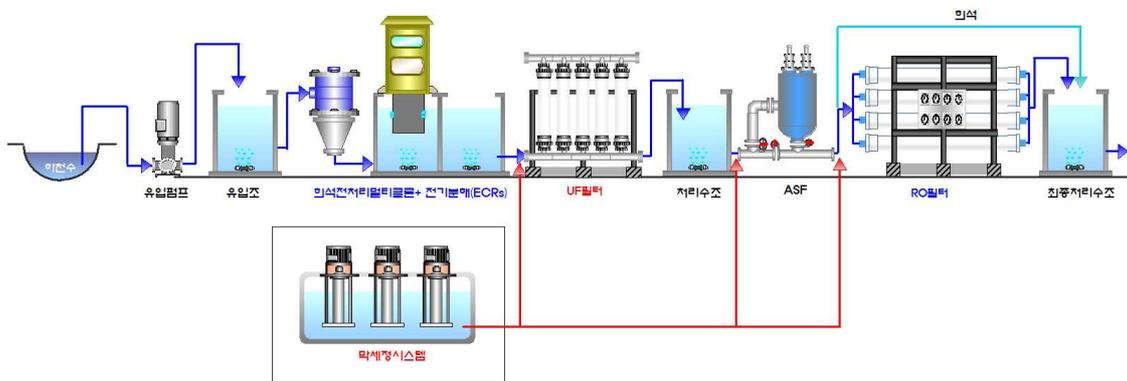


그림 7.2 중·대규모 기수담수화 시스템 모식도

(가) 중·대규모 기수담수화 시스템 설계 시 고려 사항

- 큰 용량의 유입원수 배수지 확보
- 농축수 처리 방안 및 재활용
- 고형물 퇴비화 및 연료화 사용
- 저류조 탱크를 이용하여 많은 물량 확보 및 배관으로 각각 시설단지로 이송
- 시설물 사이즈로 인해 실내에 설치
- 시스템 유지 관리 및 운전을 위해 별도운영자가 필요

(나) 시스템 연계 활용 방안

- 간척지 하천 유입수와 빗물 혼합 활용 가능
- 기수담수화 시스템 생산수와 간척지 하천 1차 처리수와 희석 사용
- 농업용수 뿐 아니라 농기자재 세척수 활용

나. 기수담수화 시스템 요소 기술

(1) 공정개발

테스트베드 적용을 위한 설계기술은 필요시 현장 이동이 차량 탑재 가능하며, 유입수 염분 농도에 따른 희석(브랜딩) 공정과 지하수 관정을 이용한 기수 담수화 시스템 공정으로 원수의 부유물질, 탁도, COD, 염분을 제거 할 수 있는 공정을 개발 하여 소요량의 기수담수 시설이 필요한 비닐하우스 단지, 원예단지에 적용하여 농업용수로 사용 시 경제성과 운영 효율에 있어 편의성이 매우 탁월한 시스템이 장점이다.

(2) 배경기술

담수화를 위한 처리방법은 전처리로 디스크필터, 가압부상, 섬유 필터, UF 막을 사용하고 있으며, 다른 장치에 비교하여 구조가 간단하기 때문에 다양한 수처리 분야에서 적용되고 있다. 디스크 필터는 가장 오래된 전처리 필터로 망에 의한 부유물질을 제거 하고, 일정 시간이 경과 시 역세 및 청소를 하여 재사용한다. 가압부상법은 물리적으로 전처리를 거친 원수를 pH 조정 및 응집제 투입을 통하여 미세한 현탁물질과 콜로이드 상의 부유물질을 가압부상조에서 제거하는 방법이다. 섬유여과장치(섬유디스크 필터)는 오염물질을 포함하는 원수가 막 부재를 통과하면서 오염물질은 막 부재에 점착되고, 막 부재의 반대편으로 여과된 투과수가 배출되는 구조이므로, 여과 공정이 진행되면서 필연적으로 막 부재에 침착된 오염물질의 양이 증가하기 때문에, 막 부재를 통과시키기 위한 원수의 필요 압력이 증가하게 된다. 또한 섬유여과장치 주기적으로 막 부재에 점착된 오염물질을 제거하는 막 세정작업이 수행되어야 하고, 이러한 막 세정작업은 주로 여과된 투과수를 막 부재에 역류시켜 오염물질을 털어내는 물리적 세정작업과 세정액을 막 부재에 접촉시킴으로써 오염물질을 제거하는 화학적 세정작업으로 구분할 수 있다. 종래의 전처리 여과장치는 주기적으로 물리적 세정작업을 수행하고, 필요할 경우에만 여과장치의 가동을 중단시키고, 화학 세정액에 막 부재를 침지시키거나, 세정액을 반복적으로 막 부재에 통과시키는 방법으로 세정작업을 진행하고 있다. 이에 본 연구 개발은 유지관리 편의성과 생산수량 증가를 위한 원수, 생산수 염분 농도 제어기술, 이동이 용이한 시스템을 개발하고자 한다.

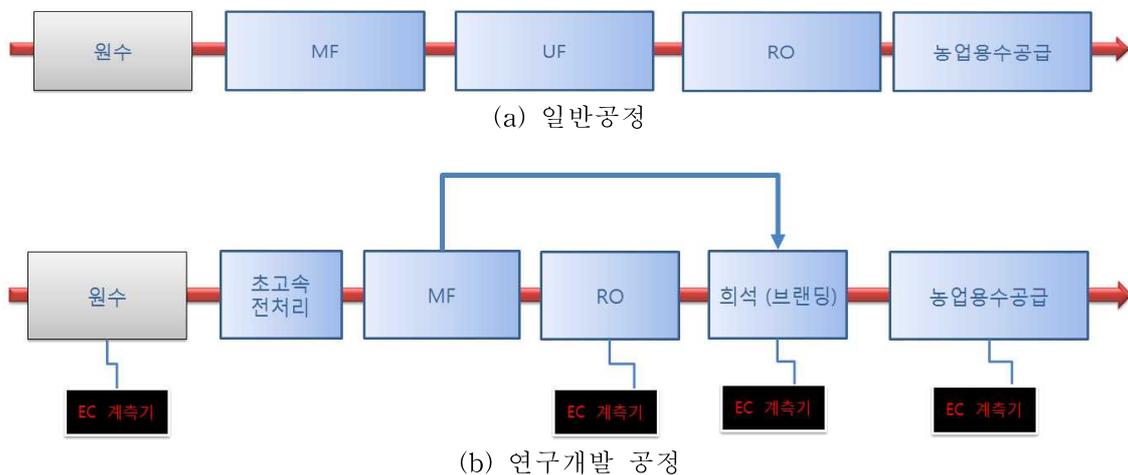


그림 7.3 기수담수화 시스템의 공정도

(3) 요소기술 설계

원수공급시스템, 전처리 필터 공정, 역삼투압 분리막 및 블랜딩 공정을 구비하는 차량 이동이 가능한 기수 담수화 장치를 설계하고자 한다. 상기 기수 담수화 장치를 이용하여 유입수 농도에 따른 회석(블랜딩) 기술을 수행하고, EC계측기를 활용하여 유입수와 생산수의 회석량을 결정한 기수 담수화 실험을 수행한 결과, 기존의 기수 담수화 장치에 비하여 회석 또는 블랜딩 운전에 따른 역삼투압 분리막의 수명이 길어지고, SBS 또는 안티스케일을 위한 약품량이 감소하여 매우 경제적인 것을 확인된다. 기수담수화 장치를 이용하여 담수 시 RO 전량을 이용한 담수 생산과 RO 및 회석을 이용한 담수 생산에 대한 표는 다음과 같다. 최종생산수의 염분 설정 값은 250 ppm으로 설정한다.

용 량	공 정	RO Membrane	SBS 약품	안티스케일 약품
100톤/일	RO 전량 생산	100 톤	100 %	100 %
100톤/일	(RO + 회석) 생산	50~100 톤	70~80 %	70~80 %

기존 공정은 RO 멤브레인 100 톤/일 생산을 위해 24시간 운전이 필요하며, 약품량 또한 24시간 일정하게 소모되는 반면에 본 기술개발의 테스트베드는 RO 멤브레인 100 톤/일 생산을 위해 염분 농도에 따라 70~100 톤을 가변적으로 생산하므로 운전 시 필요한 약품량 또한 10~30 % 저감된다.

(염분농도 단위: ppm)

원수 염분농도	RO 생산수량	회석수량	총 생산수량	생산수 염분농도
1,000	100 톤/일	28.8 톤/일	128.8 톤/일	250이하
2,000	100 톤/일	12.0 톤/일	112.0 톤/일	250이하
3,000	100 톤/일	7.2 톤/일	107.2 톤/일	250이하

다. 기수담수화 시스템 테스트베드 설계

(1) 시스템 특징

본 기술의 원리는 지하수의 관정수를 원수로 하여 원수공급펌프 시스템에서 MF 전처리 시스템에서 물리적 필터 원리로 다중 입자성물질을 제거 후 후단 RO 멤브레인에서 이온성 물질인 NaCl 제거 후 생산수를 비닐하우스로 공급한다. 간단한 공정 구조로 설치 공간도 적게 든다.

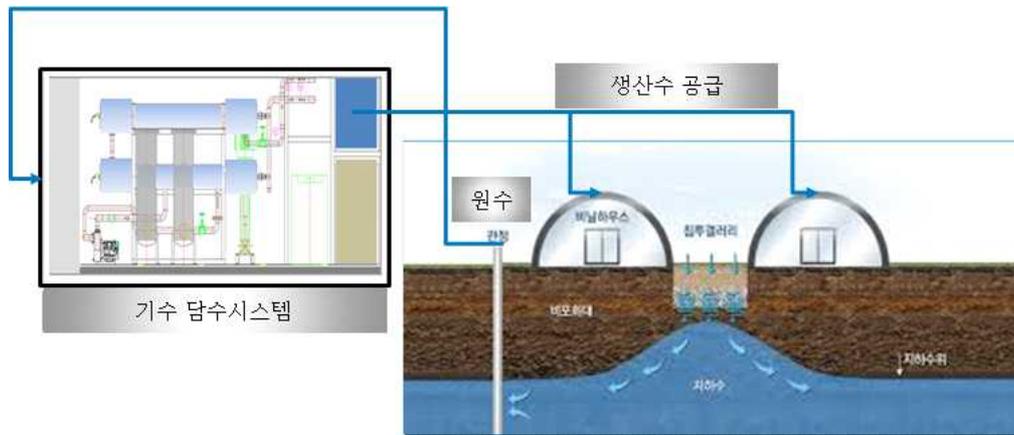


그림 7.4 테스트베드 시스템 모식

(2) 시스템 설계

- 공급용량 : 50~100톤/일 (단 염분농도에 따라 용량이 달라짐)
- 시스템 구성

번호	명칭	생산용량	전력	재질	비고
P-101A	원수공급펌프	200m ³ /일	380V, 60Hz, 3PH, 2.2Kw	STS304	1SET
P-102	MF	180~190m ³ /일	2kg/cm ²	STS304	1SET
M-101	RO membrane	50~100m ³ /일	10kg/cm ²	STS304	1SET
M-102	혼합 저장탱크	3m ³		PE	1SET

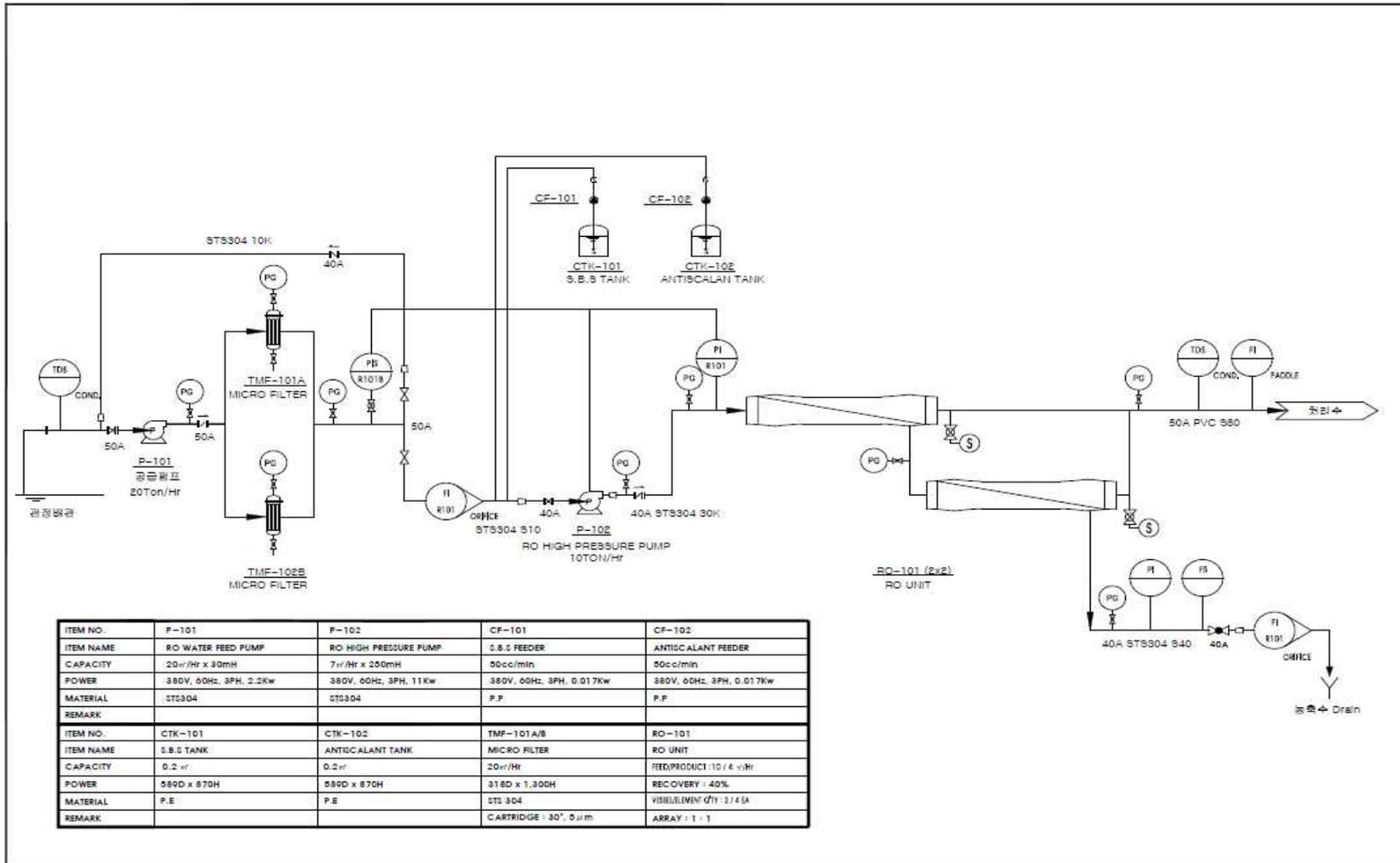


그림 7.5 기수담수화 시스템 P&ID

라. 기수담수화 시스템 테스트베드 설계인자 도출

테스트베드 설치현장을 살펴보면 인근 지하수를 펌프로 압송하여 주변 애호박 비닐하우스에서 작물을 재배하고 있으며, 늦가을, 겨울철, 봄철 특히 염도가 높은 것으로 조사되었다. 따라서 다음과 같은 공정 프로세스로 설계되었다. 지하수의 부유물질 함량이 적으므로 유입 1차에 스크린 장치가 큰 부유물질을 제거하고, 2차 전처리 장치인 MF 필터로 미세 부유물질 및 미생물 억제로 후처리 막의 부하량을 저감하며, 3차 후처리 RO (역삼투) 막에서 이온 (NaCl)물질 제거되는 공정 시스템으로 설계되며 시스템 모델명은 ARS-D100 (Agriculture Reuse System-Desalination100)이다.

(1) 테스트베드 설계인자 도출

(가) 설계인자



인자	유입 수질	설계적용 수질	법적 수질
pH	7.2	-	5.8
BOD (mg/l)	3.5	1	8
염소이온 (mg/l)	683	100	250
전기전도도 (us/cm)	3,560	250	700
탁도 (NTU)	5	0.1	2
대장균수 (개/100ml)	-	-	200
Al (mg/l)	-	-	5
As (mg/l)	불검출	-	0.05
B-total (mg/l)	-	-	0.75
Cd (mg/l)	불검출	-	0.01
Cr ⁶⁺ (mg/l)	불검출	-	0.05
Co (mg/l)	불검출	-	0.05
Cu (mg/l)	불검출	-	0.2
Pb (mg/l)	불검출	-	0.1
Li (mg/l)	-	-	2.5
Mn (mg/l)	-	-	0.2
Hg (mg/l)	불검출	-	0.001
Ni (mg/l)	불검출	-	0.2
Se (mg/l)	불검출	-	0.02
Zn (mg/l)	-	-	2
CN (mg/l)	불검출	-	불검출
PCB (mg/l)	불검출	-	불검출

그림 7.10 테스트베드 기수담수 시스템 유입수질 설계

© ARS-D50-100SYSTEM

운전 인자	유량(m ³ /d)	압력(IN)	EC(μS/cm)	탁도(NTU)
유입 시스템	200	-	10,000	3~5
MF	190	2kg/cm ²	-	0.5
RO시스템	100	10kg/cm ²	250 이하	무 검출
익식(브랜딩)	10	2kg/cm ²	250 이하	2이하

그림 7.11 테스트베드 운전인자

ARS-D100 기수담수화 시스템의 운전인자는 1차 유입시스템 원수를 압송(펌프 200톤/일)과 동시에 1차 부유물질을 처리하며 생산 유량은 180톤/일이며 펌프 압송 압력은 2kg/cm² 사이로 운전된다. 2차 RO 멤브레인에서 100톤/일 생산되며 이때 운전 압력은 저압 방식 RO 시스템으로 10 kg/cm² 로 생산된다.

(나) 요소기술 설계

지하수를 이용한 담수시스템은 일반적으로 MF 또는 UF를 RO 전처리로 사용하고 있으며 전처리의 수명, 유지관리비 등을 고려한 시스템 처리공정으로 원수의 EC 값과 처리수 EC R값을 희석(브랜딩)하여 사용 할 수 있게 설계 하였으며 무엇보다 사용자(농민)가 쉽게 운전 및 관리 할 수 있는 시스템으로 설계, 제작 및 운전 방법을 적용하였다. 우선 MF 필터는 200톤/일 생산 할 수 있는 용량으로 설계 및 제작 하여 원수 공급 펌프의 최대 유량은 200톤/일 이상으로 원수를 공급한다. RO는 유입수 EC 농도에 따라 생산 수량을 조절 하는데 최대 100톤/일에서 50톤/일을 생산하는 담수화 시스템을 제작 설치하였다.

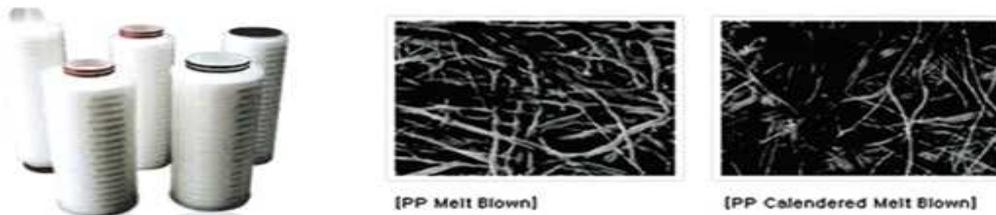


그림 7.12 테스트베드 전처리 MF 필터

Product code		MC / MCXF							MP / MPXF			
Grade		002	004	010	050	100	200	500	006	012	025	045
Micron Rating(μm)		0.2	0.45	1	5	10	20	50	0.6	1.2	2.5	4.5
Media area(m ²)		0.5/0.65		0.6/0.8				0.5/0.65				
Material	Support	Polypropylene										
	Media											
	Core/Cage/End cap											
	O-Ring	EPDM, Silicone, Viton, TEV (Teflon encapsulated viton)										
Max differential pressure		75psid at 25°C / 25 psid at 80°C										
Dimen-sions	Length	250/ 500/ 700 / 1000(mm)										
	O.D.	MC,MP:70mm / MCXF, MPXF:85mm										

그림 7.13 MF 필터 Specification

- 필터 재질은 Polypropylene 이며 물 때, 수압에 강한 특징을 가지고 있다.
- Media area 은 5 m², Length 700 mm, O-Ring Viton으로 경화에 강하다.

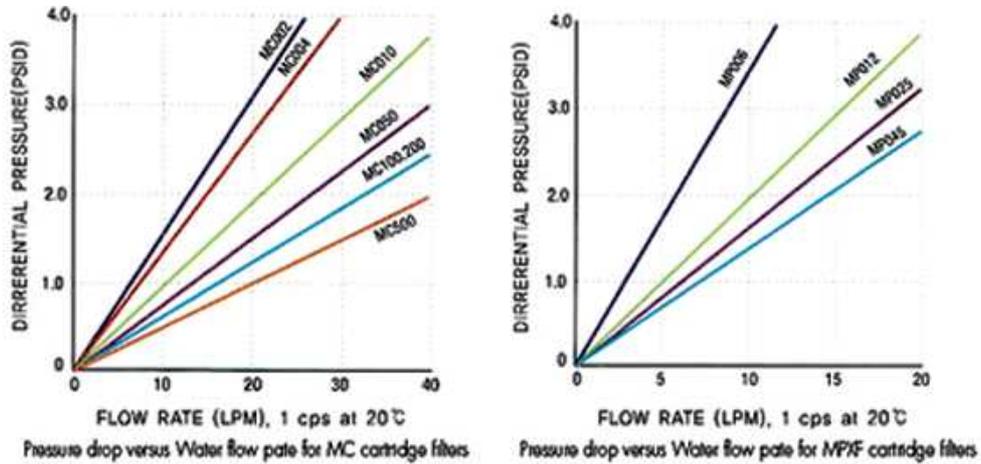


그림 7.14 MF 필터 Flow Rate

- MF 필터의 유량을 TEST에 있어 압력과 온도에 따라 유량 변화를 보이는 결과가 나타났다.

내오염성 분리막

- 유기성 막 오염 저감에 특화
- 스케일 방지효과 증대
- 낮은 차압으로 에너지 비용 절감
- 높은 염제거율로 처리서 우수

내오염성 RO 분리막 선택

내오염성 코팅층

- 높은 전수성
- 표면내에 오염
- 낮은 표면 조도

- 표면 코팅층과 화학적 공유결합으로 안정적인 내오염성 부여
- 표면 조도 감소로 스케일 부착 방지
- 친수성 내오염제 적용 미생물 부착 방지
- 유량 감소 영향 최소화

그림 7.15 테스트베드 내오염성 분리 막 RO membrane

- 내오염성 분리 막 RO membrane은 표면이 코팅층과 화학적 공유결합으로 안정적인 내오염에 대해 강한 멤브레인으로 표면 스케일 방지 최소화, 유량 감소영향 최소화 등 매우 뛰어난 RO이다.

2. 테스트베드 현장 설치 및 운영

가. 기수담수 시스템 공정 설계

담수화 시스템 공정을 구성하는 유입 공급 시스템, 전처리 MF 필터, RO 분리 막 그리고 희석 (브랜딩) 및 생산수 공급 공정별 특징 및 사양을 정리하면 다음과 같다.

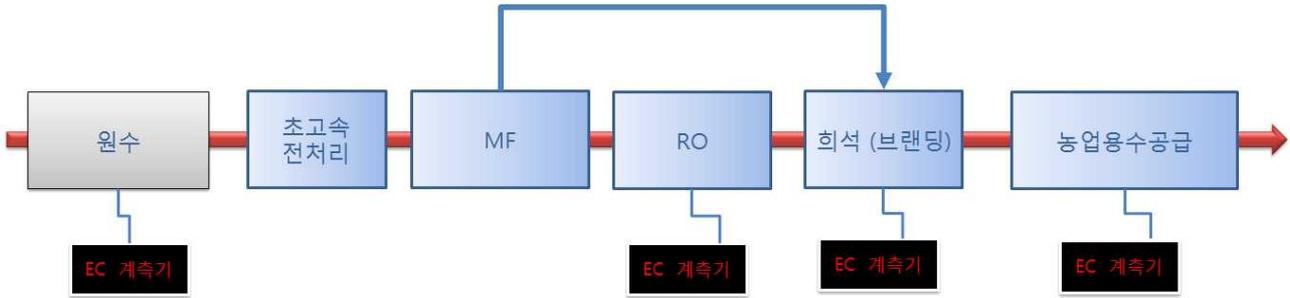


그림 7.16 기수담수화 시스템 공정도

가. 유입 공급 시스템

- ① 원수 공급 펌프를 이용하여
- ② 유입펌프 제어 판넬 (ON/OFF) 제어방식 이다.

나. 전처리 MF 필터

- ① 카트리 타입 FILTER (150 mm * 1,000 L)으로 실시간 여과 한다.
- ② 콜로이드성 미세부유물질 탁도 제거 하여 후단 RO 분리 막의 부하량 감소 효과를 가져온다.

다. RO 분리막

- ① 분리 RO막 스킴드는 하루 4톤 생산하는 막으로 저 압력식이다.
- ② 이온성 물질인 Na, Cl을 제거하여 농업용수 250 ppm 이하 공급이 목적이다.

라. 희석(브랜딩)

- ① 전처리 MF 필터 여과수와 RO 분리 막 생산수를 초순간 라인미싱 한다.
- ② 염분 계측장치를 이용하여 안전하고 일정한 염도 및 미네랄 공급을 목적으로 한다.

나. 테스트베드 현장 설치

(1) 시스템 용량계산 사양

(가) 용량 계산 (유입, 전처리, 후처리)수질 조건

담수시스템 설계 및 제작을 위한 초기조건을 용량 계산과 유입, 전처리, 그리고 후처리 수질 조건은 다음 표와 같이 설정하였다.

표 7.1 담수시스템 전처리/후처리 수질 설계 조건

구 분		유입 (원수)	전처리	후처리
			MF 필터	RO + 회석(브랜딩)
SS	mg/L	20	1	0.5
탁도	NTU	15	0.5	0.1
COD	mg/L	10	3	1.5
BOD	mg/L	10	3	1
TN	mg/L	5	5	2
TP	mg/L	1	0.1	0.02
EC	$\mu\text{s}/\text{cm}$	1,500~15,000이하	-	250
pH		5~8	5~8	5~8

담수시스템의 유입 설계조건 원수 SS 20 mg/L 일 때 전처리 공정인 MF 필터는 1이하이며 후처리 생산수는 0.5 mg/L이다. 유입수 탁도는 15 NTU이며 전처리 공정에서 0.5 mg/L 이하 처리되어야 후처리 공정인 RO 멤브레이 부하량 없이 이온성 물질을 처리할 수 있다. COD 원수 유입농도는 10 mg/L 이며 전처리공정 처리시 3 mg/L 이하로 처리 되며 후처리 공정인 멤브레인에서 1 mg/L 이하로 처리 한다. 특히 염분제거에 있어 원수 EC 농도 10,000 ppm이하 이며 후처리 공정 RO 멤브레인에서 250 ppm 이하로 처리된다.

(나) 전처리 MF FILTER 설계계산

① 설계조건

- ◆ 유입수량 = 200 m³/일
- ◆ 여과기 가동시간 = 24 hr/일

② 전처리 필터 설계

- ◆ 처리용량 (Flow Rate) 240 m³/d = 20 m³/hr
- ◆ 여과능력(MF 표면적당 처리수 유량) = 16 m³/m²·hr 이하
- ◆ 필요여과면적(Are) = $\frac{20\text{m}^3/\text{hr}}{16\text{m}^3/\text{m}^2\text{hr}} = 1.25\text{m}^2$ 이상

- ◆ 마이크로 필터 1개 당 유효 여과면적 (A) = $0.14\text{m}^2/\text{ea}$
- ◆ 필요 마이크로필터 수 (N_{re}) = $\frac{A_{re}}{A} = \frac{1.25\text{m}^2}{0.14\text{m}^2/\text{ea}} = 8.92\text{ea}$ 이상
- ◆ 총 실제 설계 마이크로필터 수 (N_a) = 10 ea
- ◆ 실제 여과면적(A_a) = N_a × A = 10 ea × 0.14 m²/ea = 1.4 m²
- ◆ 여과면적 검토 → 필요여과면적 < 실제여과면적 → 1.25 m² < 1.4 m² (OK)
- ◆ 처리수 Flux,_s = 20 m³/hr / 1.4 m² = 14.2 m³/m² · hr
- ◆ 처리수 FLUX 검토 → 처리능력 > 처리수 FLUX → 16 m³/m² · hr > 14.2 m³/m² · hr (OK)

(다) 이온 막 RO 멤브레인 설계계산

① 설계조건

- ◆ 유입수량 = 125 m³/일
- ◆ 처리수량(Q) = 100 m³/일
- ◆ 여과기 가동시간 = 24 hr/일

② 여과기 용량계산

- ◆ 처리용량 (Flow Rate) 240 m³/d = 4.16 m³/hr
- ◆ 여과능력(MF 표면적당 처리수 유량) = 30 ℓ/m²·hr 이하
- ◆ 필요여과면적(A_{re}) = $\frac{4160\ell/\text{hr}}{30\ell/\text{m}^2\text{hr}} = 138.6\text{m}^2$ 이상
- ◆ 마이크로 필터 1개 당 유효 여과면적 (A) = 37.2 m²/ea
- ◆ 필요 마이크로필터 수 (N_{re}) = $\frac{A_{re}}{A} = \frac{138.6\text{m}^2}{37.2\text{m}^2/\text{ea}} = 3.72\text{ea}$ 이상
- ◆ 총 실제 설계 RO MEMBRANE 수 (N_a) = 4 ea
- ◆ UNIT 당 실제 여과면적(A_a) = N_a × A = 4 ea × 37.2 m²/ea = 148.8 m²
- ◆ 막면적 검토 → 필요막면적 < 실제막면적 → 138.6 m² < 148.8 m² (OK)
- ◆ 처리수 Flux,_s = 24.16 m³/hr / 148.8 m² = 0.0279 m³/m² · hr
- ◆ 처리수 FLUX 검토
→ 처리능력 > 처리수 FLUX → 0.030 m³/m² · hr > 0.0279 m³/m² · hr (OK)

③ RO 배열 설정

◆ 배열	1	2
◆ 엘레먼트모델	8040-BE	8040BE
◆ 베셀수량	1	1
◆ 베셀당엘레먼트수	2	2
◆ Train 당 총 엘레먼트 개수	=	4

후처리 과정으로 이온성 물질인 Na, Cl 성분을 제거하기 위해 필요한 RO 멤브레인 설계 용량 계산식은 유입수량 125 톤/일 처리수량 100 톤/일 회수율 80 % 저용량 설계 되었으며 유입수 EC 10,000 ppm에서 처리수 EC 250 ppm이하 생산된다. 현재 세계적인 RO 형태는 크게 3가지로 구분되는데 가정용 음용수로 사용하고 있는 작은 멤브레인과 파일럿 실험 및 저용량 (4~10 톤/일) 생산을 위한 RO는 4인치 멤브레인과 산업용 대량 타입은 8인치 멤브레인으로 (100~10,000 톤/일) 사용된다. 따라서 현재 저용량 생산을 위한 타입으로 설계·제작 되었다.

(2) 테스트베드 기수담수화 PLANT 제작도면

이동식 기수담수시스템 FLOW Sheet를 보면 지하수 원수의 물을 압송하여 전처리 MF 필터로 여과 후 RO 멤브레인 분리 막 처리 및 희석(브렌딩)하여 농작물로 공급한다.

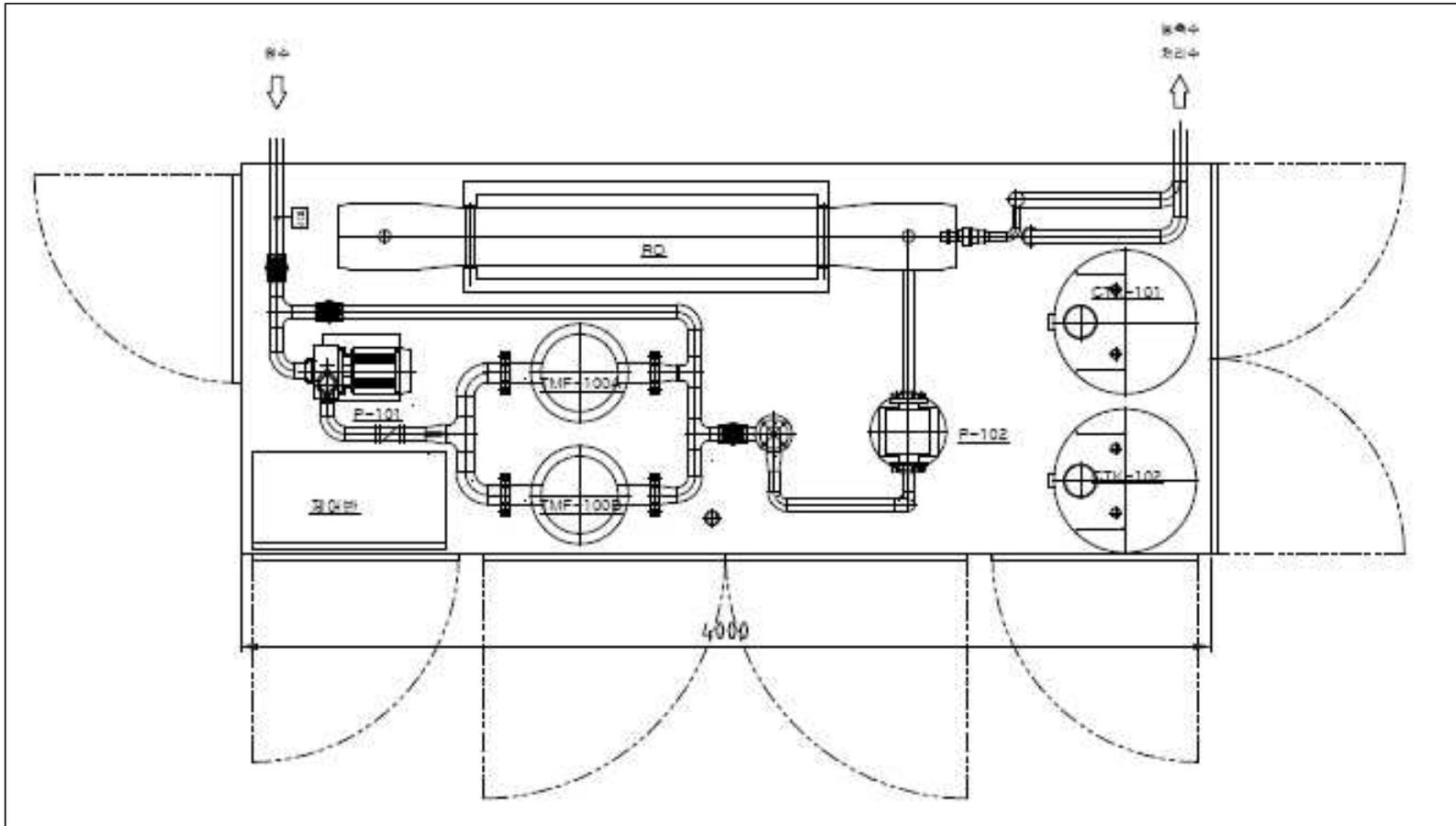


그림 7.17 테스트베드 기수담수시스템 평면도

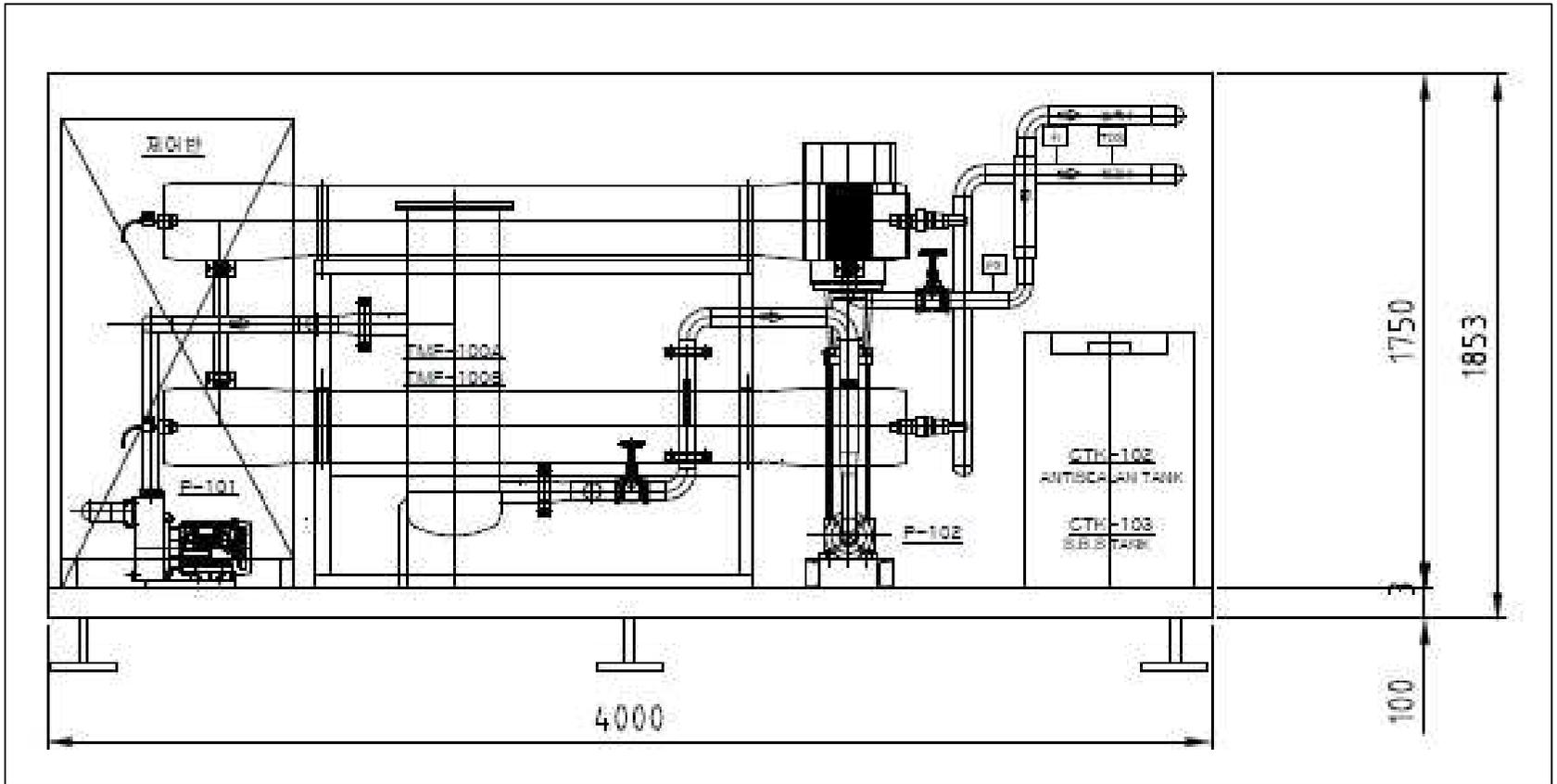


그림 7.18 테스트베드 기수담수시스템 측면도

(3) 기수담수화 시스템 테스트베드 PLANT 구성품
 제작된 테스트베드 PLANT시스템의 구성품은 다음 그림과 같다.



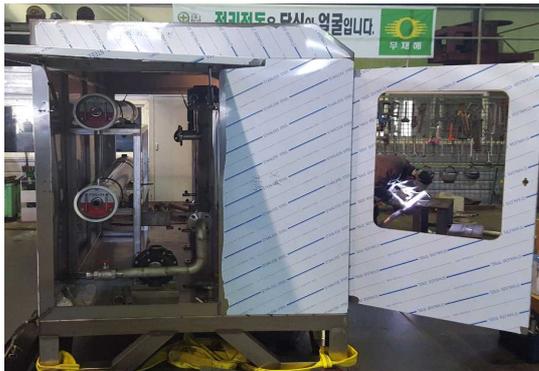
기수담수화 시스템 케이싱



기수담수화 시스템 원수 공급 펌프



기수담수화 시스템 MF 필터



기수담수화 시스템 RO membrane



기수담수화 시스템 MF 압력계이지



기수담수화 시스템 생산 유량 적산계

그림 7.19 테스트베드 PLANT 시스템의 구성품



기수담수화 시스템 RO 압력게이지



기수담수화 시스템 약품 조절 장치



기수담수화 시스템 제작 완료



기수담수화 시스템 제어반 작동 TEST

그림 7.19 테스트베드 PLANT 시스템의 구성품 (계속)

(4) 기수담수화 시스템의 현장 설치

제작된 기수담수화 시스템을 설치·운영하였으며, 현장 설치 모습은 다음 그림과 같다.

(가) 광양 현장지구 설치



그림 7.20 고흥 현장지구의 기수담수화 시스템 설치 및 가동

(나) 고흥 현장지구 설치

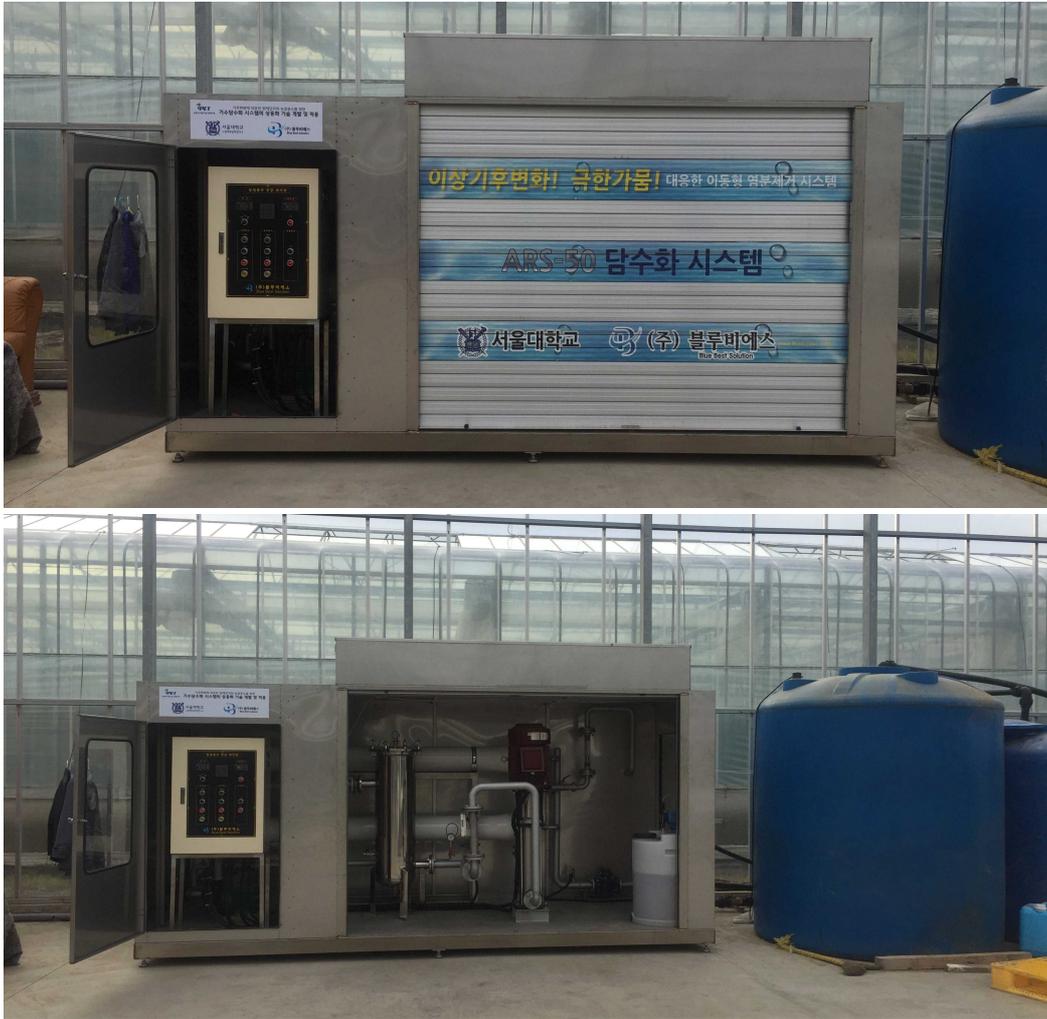


그림 7.23 고흥 현장지구의 기수담수화 시스템 설치 및 가동

(5) 테스트베드 시스템 효율 분석

광양 현장지구를 예로 들면, 이 지역의 지하수(원수) 평균 염분 농도는 $6,000 \mu\text{s}/\text{cm}$ ($= 6.0 \text{ dS}/\text{m} = 3,840 \text{ ppm}$)를 상회하는 수준이다. 다음 그림의 파란색 원에 표시된 지하수(원수) 농도는 $1,813 \mu\text{s}/\text{cm}$ 농도로 나타났으며, 빨간색 원으로 표시된 기수담수화 시스템의 처리수 농도는 $48.7 \mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났다. 해당 시기의 원수 농도가 낮게 나타난 이유는 설치 후 정상 가동 여부를 확인하기 위한 테스트를 위해 지하수가 아닌 인근 용수로에서 물을 끌어다 원수로 사용했기에 원수 농도가 낮게 나타났다. 약 유입수 대비 처리수는 약 97%의 처리 효율을 보였으며, 상세 내용은 각 현장지구의 수질모니터링 결과에서 확인할 수 있다. 광양 현장지구의 경우, 최종 생산된 처리수는 1차 저장탱크에 저장 후 배관 파이프를 통해 비닐 하우스에 50~100톤/일 공급하도록 하였다.



그림 7.25 기수담수 시스템 EC 농도 측정

다. 기수담수화 시스템의 현장운동을 통한 수질·토양변화 및 작물생육 비교

(1) 광양 현장지구의 현장운영 결과

‘청암뜰 염해피해’로 많은 보도가 이루어진 광양 청암뜰 일대의 시설재배 농가 중 1개 농가를 대상으로 2016년부터 기수담수화 시스템을 설치하여 2년간 운영하였다. 먼저, 2016년도의 경우에는 비닐하우스 2동 중에 1동은 기존의 지하수(원수)를 사용하여 애호박을 재배하고, 나머지 1동은 기수담수화 시스템을 가동하여 나온 처리수를 관개수로 사용하여 애호박을 재배하였다. 운영 결과, 지하수(원수)를 이용하여 재배한 경우 염해피해가 육안으로 나타날 정도로 심각했으나, 기수담수화 시스템의 처리수를 이용하여 관개를 한 경우는 정상생육의 모습이 나타났으며, 수확한 애호박의 품질도 큰 차이를 보였다.



그림 7.26 광양 현장지구의 애호박 재배 현장 모니터링 (1차 재배)

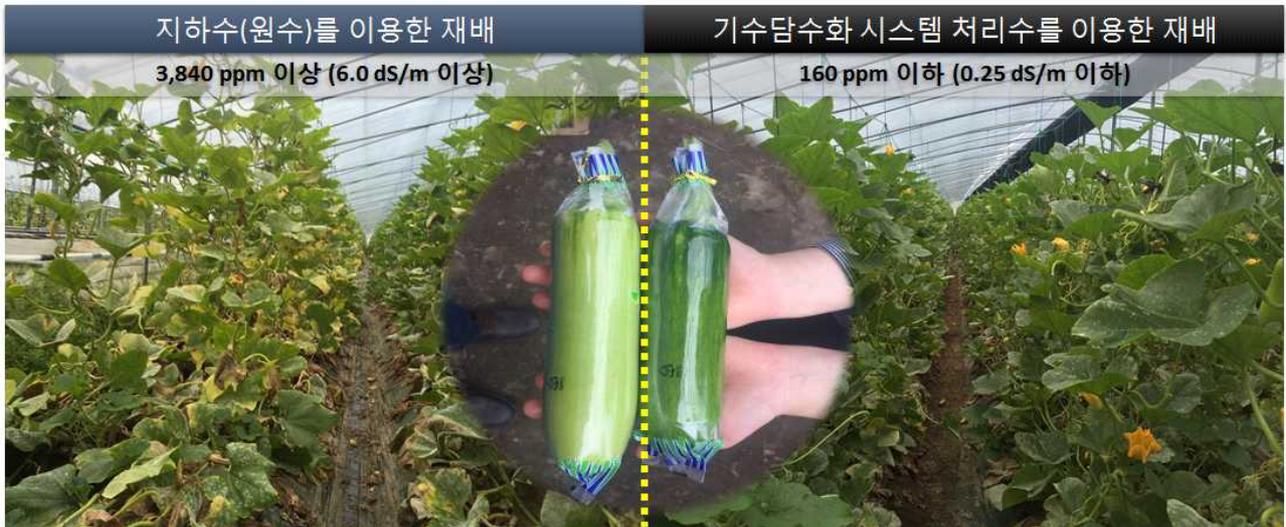


그림 7.28 광양 현장지구의 시스템 처리 전·후 애호박 상품 비교

2016년도(1차 재배)에 기수담수화 시스템을 적용하여 나타난 관개용수 수질 분석결과는 다음 표에 나타내었다. 시스템 처리전후 관개용수 분석결과, pH의 경우 처리 전 6.3 수준으로 나타났으나 시스템 처리 후에는 5.6~6.1 수준으로 약간 낮아지는 경향을 보였다. 염도 수준을 나타내는 EC의 경우 모두 처리 전보다 처리후가 현저히 낮은 EC 값이 나타났으며, 평균 95 % 정도의 처리효율을 보였다. 치환성 양이온 Na^+ 의 경우 7.52 mg/L (16/03/14), 25.21 mg/L (16/04/28), 9.92 mg/L (16/05/24)의 값으로 모든 처리구에서 92 % 이상의 처리효율을 보였다. 다른 양이온 Ca^{2+} , Mg^{2+} 경우도 모든 처리수에서 평균 98 %의 처리효율을 나타냈으며, Cl^- 의 경우 모든 처리수에서 96 % 이상의 처리효율을 보였다.

표 7.3 광양 현장지구의 시스템 처리 전·후 관개용수 수질분석 결과 (1차 재배)

구분	단위	2016/03/14		2016/04/28		2016/05/24	
		시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후
pH		6.5	6.1	6.3	5.6	6.1	5.9
EC	dS/m	3.36	0.1	2.59	0.23	1.66	0.07
SS		8	ND	ND	ND	1.0	ND
Cl ⁻		854.5	9.9	633.1	18.0	408.8	15.8
NO ₃ ⁻ -N		4.7	0.3	1.9	0.1	9.9	0.3
HCO ₃ ⁻		54.9	6.1	91.5	18.3	48.8	7.32
SO ₄ ²⁻		92.7	0.5	70.5	1.8	56.1	ND
PO ₄ ³⁻		ND	ND	ND	ND	ND	ND
Zn		0.011	0.024	0.011	0.02	0.055	0.102
Cu		ND	ND	ND	ND	0.012	0.030
Fe		ND	0.664	0.131	ND	0.05	ND
Mn		0.247	0.012	0.285	0.018	0.147	ND
Cd	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb		ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mo		ND	ND	0	0	0	0
As		0.001	0.001	ND	ND	ND	ND
Hg		ND	ND	ND	ND	ND	ND
B		0.12	0.09	0.18	0.10	0.08	0.11
K ⁺		27.46	0.52	30.7	2.18	22.28	0.77
Na ⁺		371.75	7.52	308.7	25.21	153.3	9.92
NH ₄ ⁺ -N		ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ca ²⁺		115.58	0.59	49.16	2.35	56.58	0.30
Mg ²⁺		76.69	0.13	42.06	2.54	33.92	0.24
총대장균군	총대장균군수/ 100mL	19,000	ND	ND	19.0	12.0	ND
SAR		4.653	1.632	5.523	1.921	2.814	2.316

기수담수화 시스템 적용 전 후의 토양환경을 파악하기 위해 시설재배지 토양 샘플링 및 분석을 실시하였으며 그 결과는 다음 표와 같다. 시스템을 가동한 후 EC가 12.69 dS/m에서 10.03 dS/m, 약 45일 지난 후에는 EC가 6.04 dS/m에서 4.16 dS/m으로 떨어졌지만 일반적으로 토양의 EC가 4.0 dS/m를 초과할 경우 염분에 오염되었다고 판단하게 되므로 토양의 염분은 남아있다고 판단된다. 치환성 양이온 Na⁺이나 Ca²⁺, Mg²⁺의 경우 시스템 적용 전보다 후보다는 값이 낮아지는 것으로 보아 기존 토양에 남아있던 염분을 낮추기에는 장기적으로 깨끗한 관개용수를 사용하여 재염을 수행해야 할 것으로 보인다.

표 7.4 광양 현장지구의 시스템 처리 전·후 관개용수 토양분석 결과 (1차 재배)

구분	단위	2016/03/14		2016/05/24	
		시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후
pH		6.6	6.6	6.6	6.6
EC	dS/m	12.69	10.03	6.04	4.16
CEC	cmol/kg	29.61	27.11	27.41	28.39
T-N	%	0.628	0.570	0.609	0.504
T-P	mg/kg	3,978.57	3,587.57	4,588.2	4,125.23
P ₂ O ₄		889.58	883.73	1,748.65	1,372.81
Ca ²⁺	mg/L	3,175.54	3,087.03	2,847.91	2,761.75
Mg ²⁺		1,064.21	849.80	1,071.23	802.45
Na ⁺		497.20	267.33	511.17	287.79
K ⁺		2,293.38	1,988.83	2,366.4	1,885.3
SAR		1.378	0.777	1.465	0.876

2016년도(1차 재배)에는 기수담수화 시스템의 현장 운영 및 사용자 중심의 운전(가동) 인터페이스 개선에 초점이 맞추어졌다면 2017년도(2차 재배)에는 관개용수 염도에 따른 생육 환경 및 수질·토양환경에 대한 변화를 살펴보고자 하였다. 생육모니터링은 염수와 염장, 염폭에 대해 주 1회 측정하였으며, 수확모니터링은 수확량과 생체중량에 대해 수확 시마다 측정하였다. 애호박은 2016년 10월 1일에 모종을 정식하였으며, 기존과는 달리 2동 모두 기수담수화 시스템을 가동하여 나온 처리수를 이용하여 재배하도록 하였다. 이 때, 생육비교를 위한 대조구로 지하수(원수)로 재배하기 위한 모종 9주를 별도로 정식하였고, 나머지 모든 애호박 중에서 대표 9주를 선정하여 총 18주에 대한 생육·수확 모니터링을 실시하였다.



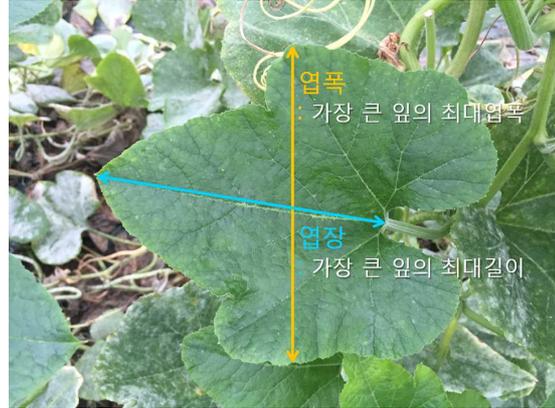
그림 7.29 기수담수화 시스템 가동 전(지하수) 관개용수를 이용한 재배 (대조구)



그림 7.30 기수담수화 시스템 가동 후(처리수) 관개용수를 이용한 재배 (처리구)



(a) 대조구(9)와 처리구(9) 애호박 라벨링



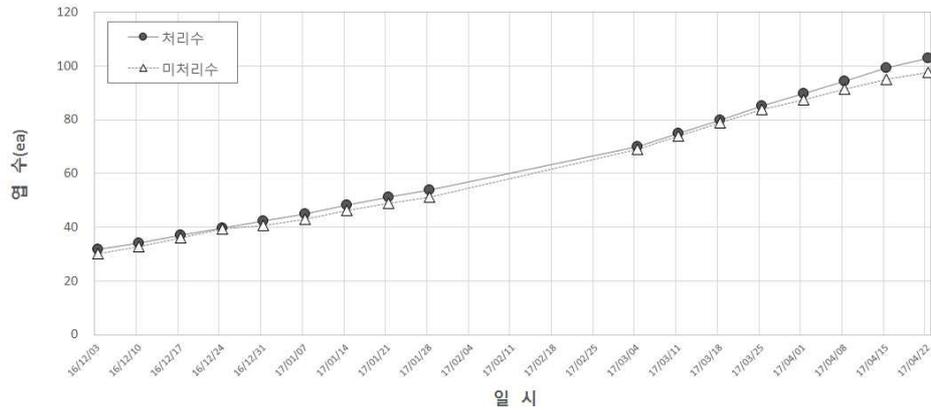
(b) 애호박 생육모니터링 측정 기준

그림 7.31 광양 현장지구의 애호박 생육모니터링 항목 측정 기준

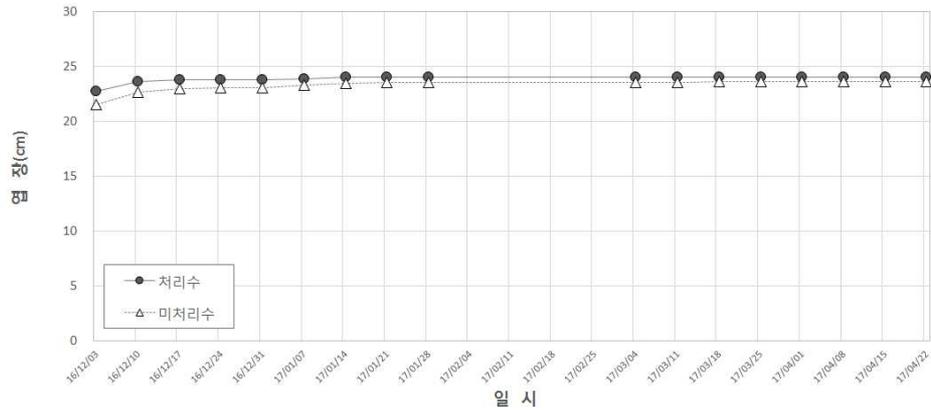
지하수로 재배한 9주의 대조구와 기수담수화 시스템의 처리수를 이용하여 재배한 9주의 처리구의 엽수, 엽장, 엽폭에 대한 측정값을 평균하여 다음 표와 그림에 나타내었다. 과종 후의 약 2개월이 지난 시점부터 수확이 이루어진 4월 27일까지 매주 1회 생육조사를 수행하였다. 단, 2월에는 병충해 및 과습피해 등 농가 관리로 인해 생육모니터링이 원활하게 이루어지지 못해 2월의 측정값은 제외하였다.

표 4.6 광양 현장지구의 애호박 생육변화 (2차 재배)

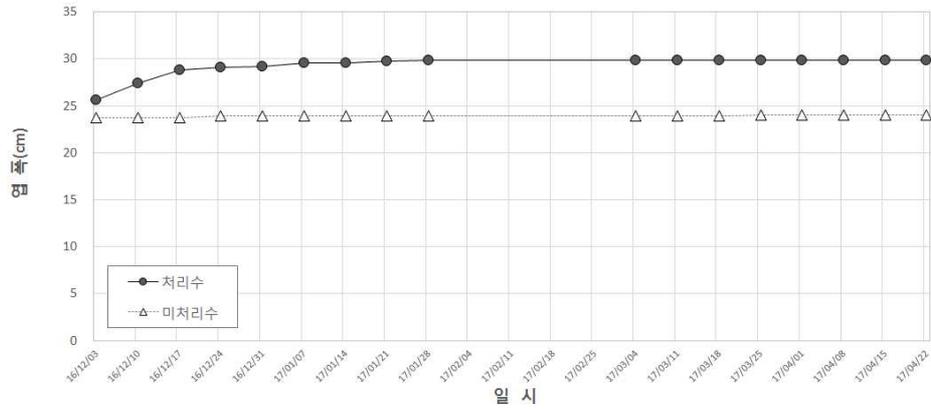
일시	지하수(원수)			처리수		
	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)	엽수(ea)	엽장(cm)	엽폭(cm)
16/12/03	30.2	21.6	23.8	31.9	22.8	25.7
16/12/10	32.9	22.7	23.8	34.2	23.7	27.4
16/12/17	36.1	23.0	23.8	37.0	23.8	28.8
16/12/24	39.2	23.1	23.9	39.6	23.8	29.1
16/12/31	40.6	23.1	23.9	42.3	23.8	29.2
17/01/07	43.0	23.3	23.9	44.9	23.9	29.6
17/01/14	46.2	23.4	23.9	48.1	24.0	29.6
17/01/21	48.9	23.6	23.9	51.2	24.0	29.8
17/01/28	51.2	23.6	23.9	54.0	24.0	29.9
17/03/04	68.9	23.6	23.9	70.0	24.0	29.9
17/03/11	73.9	23.6	23.9	75.0	24.0	29.9
17/03/18	78.8	23.7	23.9	80.0	24.0	29.9
17/03/25	83.7	23.7	24.0	85.0	24.0	29.9
17/04/01	87.4	23.7	24.0	89.7	24.0	29.9
17/04/08	91.4	23.7	24.0	94.2	24.0	29.9
17/04/15	95.0	23.7	24.0	99.2	24.0	29.9
17/04/22	97.6	23.7	24.0	103.0	24.0	29.9
평균	61.5	23.3	23.9	63.5	23.9	29.3



(a) 엽수



(b) 엽장



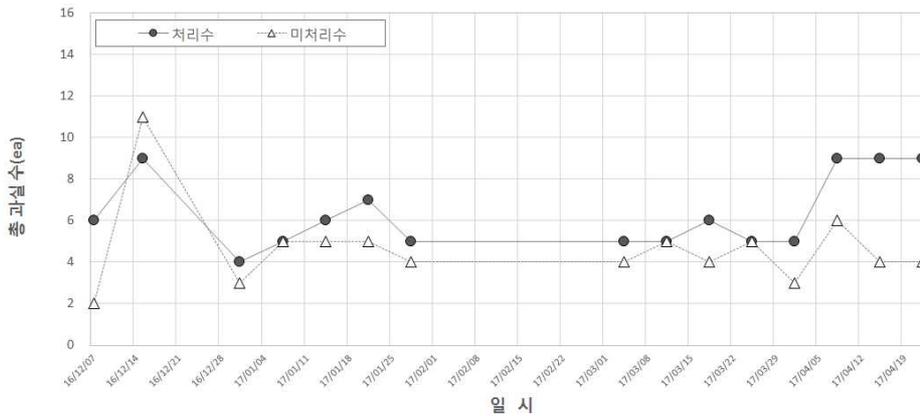
(c) 엽폭

표 4.32 광양 현장지구의 애호박의 처리구별 생육변화

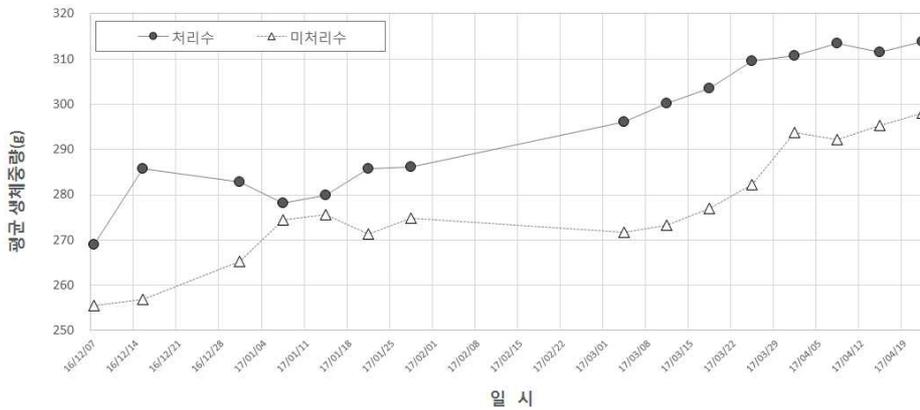
지하수로 재배한 9주의 대조구와 기수담수화 시스템의 처리수를 이용하여 재배한 9주의 처리구의 엽수, 엽장, 엽폭에 대한 측정값을 평균하여 비교한 결과, 모두 처리수로 재배한 애호박의 엽수가 많고, 엽장과 엽폭이 큰 것으로 확인되었다. 생육모니터링과 더불어 실시한 수확량 모니터링 결과는 다음 표와 그림과 같다. 수확 시, 수확량과 생체중량을 기록하였으며 이를 비교한 결과, 처리수를 이용한 경우 평균 과실수는 6.3 개, 평균 295.1 g의 중량을 나타냈으나, 지하수(원수)를 이용한 경우 평균 과실수는 4.7 개, 평균 277.2 g의 중량이 나타났다. 생육 및 수확 모니터링 결과, 지하수(원수)를 이용하여 재배한 경우보다 기수담수화 시스템의 처리수(제염된 관개용수)를 사용할 경우의 결과가 좋은 것으로 나타났다.

표 4.7 광양 현장지구의 애호박 수확량 변화

일시	지하수(원수)		처리수	
	과실수(ea)	생체중량(g)	과실수(ea)	생체중량(g)
16/12/07	2.0	255.5	6.0	269.0
16/12/15	11.0	256.9	9.0	285.8
16/12/31	3.0	265.3	4.0	282.8
17/01/07	5.0	274.4	5.0	278.1
17/01/14	5.0	275.6	6.0	279.9
17/01/21	5.0	271.4	7.0	285.8
17/01/28	4.0	274.8	5.0	286.2
17/03/04	4.0	271.8	5.0	296.0
17/03/11	5.0	273.2	5.0	300.2
17/03/18	4.0	277.0	6.0	303.5
17/03/25	5.0	282.2	5.0	309.6
17/04/01	3.0	293.7	5.0	310.8
17/04/08	6.0	292.2	9.0	313.4
17/04/15	4.0	295.3	9.0	311.6
17/04/22	4.0	298.0	9.0	313.8
평균	4.7	277.2	6.3	295.1



(a) 과실수



(b) 생체중량

표 4.33 광양 현장지구의 애호박 처리구별 수확량 변화

시스템 가동 전 (지하수 사용)

시스템 가동 후 (처리수)



그림 7.34 광양 현장지구의 애호박 재배 현장 모니터링 (2차 재배)

2017년도에 기수담수화 시스템을 적용하여 나타난 관개용수 수질 분석결과는 다음 표에 나타내었다. 시스템 처리전후 관개용수 분석결과, pH의 경우 처리 전 평균 6.8 수준으로 나타났으나 시스템 처리 후에는 평균 6.0 수준으로 낮아지는 경향을 보였다. 염도 수준을 나타내는 EC의 경우 12월과 2월의 경우에는 비가 많이 오면서 상대적으로 다른 해에 비해 지하수의 EC값도 낮게 나타는 경향을 보였으나, 모두 처리 전보다 처리후가 낮은 EC 값을 보였다. 치환성 양이온 Na^+ 의 경우 13.24 mg/L (16/10/01), 9.11 mg/L (16/12/18), 10.44 mg/L (17/02/26), 17.4 mg/L (17/04/27)의 값으로 모든 처리구에서 90 % 이상의 처리효율을 보였다. 다른 양이온 Ca^{2+} , Mg^{2+} 경우도 모든 처리수에서 평균 98 %의 처리효율을 나타냈으며, Cl^- 의 경우 모든 처리수에서 96 % 이상의 처리효율을 보였다.

표 7.8 광양 현장지구의 시스템 처리 전·후 관개용수 수질분석 결과 (2차 재배)

구분	단위	2016/10/01		2016/12/18		2017/02/26		2017/04/27	
		시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후
pH		6.7	5.5	6.9	5.9	6.8	6.3	6.6	6.1
T-N		2.74	0.23	8.18	0.93	3.31	0.54	2.57	1.03
T-P		0.997	1.98	0.046	0.007	0.034	0.004	0.041	ND
DO		6.6	7	8.6	10.5	8.8	9.6	6.5	8.3
BOD		0.2	ND	1.6	1.3	0.9	0.3	0.5	0.1
COD _{Mn}		5.4	0.3	1	0.3	1.3	0.8	1.6	0.7
SS		ND	ND	ND	2	1	ND	ND	ND
B		0.98	1.99	0.08	0.07	0.14	0.12	0.16	0.13
HCO ₃ ⁻	mg/L	62.22	6.1	56.12	7.32	85.4	9.15	100.65	9.15
Fe		0.984	1.999	0.175	0.08	0.023	0.028	0.023	0.177
SO ₄ ²⁻		61.2	ND	44	ND	50.5	0.5	55.7	1.5
Cl ⁻		860.3	20.7	349.8	14.8	325	13.1	436.3	27.8
NO ₃ ⁻ -N		2.3	0.2	8.7	0.5	2.9	0.5	2.3	0.5
Ca ²⁺		66.61	1.18	43.96	0.34	51.62	0.29	52.64	1.66
Mg ²⁺		74.05	0.38	32.97	0.25	29.71	0.28	45.04	1.77
K ⁺		36.78	0.9	19.57	0.74	18.61	0.83	22.19	1.36
Na ⁺		360.97	13.24	158.74	9.11	143.19	10.44	180.95	17.4
총대장균군		총대장균군 수/100mL	3,500	190	3,100	17	10,000	ND	6,400
EC	dS/m	3.2	0.09	1.42	0.06	1.86	0.87	2.01	0.16
SAR		5.12	1.92	3.12	2.05	2.78	2.35	3.13	1.58

기수담수화 시스템 적용 전·후의 토양환경을 분석한 결과는 다음 표와 같다. 먼저, EC의 경우 파종 시 6.19 dS/m였으나 시스템 처리후로 관개한 토양의 경우 수확 직전 EC가 2.67 dS/m로 떨어졌다. 수확 직전 지하수(원수)로 관개한 토양의 경우 8.53 dS/m인 것을 비교하면 현저히 낮은 값을 보였다. 치환성 양이온 Na⁺이나 Ca²⁺, Mg²⁺의 경우 시스템 적용 전보다 후의 값이 낮아졌으며, 지속적으로 기수담수화 시스템의 처리수를 이용하여 관개할 경우 제염효과가 높을 것으로 보인다.

표 7.9 광양 현장지구의 시스템 처리 전·후 관개용수 토양분석 결과 (2017년)

구분	단위	2016/10/01	2016/12/18		2017/02/26		2017/04/27	
		파종 시	시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후
pH		6.4	6.7	6.7	6.4	6.5	6.4	6.6
EC	dS/m	6.19	8.94	6.26	9.29	4.53	8.53	2.67
CEC	cmol/kg	25.84	28.73	25.93	24.17	24.81	2.22	2.35
T-N	%	0.500	0.581	0.414	0.541	0.458	0.506	0.394
T-P	mg/kg	3,428.27	4,477.10	3,532.83	4,048.67	3,800.50	3,982.47	3,025.43
P ₂ O ₄		798.58	1,069.81	897.94	788.24	664.04	986.89	713.64
Ca ²⁺	mg/L	2,902.90	3,243.60	3,021.30	2,963.20	2,632.50	2,871.90	2,438.10
Mg ²⁺		597.28	887.65	665.47	813.95	617.49	784.01	469.25
Na ⁺		279.54	258.18	179.48	389.45	106.11	343.87	82.84
K ⁺		1,612.70	1,955.80	1,523.10	1,884.20	1,167.10	1,446.00	757.12
SAR		0.872	0.732	0.544	1.155	0.342	1.037	0.284

기수담수화 시스템 적용 전·후의 관개용수 수질 분석결과는 다음 표에 나타내었다. 수질 분석결과, pH의 경우 처리 전 평균 7.8 수준으로 나타났으나 시스템 처리 후에는 평균 5.8 수준으로 낮아지는 경향을 보였다. 염도 수준을 나타내는 EC의 경우도 모두 처리 전보다 처리후가 현저히 낮은 EC 값이 나타났다. 본 시설재배단지에는 인근 용수로에서 관개용수를 공급하고 있으며, 해당 관개용수의 EC 값은 1.12 dS/m (17/02/03)와 1.23 dS/m (17/04/03)로 나타났으며, 기수담수화 시스템을 이용하여 처리한 관개용수의 경우 EC 값이 각각 0.02 dS/m (17/02/03)와 0.01 dS/m (17/04/03)으로 약 99%의 처리효율을 보였다. 6월의 EC값은 0.10 dS/m로 다른 시기에 비해 낮은 경향을 보였는데, 이는 농번기 농업용수로의 수위 상승 및 강수에 의한 영향에 기인한 것으로 사료된다. 치환성 양이온 Na⁺의 경우 0.05 mg/L (17/02/03), 검출한계 미만 (17/04/03, 17/06/29)의 값으로 모든 처리구에서 99 % 이상의 처리효율을 보였다. 다른 양이온 Ca²⁺, Mg²⁺ 경우도 모든 처리수에서 99 % 이상의 처리효율을 나타냈으며, Cl⁻의 경우 모든 처리수에서 96 % 이상의 처리효율을 보였다.

표 7.10 고흥 현장지구의 시스템 처리 전·후 관개용수 수질분석 결과

구분	단위	2017/02/03		201/04/03		2017/06/29	
		시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후	시스템 처리 전	시스템 처리 후
pH		5.8	5.2	7.8	6.0	9.8	6.2
T-N	mg/L	6.66	0.54	1.49	0.20	0.29	ND
T-P		2.547	ND	0.087	0.004	0.006	ND
DO		9.0	9.8	9.8	9.3	9.5	8.1
BOD		3.2	1.6	1.3	0.9	0.8	0.5
COD _{Mn}		1.7	0.3	1.5	0.3	1.8	1.2
SS		ND	ND	ND	1.0	1.0	ND
B		0.02	ND	0.02	ND	ND	ND
HCO ₃ ⁻		36.60	3.05	62.22	1.22	ND	6.10
Fe		0.033	0.012	0.007	ND	ND	ND
SO ₄ ²⁻		42.0	1.6	37.1	ND	3.3	ND
Cl ⁻		189.5	1.8	291.6	0.9	4.2	0.4
NO ₃ ⁻ -N		5.3	0.2	1.2	0.1	0.6	ND
Ca ²⁺		ND	ND	15	ND	ND	ND
Mg ²⁺		44.37	0.29	53.45	0.02	10.70	ND
K ⁺		11.44	0.09	12.16	ND	0.14	ND
Na ⁺		6.30	0.05	7.64	ND	2.49	ND
총대장균군		총대장균군 수/100mL	90.88	1.77	120.31	0.79	3.95
EC	dS/m	1.12	0.02	1.23	0.01	0.10	0.01
SAR		2.224	0.520	2.731	-	0.232	-

제8절 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화

1. 기수담수화 시스템 운영계획 수립

가. 운영 기본 계획

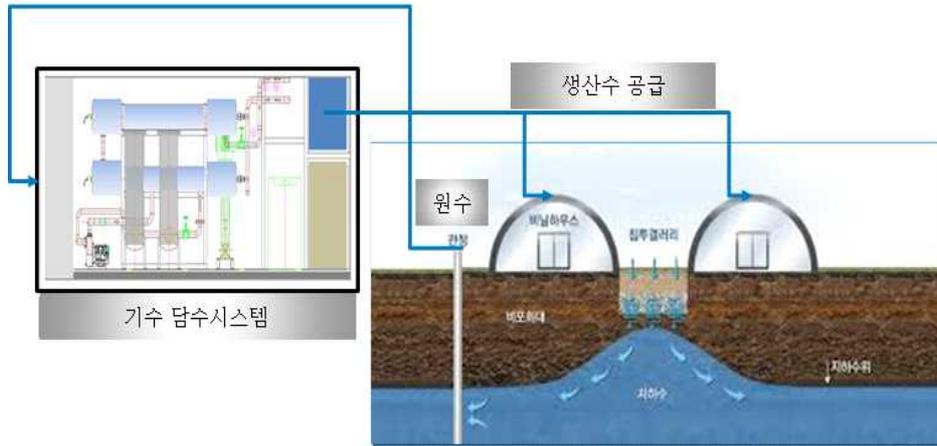


그림 8.1 현장의 기수담수화 시스템 모식도

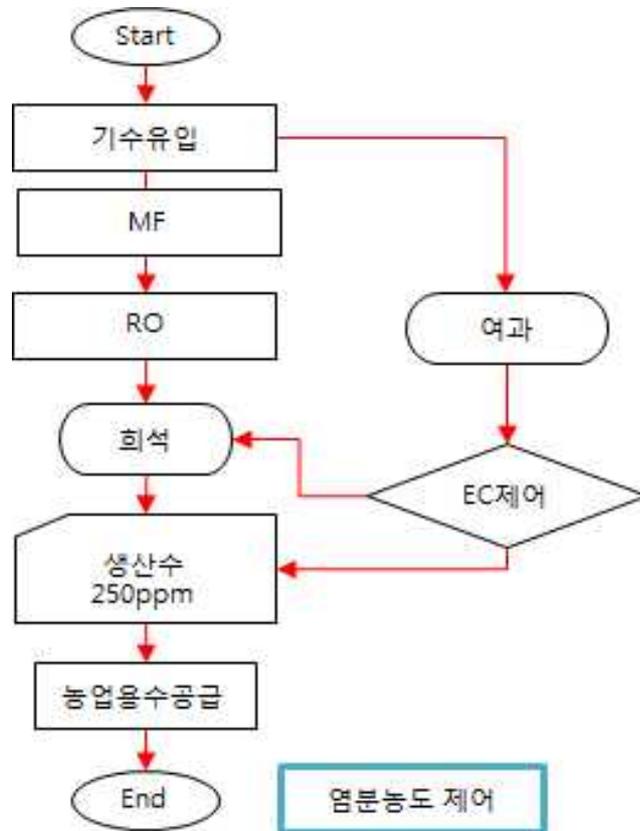
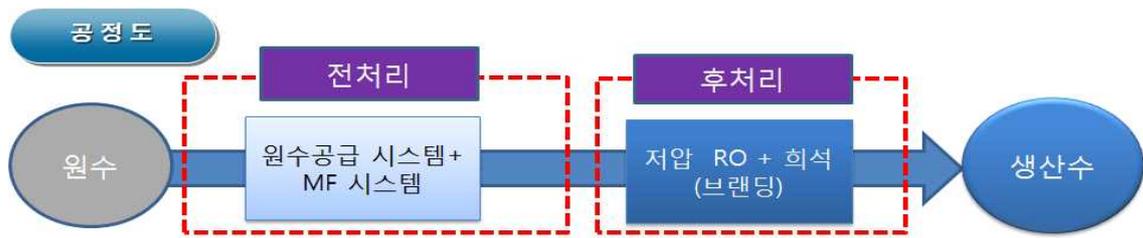
- 시설재배단지 내 지하수를 원수로 사용하여 기수담수화 시스템으로 공급한다.
- 기수담수화 시스템은 비닐하우스 외부에 설치한다.
- 기수담수화 시스템으로 생산한 물은 3톤 저류조 탱크에 저장한다.
- 기수담수화 시스템은 100톤/day을 생산하며 저류 탱크에 레벨센서로 항상 일정한 물량을 확보한다.
- 단, 현장의 시설재배단지 규모에 따라 저류조 탱크 용량 및 생산량은 달라질 수 있다.

나. 운영 시나리오에 따른 모니터링 및 평가 항목

시스템 항목	내용	평가 결과	
		평가 기준	평가
원수공급시스템	200톤/일 지하수 공급	200~210톤/일	정상/이상
MF 필터	10ppm이하 부유물질 제거	수명 6개월	정상/이상
MF 필터 압력계	2Kg/cm 압력	1~2Kg/cm,	정상/이상
RO 공급펌프	150톤/일 공급	150~170톤/일	정상/이상
RO 멤브레인	50ppm 이하 염분제거	30~50ppm 이하	정상/이상
RO 압력계	11Kg/cm 압력	9~11Kg/cm 압력	정상/이상
원수 EC 계측기	원수 1,500ppm	890~1,500ppm	정상/이상
생산수 EC 계측기	원수 30ppm	30~50ppm	정상/이상
생산수 저장탱크	생산수 탱크 레벨 유지	2/3	정상/이상
유량계측기	생산수 유량 체크	0~200톤/일	정상/이상

다. 성능유지 최적제어기술

성능유지를 위한 최적제어기술에 대한 모식도를 나타내면 다음과 같다.



2. 공급 용량 규모 및 수질 유형별 맞춤형 최적 공정기술 개발

가. 원수 성상에 따른 설계인자 및 공정

지하수를 이용한 농업용수 공급에 필요한 담수 공정 시스템은 다음과 같다. 우선 지하수는 대부분 SS 부유물질이 낮고 또한 물 성상을 보면 유기물 오염이 매우 낮아 깨끗한 용수이다. 이를 활용한 농업용수 공급 시 문제는 염분 농도가 높아 작물 생육에 영향을 미치며 토양 또한 염 토착화 되어 작물을 재배 할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위한 현장 맞춤형 담수화 시스템 공정을 적용한다.

(1) 지하수 담수화 프로세스



그림 8.2 지하수용 담수화 공정

(가) 원수 공급시스템 : 관정 배관과 담수화시스템 원수 배관 라인 결합 방식



그림 8.3 이동식 담수화 시스템 관정 배관 방식

- (나) MF 필터 시스템 : 지하수의 부유물질이 매우 낮아 MF 필터를 이용하여 RO 전처리로 사용하며 특히 RO 생산량과 회석량의 비율을 유지하기 위해 MF 필터 용량은 2배 정도 처리할 수 있는 규모의 공정이 필요하다.
- (다) RO 멤브레인 시스템 : 이온성 물질인 NaCl을 제거하기 위한 시스템으로 고압력에 견딜 수 있는 베셀과 펌프로 구성되는 공정이어야 한다. 간척지 (하천, 담수호)를 이용한 농업용수 공급에 필요한 담수 공정 시스템은 아래와 같다. 간척지의 수질은 외부로부터 유입되는 원수에 의해 많은 오염원을 가지고 있으며 특히 부유물질 높아

담수화 시스템 공정 구성 시 전처리가 매우 중요하다. 또한 염분에 노출되어 있어 RO 멤브레인 시스템이 필요하다.

(2) 간척지 (하천, 담수호) 담수화 프로세스



그림 8.4 간척지용 담수화 공정

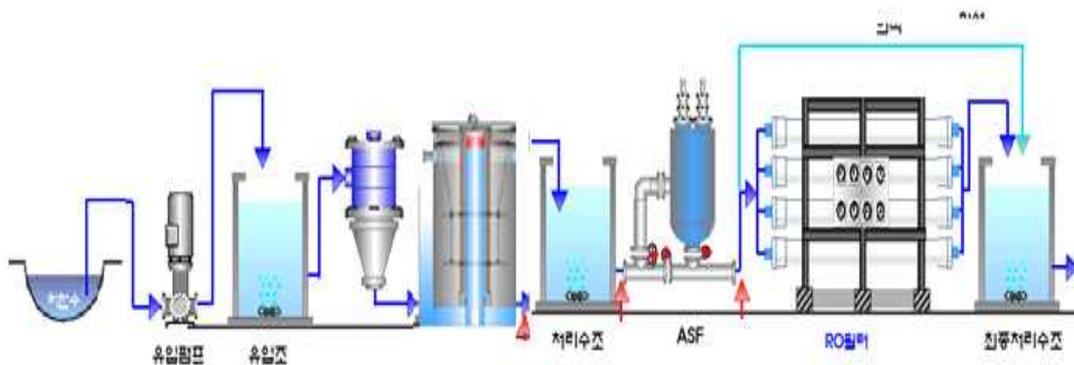


그림 8.5 담수화 시스템 모식도

- (가) 원수 공급시스템 : 간척지 하천, 호수에 관로를 이용하여 펌프 압송한다. 특히 원수 취수 장소 및 배관 길이를 산정하여 마중물 펌프 및 펌프 용량을 결정 한다.
- (나) 1차 전처리 (하이드로 사이클론+ 초고속 고액분리) 시스템 : 무거운 부유물질은 사이클론에서 제거 하며, 비중이 물과 비슷한 콜로이드 성분 및 부유물질은 초고속 고액분리 전처리 시스템에서 제거한다.
- (다) 2차 전처리 (MF 필터) 시스템 : 미세 부유물질 제거 및 안전한 전처리 시스템 운전과 RO 멤브레인 보호를 위한 전처리 시스템이다. 또한 RO 생산량과 희석량의 비율을 유지하기 위해 MF 필터 용량은 2배 정도 커야 한다.
- (라) RO 멤브레인 시스템 : 이온성 물질인 NaCl을 제거하기 위한 시스템으로 고압력에 견딜 수 있는 베셀과 펌프로 구성되어 있다.

(3) 하수처리장 방류수 담수화 프로세스

하수처리장 방류수 물 성상은 많은 유기물과 계면활성제등 용존성 물질을 포함하고 있으며 처리수의 부유물질 유출이 일정하지 않아 전처리가 매우 중요한 부분을 차지한다. 전처리 공정이 안전하지 못하면 후처리 공정인 분리 막의 빠른 손상과 세정 횟수의 증가로 필터의 수명이 짧아지므로 유지관리가 어렵게 된다. 따라서 RO 멤브레인의 일정한 생산수 유지를 위해서 전처리 공정인 하이드로 사이클론 + 초고속부상고액분리, UF 분리 막의 역할이 무엇보다 중요하다.



그림 8.6 하수처리수용 담수화 공정

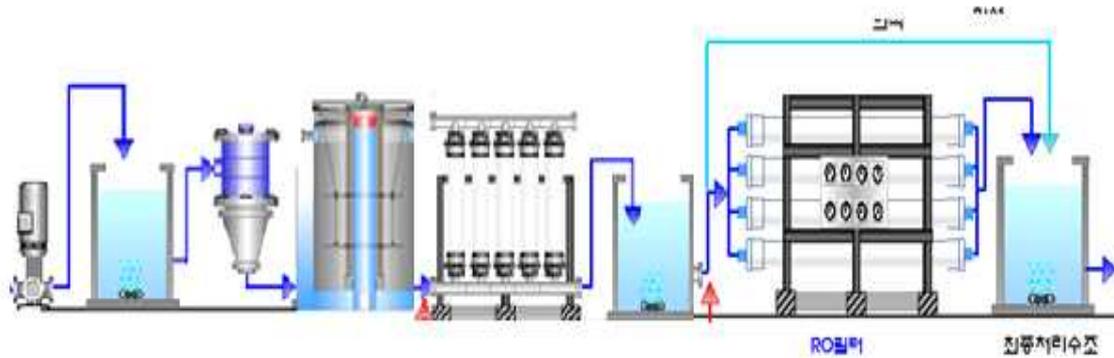


그림 8.7 하수처리수용 담수화 모식도

- (가) 원수 공급시스템 : 처리장 방류수 저류조에서 육상펌프로 압송하며 또한 각각의 계측기(LI, EC, 탁도, 온도)가 설치되어 수질 변동을 체크하여 운전에 필요한 정보제공을 한다.
- (나) 1차 전처리 (하이드로 사이클론+ 초고속 고액분리) 시스템 : 무거운 부유물질은 사이클론에서 제거하고, 용존성 물질인 COD, BOD, T-N, T-P를 저감 시키며, 비중이 물과 비슷한 콜로이드 성분 및 미세 부유물질은 초고속 고액분리 전처리 시스템에서 제거한다.
- (다) 2차 전처리 (UF) 시스템 : 초미세 부유물질 제거 및 안전한 전처리 시스템 운전과 RO 멤브레인 보호를 위한 전처리 시스템이다.
- (라) RO 멤브레인 시스템 : 이온성 물질인 NaCl-을 제거하기 위한 시스템으로 고압력에 견딜 수 있는 베셀과 펌프로 구성되어 있다.

(4) 해수 담수화 프로세스

해수 담수화 시스템은 물속의 이온성 물질인 NaCl- 제거를 목적으로 하며 염분의 농도가 $15,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 이상으로 일반 RO 멤브레인 아닌 SWRO 고압용 RO 멤브레인을 사용해야 하며, 연결 배관은 고압 (45Kg/cm²이) 이상을 견딜 수 있는 설비가 필요하다.



그림 8.8 해수용 담수화 공정

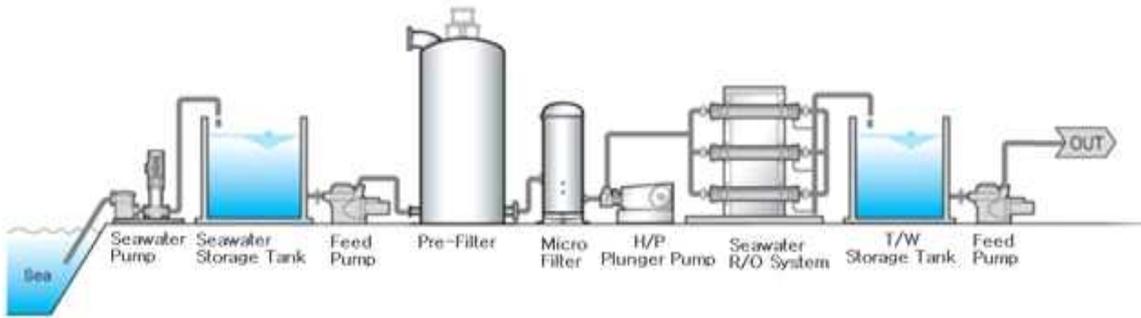
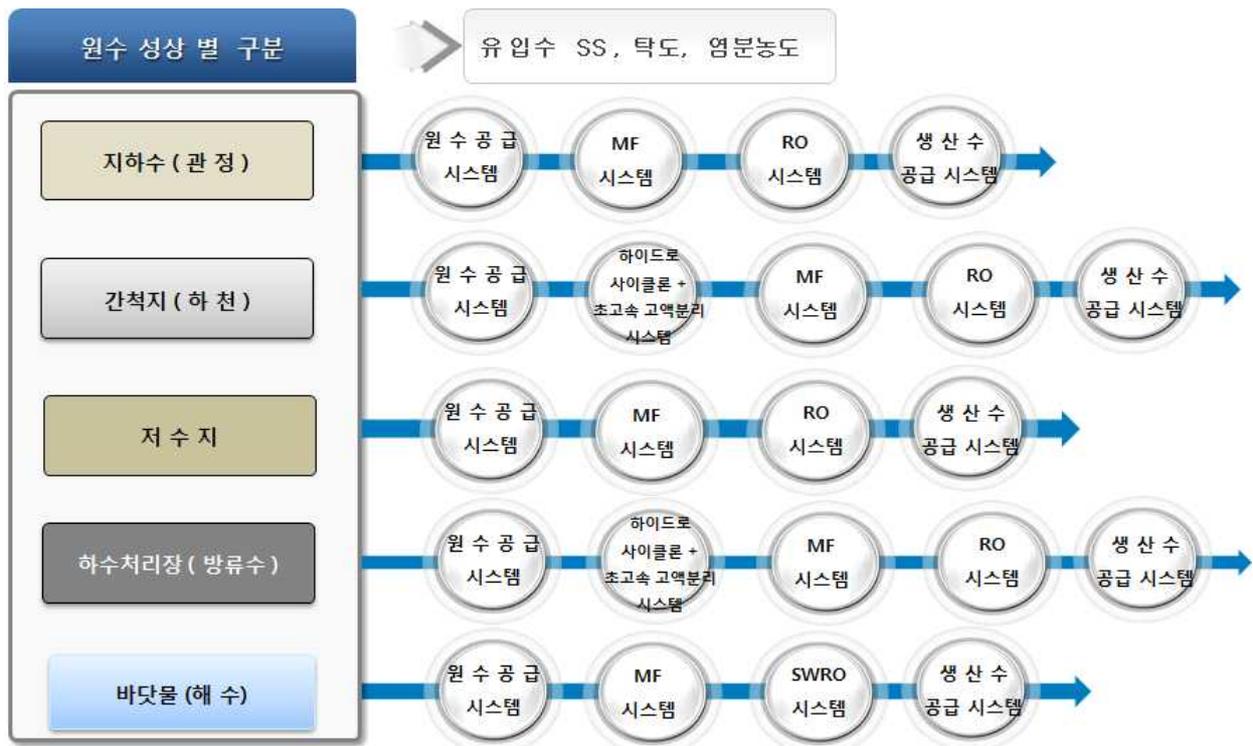


그림 8.9 해수담수화 모식도

- (가) 원수 공급시스템 : 관로를 이용하여 펌프 압송한다. 특히 원수 취수장소 및 배관 길이를 산정하여 마중물 펌프 및 펌프 용량을 결정한다.
- (나) MF 필터 시스템 : 바닷물은 부유물질이 매우 낮아 MF 필터를 이용하여 RO 전처리로 사용하며 특히 RO 멤브레인 생산수(회수량 30%) 낮아 MF 필터용량은 4배 정도 커야 한다.
- (다) SWRO 멤브레인 시스템 : 이온성 물질인 NaCl-을 제거하기 위한 시스템으로 고압력에 견딜 수 있는 베셀과 펌프 및 SWRO 멤브레인 시스템 구성이 필요하다.

나. 현장시험운영에 따른 모듈별 구조 및 성능개선

현장시험운영에 따라 각 모듈별 구조 및 성능개선을 위한 공정도는 다음과 같다.



3. 기수담수화 시스템의 운영 매뉴얼

기수담수화 시스템은 농업용수 공급을 위해 인근 지하수에서 원수 배관을 설치 하고, 탁도 및 부유물질, 염분을 효율적으로 제거시켜 농작물 재배에 유용한 농업용수를 제공한다.

가. 일반사항

표 8.1 기수담화 시스템 사양



SPECIFICATION	
운전방식	스위치 ON/OFF (380 V , 50 A)
여과기크기	L 4,000 * W 1,600 * H 1,850
처리량	50~100 m ³ /일
수량	1식

(1) 구조 명칭 및 특성

(가) 구조명칭

본설비의 구조 명칭은 다음과 같다.

표 8.2 공정별 시스템 사양서

주요 구성품	사 양	비 고
유입 MF 공급 펌프	Power: 2.2kw * 1set	
MF (micro filter)	Size: 20m ³ /hr * 2set CARTRIDGE : 30", 5μm	
RO 공급 펌프	Power: 11kw * 1set Size: 7m ³ /hr * 1set	
SBS FEEDER	50mm/min * 0.017kw	
Antiscalant FEEDER	50mm/min * 0.017kw	
RO UNIT	FEED/PRODUCT : 10/4m ³ /hr, RECOVERY : 40%	
약품탱크	SBS , Antiscalant 0.27m ³ *	P.E

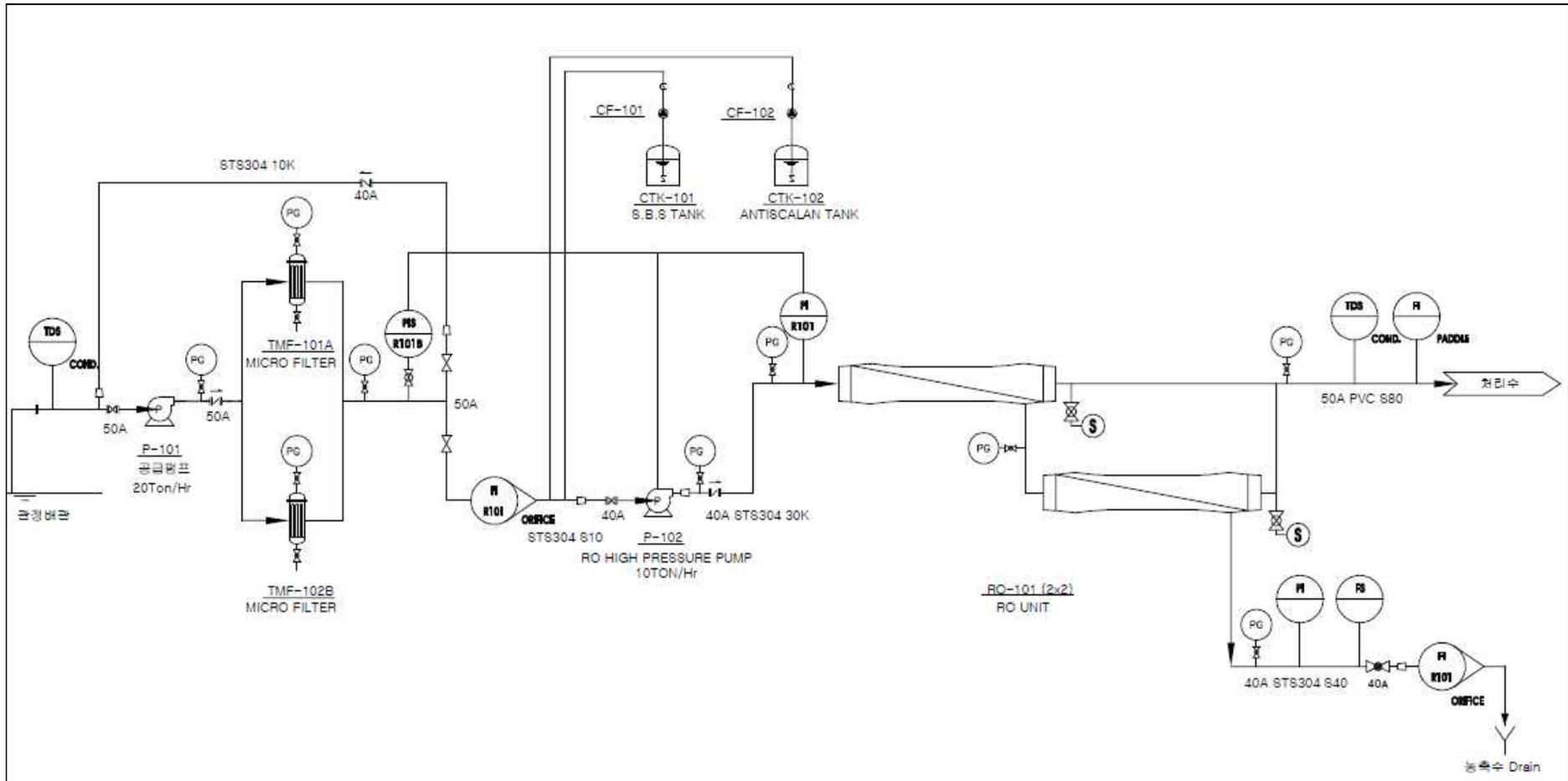


그림 8.10 처리 공정도

(나) 특성

- ① 국내 기술 개발된 제품이고 설비가 간단하다.
 - 가격이 비싼 외국제품이 아닌 국내에서 개발된 기술이다. 또한 원리가 간단하며 운전이 용이하다.
- ② 처리효율이 높고 수질이 안정적으로 방류된다
 - 탁도에 대한 안정적인 처리수질 (1 mg/ℓ 이하) 이하로 양호함.
- ③ 소용량, 대용량, 고부하, 저부하 등 적용범위가 다양하다.
 - 작은 용량의 하천, 마을하수 뿐만 아니라 대용량 하천이나 하수처리장에서도 적용이 가능하며, 고 부하, 저 부하에 운전이 가능하다.
- ④ 기존 시설에 적용하기 쉬운 기술이다.
 - 지하수, 하천이나 하수처리장 방류수 설치하므로 설치부지가 작으며, 전처리가 간단하여 공간이 컴팩하다.
- ⑤ 고장시 대처가 용이하다.
 - 장치의 고장 시 unit 별로 대처가 가능하다

(다) 운반 및 설치

- ① 운반 : 기수담수화 시스템은 운반시 충격과 진동으로 제품에 손상이 될 수 있으므로 충격과 진동으로부터 보호될 수 있도록 주의해야하며, 포장하여 흔들림을 예방하고 운반시의 충격으로부터 보호될 수 있도록 한다.
- ② 설치 : 기수담수화 시스템 설치하기 전에 우선 장비가 투입되어질 공간 상태 및 설치도면과 비교하여 이상 유무를 체크한다.
 - 기수담수화 시스템 설치 위치가 도면과 일치하는가
 - 기수담수화 시스템설치 바닥 표면이 평탄한가
 - 주변기기와 장애는 발생되지 않는가

설치 조건은 현장에 따라서 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 수로 체크가 끝나면 바닥 베이스를 설치 도면상의 위치에 정확히 수평이 되게 안착시킨 후 양카 볼트로 고정시킨다.

(2) 시스템 운전



(가) 명칭 및 기능

- ① 염도도계 : 원수 및 처리수 의 염도를 지시함.
- ② P-101 : 유입수 펌프를 운전 정지 한다
 - 적색 버튼 운전 녹색버튼 정지 하면 운전정지 상태는 램프로 표시한다.
 - 운전 중 이상이 생기면 노란색 이 점등하면서 자동 정지 한다.
 - 노란색이 점등하면 점검 후 재가동 한다.
- ③ P-102 : 필터 유입 펌프를 운전 정지 한다
 - 적색 버튼 운전 녹색버튼 정지 하면 운전정지 상태는 램프로 표시한다.
 - 운전 중 이상이 생기면 노란색 이 점등하면서 자동 정지 한다.
 - 노란색이 점등하면 점검 후 재가동 한다.
- ④ CF-101/CF-102 : 약품투입 펌프를 운전정지 제어한다.
- ⑤ P-101/P-102 펌프는 운전 중 이상이 생기면 부저가 울리고 정지하면 부저정지 버튼을 누른 후 점검을 실시한다.

(나) 운전 점검

- ① 장비명 이 붙은 차단기를 ON 시켜준다
- ② MAIN CP : 제어반 전체 전원을 ON/OFF 기능
- ③ P-101/P-102/CF-101/CF-102 펌프 개별적 ON/OFF 기능
- ④ CF-101/CF-102 는 누전용 차단기 이며 스위치를 운전 하여도 운전이 안 될 경우, 차단기의 ON/OFF 상태를 점검 한다.

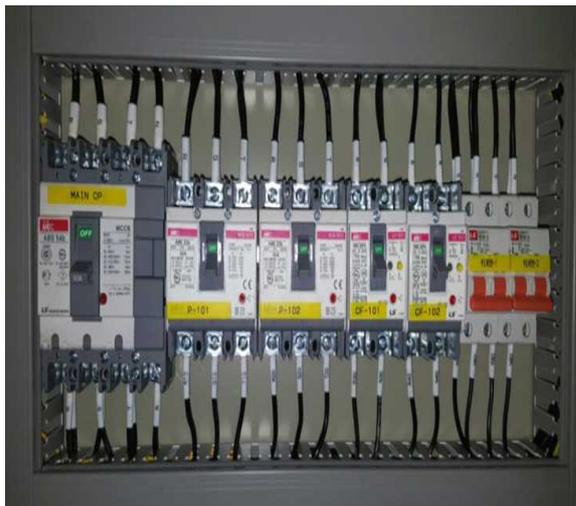


그림 8.11 전체 전원 차단기



그림 8.12 FAULT

(다) FAULT 조치 방법

- ① P-101 펌프 판넬 전면에 노란색이 점등되면 MC-1 하단 EMPR에 적색불이 들어옵니다.
 - 모터 및 배선 점검 후 검정 버튼을 눌러서 RESET 후 재운전을 해야 합니다.

② P-102 펌프 관넬 전면에 노란색이 점등되면 MC-2 하단 EMPR에 적색불이 들어옵니다.

- 모터 및 배선 점검 후 검정 버튼을 눌러서 RESET 후 재운전 한다.

③ CONTROL 차단기는 제어전원을 공급한다.

(3) 시스템 점검사항

(가) 초기 운전전 점검 사항

초기 운전에 앞서 아래의 점검항목별 점검이 이루어져야하며 확인되지 않은 상태에서 무리하게 운전이 시행될 경우 기계의 파손과 안전사고의 우려가 있으므로 점검이 필요하다. 운전 전 점검 항목은 다음 표와 같다.

순위	점검 항목	점검 및 확인 방법	비고
①	제어반 전원 공급 상태 확인	전원이 ON 되었을 때 전원이 원활히 공급 되는지 여부	1주에 한번씩 점검
②	원수조 수위확인	원수가 공급되지 않는상태에서 펌프가 가동되면 펌프모터의 발열 및 실링부 마모로 고장의 원인이 됩니다. 관정의 펌프가 정상작동되는지 확인합니다.	1주일 한번씩 점검
③	각배관의 누수여부	각 배관의 누수 여부 확인 볼트조임 또는 나사조임하여 누수가 없도록 해줍니다.	1주일 한번씩 점검
④	약품탱크 약품량 확인	약품탱크의 약품량을 확인하고 정상 공급되는지 확인합니다. 장시간 사용 하지 않을시에는약품탱크내에 약품결정이 발생할수 있으니 주기적으로 약품탱크에 약품을 막대등을 이용하여 저어주어 약품결정이 발생하지 않도록 조취합니다,	1주일 한번씩 점검
⑤	MF 필터점검	원수조에 모래등 이물질이 많을 경우 MF 필터가 막힘현상이 발생합니다. MF 필터 하우징 상부의 압력게이지와 하부쪽 압력게이지의 압력값을 확인합니다. 상부게이지 압력값보다 하부압력게이지 압력값이 1kg/cm 이상 작으면 ,MF 필터가 막힌것이므로 필터를 교체 해줍니다.	1주일 한번씩 점검
⑥	RO 필터점검	운전중 압력게이지의 압력값을 확인합니다. 1단 입구압력 2단 입구 압력 농축수 압력값을 확인합니다 1단 입구압력이 과도하게 걸릴 경우 농축수 쪽 밸브를 조정하여 1단 입구압력을 조정합니다 농축수 밸브를 열면 1단 입구 압력은 감소하고 생산수 유량은 작아집니다, 1단 입구압력과 2단입구 압력값의 차이가 클 경우 RO 필터세척이 필요하므로 제작사로 연락합니다. 원수의 염도값이 2000이하일 경우 1단 입구 압력은 10kg/cm2입니다.	1주일 한번씩 점검
⑦	염도 값 확인	원수 및 처리수의 염도값을 확인합니다 처리수의 염도값이 높을 경우 RO 필터 및 센서 이상이므로 제작사로 연락합니다. 원수의 염도값이 2000 이하일 경우 처리수의 염도값은 50정도 입니다. 장비 가동시 초기에 처리수의 염도값이 높을수 있으나 점차 떨어집니다	1주일 한번씩 점검

(나) 시스템 이상 확인 (펌프류)

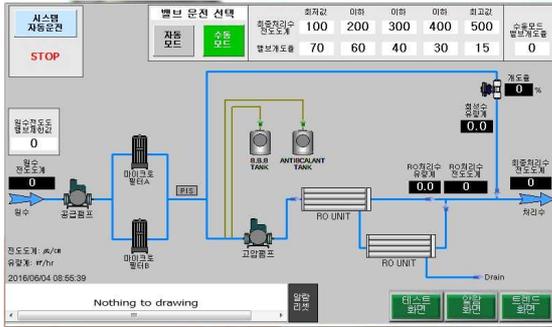
주요장애	점검항목	점검내용 및 조치사항	비고
모터가 운전되지 않는다.	휴즈 손상	휴즈 교체	2달에 한번씩 점검
	전원 공급	전기 설치 전문가에게 문의	2달에 한번씩 점검
	모터보호기 고장	전기 설치 전문가에게 문의	2달에 한번씩 점검
이상소음 발생	모터베어링 손상	모터 베어링 교체	1달에 한번씩 점검
	펌프베어링 손상	펌프 분해 후 베어링 교체	1달에 한번씩 점검
물이 나오지 않는다	공기빼기 미실시	공기빼기를 실시한다.	2달에 한번씩 점검
	펌프 전/후 단 밸브점검	자동밸브일 경우 솔레노이드확인 및 교체	2달에 한번씩 점검
펌프축 상부 누수	메커니컬씰 오링마모	메커니컬씰의 오링 교체	6달에 한번씩 점검
	메커니컬씰의 마모	메커니컬씰을 교체	6달에 한번씩 점검
펌프몸체와 브라켓 사이 누수	오링 손상 또는 가스켓 손상	오링 또는 가스켓 교체	6달에 한번씩 점검

나. 제어방식별 운영기술 개발



그림 8.13 자동 지능형 제어방식의 운전 모니터링 화면 예시

자동 지능형 제어 방식



자동/수동 제어 방식



- ① 메인 화면 : RO 시스템 공정 진행과 상태 모니터링 화면
- ② 테스트 화면 : 태그를 클릭하면 테스트 화면 창으로 이동
- ③알람 화면 : 태그를 클릭하면 알람 상태 창으로 이동
- ④트렌드 화면 : 태그를 클릭하면 트렌드 화면 창으로 이동

⑤알람메세지 & 알람리셋 : 알람발생시 알람메세지가 표시된다.

※시스템 자동운전은 터치의 자동운전 버튼을 클릭하면 운전을 시작하게 된다.
공급펌프운전-->필터후단
압력스위치동작-->공급펌프,약품펌프 운전
순으로 동작하며,압력스위치가 동작하지 않으면 알람메세지가 나타나며 자동운전이 정지된다.
이 경우 압력스위치 및 필터를 점검한 후에 알람메세지창 옆에 있는 “알람리셋” 버튼을 눌러서 해제하여 재가동 하여야한다.

- ① 염도도계 :원수 및 처리수 염도
- ② P-101 : 유입수 펌프의 운전 정지(적색버튼), 운전(녹색버튼) 상태를 램프로 표시한다. 운전 중 이상이 생기면 노란색이 점등되고, 자동 정지 한다. 노란색이 점등하면 점검 후 재가동 한다.
- ③ P-102 : 필터 유입 펌프의 운전 정지(적색버튼), 운전(녹색버튼) 상태를 램프로 표시한다. 운전 중 이상이 생기면 노란색이 점등하면서 자동정지 된다. 노란색이 점등하면 점검 후 재가동 한다.
- ④ CF-101/CF-102 : 약품투입 펌프를 운전, 정지 제어한다.
- ⑤ P-101/P-102 펌프 : 운전 중 이상이 생기면 부저가 울리고 정지하면 부저정지 버튼을 누른 후 점검을 실시한다.

중/대 용량 적용 시 관리 편리성

소요량 적용 농민 직접 관리 유리

4. 테스트베드 기수담수화 시스템의 경제성

지하수를 원수로 사용할 경우의 기수담수화 시스템의 전력비와 유지비용 등을 산정한 내용은 다음과 같다. 기수담수화 시스템의 용량별(100톤/일, 300톤/일, 500톤/일)로 각각 산정하였으며, 500 톤/일 용량의 시스템이 톤당 단가에 있어 합리적인 것으로 나타났다.

(1) 100톤/일 시스템의 경제성

⇒ 연간 유지관리비는 총 7,955,770 원으로 산정된다.

구분	산출내역	년간 금액(원)	PART별 에너지 분포 (%)	
전력비	총 전력비 참조	3,018,715	53	(%)
약품비	약품비(원/월) × 12개월	3,628,800	20	(%)
CF필터	기타보선 및 소모품비 참조	300,000	6	(%)
RO 교체비		1,000,000	21	(%)
소계		7,947,515	100	(%)

(가) 전력비

① 전력비 산정

기기명칭	대수	소요동력 (kW)	운전시간 (hrs/일)	사용전력 (kWh/일)	단가 (원/kWh)	1일 전력비 (원/일)	비고
원수 공급펌프	1	2.2	24	52.8	25	1,320	
RO 공급펌프	1	11	24	264	25	6,600	1일사용
계측시스템	1	0.1	24	2.4	25	60	1일사용
CIP 펌프	1	5.5	2	11	25	275	
소계						8,255	

*전력비 기준단가 : 25원/kWh 적용 (일반용 전력(갑) I, 저압전력 기준(계약 100kW) 가정 시)

② 총 전력비

구분	산출기준		금액	비고
전력비	기본요금	소요동력 × 단가 × 12개월	5,640	
	사용요금	사용전력 × 단가 × 12개월 (1일 전력비 × 365일)	3,013,075	
소계			3,018,715	

(나) 약품비

약품명	세정횟수		산출기초	약품필요량 (L)	사용량 (L/월)	금액 (원/월)	비고
ANTI-SCALANT	1	식/일	50L 약품탱크	6.3	6.3	252,000	
RO CIP	1	회/1개월	1,500L CIP탱크	6.3	6.3	50,400	
소계						302,400	

(다) 기타보선 및 소모품비

구분	년간 총 금액	비고
CF필터	300,000	
RO교체비	1,000,000	3년 1회 교체
소계	1,300,000	

(2) 300톤/일 시스템의 경제성

⇒ 연간 유지관리비는 총 18,799,975 원으로 산정된다.

구분	산출내역	년간 금액(원)	PART별 에너지 분포 (%)	
전력비	총 전력비 참조	5,511,975	53	(%)
약품비	약품비(원/월) × 12개월	7,488,000	20	(%)
CF필터	기타보선 및 소모품비 참조	1,000,000	6	(%)
RO 교체비		4,800,000	21	(%)
소계		18,799,975	100	(%)

(가) 전력비

① 전력비 산정

기기명칭	대수	소요동력 (kW)	운전시간 (hrs/일)	사용전력 (kWh/일)	단가 (원/kWh)	1일 전력비 (원/일)	비고
원수 공급펌프	1	5.5	24	132	25	3,300	
RO 공급펌프	1	17	24	408	25	10,200	1일사용
계측시스템	1	2	24	48	25	1,200	1일사용
CIP 펌프	1	7.5	2	15	25	375	
소계						15,075	

*전력비 기준단가 : 25원/kWh 적용 (일반용 전력(갑) I, 저압전력 기준(계약 100kW) 가정 시)

② 총 전력비

구분		산출기준	금액	비고
전력비	기본요금	소요동력 × 단가 × 12개월	9,600	
	사용요금	사용 전력 × 단가 × 12개월 (1일 전력비 × 365일)	5,502,375	
소계			5,511,975	

(나) 약품비

약품명	세정횟수	산출기초	약품필요량 (L)	사용량 (L/월)	금액 (원/월)	비고
ANTI-SCALANT	1 식/일	50L 약품탱크	13	13	520,000	
RO CIP	1 회/1개월	1,500L CIP탱크	13	13	104,000	
소계					624,000	

(다) 기타보선 및 소모품비

구분	년간 총 금액	비고
CF필터	1,000,000	
RO교체비	4,800,000	3년 1회 교체
소계	5,800,000	

(3) 500톤/일 시스템의 경제성

⇒ 연간 유지관리비는 총 28,282,625 원으로 산정된다.

구분	산출내역	년간 금액(원)	PART별 에너지 분포 (%)	
전력비	총 전력비 참조	7,814,625	53	(%)
약품비	약품비(원/월) × 12개월	10,368,000	20	(%)
CF필터	기타보선 및 소모품비 참조	2,500,000	6	(%)
RO 교체비		7,600,000	21	(%)
소계		28,282,625	100	(%)

(가) 전력비

① 전력비 산정

기기명칭	대수	소요동력 (kW)	운전시간 (hrs/일)	사용전력 (kWh/일)	단가 (원/kWh)	1일 전력비 (원/일)	비고
원수 공급펌프	1	11	24	264	25	6,600	
RO 공급펌프	1	22	24	528	25	13,200	1일사용
계측시스템	1	2	24	48	25	1,200	1일사용
CIP 펌프	1	7.5	2	15	25	375	
소계						21,375	

* 전력비 기준단가 : 25원/kWh 적용 (일반용 전력(갑) I, 저압전력 기준(계약 100kW) 가정 시)

② 총 전력비

구분	산출기준	금액	비고
전력비	기본요금	소요동력 × 단가 × 12개월	12,750
	사용요금	사용전력 × 단가 × 12개월 (1일 전력비 × 365일)	7,801,875
소계		7,814,625	

(나) 약품비

약품명	세정횟수		산출기초	약품필요량 (L)	사용량 (L/월)	금액 (원/월)	비고
ANTI-SCALANT	1	식/일	50L 약품탱크	18	18	720,000	
RO CIP	1	회/1개월	1,500L CIP탱크	18	18	144,000	
소계						864,000	

(다) 기타보선 및 소모품비

구분	년간 총 금액	비고
CF필터	2,500,000	
RO교체비	7,600,000	3년 1회 교체
소계	10,100,000	

인근 용수로의 지표수나 하수방류수를 원수로 사용할 경우에는 최소 600톤/일 부터 최대 3,000톤/일 용량의 기수담수화 시스템의 설계·제작이 가능하다. 본 연구에서는 고흥 현장지구의 전력비와 유지비용 등을 바탕으로 600톤/일 용량의 기수담수화 시스템에 대한 경제성을 분석해보았다.

- 600톤/일 시스템의 경제성 (간척지 지표수, 하수방류수 사용)
 ⇒ 연간 유지관리비는 총 32,812,535 원으로 산정된다.

구 분	산출내역	년간 금액(원)	PART별 에너지 분포 (%)	
전력비	총 전력비 참조	13,322,535	53	(%)
약품비	약품비(원/월) × 12개월	9,090,000	20	(%)
RO 전처리 ET 타워, FDA 교체비	기타보선 및 소모품비 참조	2,000,000	6	(%)
RO 교체비		8,400,000	21	(%)
소계		32,812,535	100	(%)

(가) 전력비

① 전력비 산정

기기명칭	대수	소요동력 (kW)	운전시간 (hrs/일)	사용전력 (kWh/일)	단가 (원/kWh)	1일 전력비 (원/일)	비고
원수 공급펌프	2	11	24	528	25	13,200	
RO 공급펌프	2	11	24	528	25	13,200	
계측시스템	2	0.2	6	2.4	25	60	
CIP 펌프	1	5.5	2	11	25	275	
전처리 ET 타워	1	10.2	24	244.1	25	6,102	
RO 전처리 FDA 공급 펌프	1	5.8	24	140.3	25	3,507	
Instrument	1	0.2	24	4.8	25	120	
소계						36,464	

* 전력비 기준단가 : 25원/kWh 적용 (일반용 전력(갑) I, 저압전력 기준(계약 100kW) 가정 시)

② 총 전력비

구분		산출기준	금액	비고
전력비	기본요금	소요동력 × 단가 × 12개월	13,175	
	사용요금	사용전력 × 단가 × 12개월 (1일 전력비 × 365일)	13,309,360	
소계			13,322,535	

(나) 약품비

약품명	세정횟수		산출기초	약품필요량 (L)	사용량 (L/월)	금액 (원/월)	비고
부상제	1	식/일	200L 약품탱크	150	150	37,500	
ANTI-SCALANT	1	식/일	50L 약품탱크	15	15	600,000	
RO CIP	1	회/1개월	1,500L CIP탱크	15	15	120,000	
소계						757,500	

(다) 기타보선 및 소모품비

구분	년간 총 금액	비고
RO 전처리 ET 타워, FDA 교체비	2,000,000	
RO교체비	8,400,000	3년 1회 교체
소계	10,400,000	

5. 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화 및 산업화 전략

가. 저비용·저에너지 소비를 위한 운영 및 관리 전략 개발

- 수질 원수의 성상에 맞는 전처리 공정과 후처리 공정을 도입하여 필터의 교체 시기 약품량을 조절하여 농업용수를 공급한다.
- 고농도의 해수 보다 저농의 기수를 이용하여 농업 시설원예작물에 공급하여 펌프의 에너지 절감과 후처리의 RO 멤브레인의 비용을 절감한다.
- RO 전처리 여과필터인 UF 막을 사용하지 않고 반영구적 여과필터를 사용으로 전처리 비용 절감 효과
- 초고속 고액분리 기술은 지하수, 하천, 하수처리장 방류수 등 유기오염물과 녹조 등을 빠르게 제거 할 수 있는 장치 기술로 후처리 부하량 저감에 따른 비용 절감 효과
- ICT, IOT 기반의 자동제어 방식과 Team Viewer 프로그램으로 손쉽게 휴대폰 또는 인터넷으로 모니터링 및 제어가 가능
- 시스템 운전 오작동시 알람 기능과 현장에서 즉시 수정 할 수 있는 제어체계수립

나. 기수담수화 시스템 기술의 사업화 전략 수립

- 담수화를 위한 대량의 물 공급은 현재 간척지 또는 하수처리장 방류수를 담수화 하여 농업재이용 사업화가 추진되고 있으며 특히 하수처리장은 음식물폐수를 같이 처리하는 합류식이 되어 염분 농도가 1,000 ~ 1,500ppm으로 높아져 농업용수 공급 시 필히 기수담수화 시스템이 필요하다.
- 세계 물 시장은 생활용수, 농업용수, 조경용수, 화장실용수, 세척용수, 공업용수 등 재이용수에 대한 수용 및 예산이 확대 되고 있으며 이는 기수담수화 시장 또한 연계 기술로 물 사업 확대에 선두자 역할을 할 것으로 사료된다.

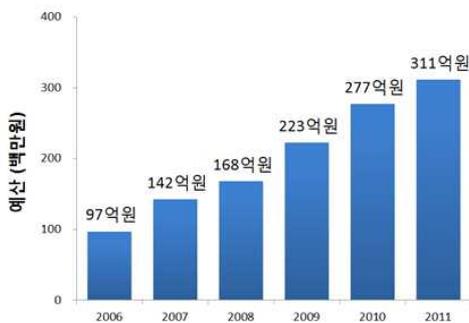


기수담수화 시스템의 사업화를 위한 SWOT 분석



구분	주요내용
SO 전략 (강점의 강화)	수질환경개선사업 및 담수용수 공급 사업에 적극적으로 참여하여 시장 선점 기술의 우수성과 수질개선 결과물에 대한 적극적인 홍보
WO전략 (역량강화전략)	클러스터간 협력을 통하여 연구개발 등 재정부담 최소화 공동마케팅을 통하여 매출 극대화
ST전략 (위험극복전략)	철저한 국내시장분석과 해외시장분석을 통한 맞춤형 상품 개발을 통하여 수요창출
WT전략 (위험회피전략)	개발여건을 감안한 시나리오 별 방안 전략모색 단계별 개발시기를 고려한 비용지출 전략 수립

기수담수화 시스템의 하수재이용사업의 수주 가능성 기대

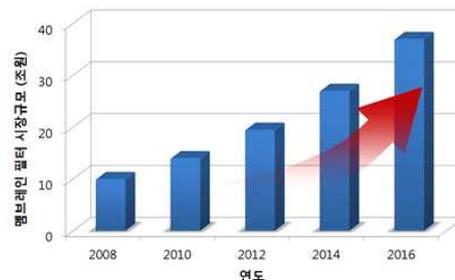


정부주관 재이용시설 사업

- 지원예산의 **지속적 증가**
- 2011년부터 10% 의무사용
- 주관기관(한국농어촌공사)는 지속적으로 사업을 수행해 왔음
- 공적개발원조(ODA) 사업 진출

<연도별 환경부 재이용시설 지원예산>

- 분리막 시장 지속적 증가**
- 개발기술의 **조기 실증화**를 통해 시장진출 시기 앞당김
- 녹색기술인증, NEP 인증** 등의 획득으로 신뢰성 확보



다. 기수담수화 시스템의 국외 적용방안 검토

(1) 방글라데시 모헤시칼리 벼, 밭작물 재배 지역

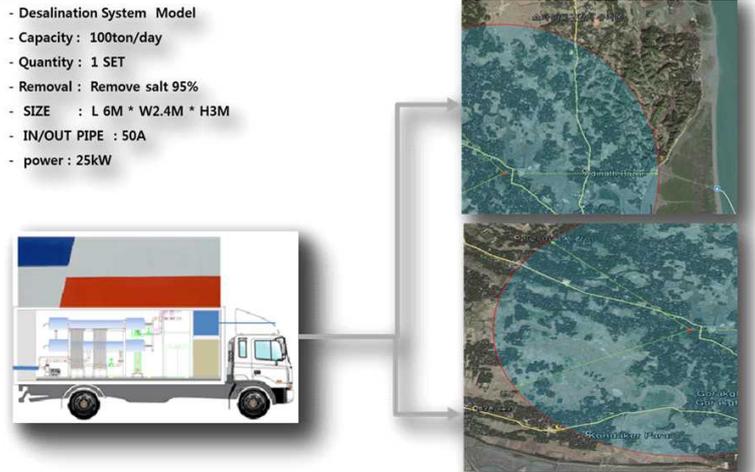


그림 8.17 차량 이동식 담수시스템 모식도

현지 여건상 차량이동식으로 지하수 관정 및 주변 기수지역 하천을 담수화 시스템을 이용하여 반경 2 km 이내 마을에 농업용수를 공급이 필요하다.

(2) 방글라데시 농업용수 염분 모니터링



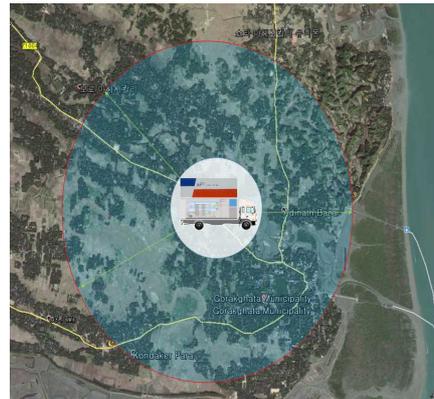
그림 8.18 모헤시칼리 염분 측정

방글라데시 모헤시칼리 현지 염도 측정 결과 EC (1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)으로 작물 발육성장이 매우 나쁜 상태이며, 기수담수화시스템이 필요성과 지속적인 토양 및 수질 모니터링 연구가 필요하다.

(3) 방글라데시 현장 적용 방안

(가) 운영방법 (이동방식)

- 재래식 수동 펌프 -> 자동펌프로 교체



- A지점을 시작 거점으로 주변 반경 2km이내 차량용 담수시스템을 이동하여 농업용수 공급한다.

(나) 시설비

항 목	금액 (원)
이동식 차량	4억2천만
ARS-100 System(제어반 포함)	
발전기	
유틸리티	

(다) 운영비

구 분	유지관리비(원/2년간)
1. 인건비	36,500,000
2. 전력비(하루 10시간 운전)	30,240,000
3. 소모품비	28,100,000
합 계	94,840,000

제9절 요약 및 결론

본 연구는 간척농지 및 염해우심지역 원예단지에 농업용수를 안전하고 경제적으로 공급할 수 있도록 저비용·고효율 기수담수화 시스템 공정을 개발하고, 제작 및 현장운영을 통해 적용성을 평가함으로써 기수담수화 기술 개발과 그 실용화를 도모하는데 있다.

1. 원예단지 유형구분 및 수질기준(안) 마련

기수담수화 시스템의 실용화를 위해서는 실제 시설재배지에 대한 염해 피해사례를 파악하고, 이를 해결할 수 있는 기수담수화 시스템의 공정설계가 이루어져야 한다. 이에, 시설재배지의 염해 피해사례를 고찰하고, 원예단지의 유형을 구분하였으며, 우리나라 실정에 적합한 수질기준(안)을 마련하였다. 원예단지의 유형은 원예단지의 영농형태에 의해서 결정되며, 영농형태는 원예단지의 시설과 대상작물, 그리고 관개용수원 등으로 구분할 수 있다. 이에 대상작물과 관개용수, 관개방법을 고려하여 원예단지 유형을 36가지로 구분하였으며, 원예단지 유형은 적용하는 목적에 따라 간소화 하거나 세분화 할 수 있도록 구성하였다.

수질기준의 경우, 시설재배지 유형에 따른 각각의 수질기준을 마련하는 것은 현실적으로 매우 어려우며, 모든 종류의 시설재배지에 일반적으로 적용될 수 있는 수준의 행정적 규제가 마련되어야 한다. 우리나라의 일반적인 수질기준은 최대허용치를 사용함에도 불구하고, 다른 국가들과 비교하여 매우 엄격한 수준의 기준을 적용하고 있다. 엄격한 수준의 최대허용치를 실제 수질기준으로 적용하는 것은 규제의 성격을 가지는 수질기준으로 부적합 것으로 다른 대부분의 국가에서 실시하고 있는 평균값이나 초과확률을 수질기준에 적용하는 것이 바람직하다. 이에 FAO (2013), Dole과 Wilkins (1999), BC MAFF (1996), 그리고 Sonneveld와 Voogt (2009)의 시설재배지 관개용수에 대한 수질 규범 및 지침을 비교 분석하여 우리나라 실정에 적합한 수질기준(안)을 제안하였다. FAO (2013)을 포함하여 다수의 연구에서 필수 수질항목으로 채택하고 있는 pH, EC, Ca, Mg, Na, 염화물, 황화물, Fe, Mn, Cu, Zn, B에 대해서 우선적으로 고려하였으며, Cd, Cr, Ni, Pb, Co, Li, Mo, CN, PCB 등의 미량원소와 관개시스템에 영향을 줄 수 있는 SS, 그리고 인체위해성을 평가하기 위한 *E.coli* 등을 수질 기준 항목으로 선정하였다. 미량원소 중 FAO (2013)과 우리나라 하수재이용 수질기준에 모두 있는 항목의 경우에는 보다 엄격한 기준을 채택하였으며, 하나의 수질 지침 및 기준에 있는 항목의 경우 그 지침 및 기준의 기준치를 우선적으로 고려하였다.

2. 기후변화에 따른 원예단지의 농업용수 수요량 산정

안정적이고 지속적인 작물생산을 위해서는 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향에 대하여 정확히 파악하고, 이로 인해 발생할 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 연구가 필요하다. 또한, 시설재배지에서의 농업용수량은 노지에서의 농업용수량과 상당한 차이가 있으므로 별도의 시설재배지의 농업용수량 산정방법이 필요하다. 일반적으로 시설재배 용수량은 온실 피복재에 의한 강우량이 차단되므로 작물 필요수량은 전량 관개에 의존하며, 온실의 작물 증발산량은 온실피복재로 인하여 태양복사량이 감소하고, 내부 풍속이 거의 없어 노지보다 감소하게 된다 (FAO, 2013). 이에 국내외 문헌을 중심으로 시설재배용수의 필요수량 산정방법 및 실제 사용량 등의 사례를 조사·분석하였으며, 문헌에서 제안된 방법들을 바

탕으로 시설재배지 관개용수량 산정방법을 제안하고, 시범적용지역을 대상으로 대상작물에 대한 시설재배지 관개용수량을 산정하였다. RCP 4.5와 8.5 시나리오 자료, 작물별 작부체계 및 작물계수 자료를 이용하여 수박, 딸기, 참외, 토마토, 오이, 상추, 고추, 시금치, 방울토마토, 얼갈이배추 총 10개 작물의 2045년까지의 작물 증발산량 및 필요수량 등을 산정하였다. 또한 광양 현장지구의 애호박을 대상으로 실제 관측자료(1973년~2017년까지)와 RCP 시나리오 자료(~2045년)를 이용하여 농업용수량을 산정하고 비교·분석하였다.

3. 주요 시설원에 작물의 염도수준별 작물생육 평가

관개용수의 염도수준에 따른 채소작물의 내염성에 대한 연구가 다양한 작물을 대상으로 수행되고 있다. FAO에서는 채소작물의 내염성 실험결과로부터 채소작물별 관개용수의 염도 임계치 (threshold)와 염도 수준에 따른 예상되는 수확량을 제시한 바 있으며, 채소작물이 재배되는 기후와 토양 등의 영농조건에 따라 다른 생육반응을 보일 수 있음을 언급한 바 있다 (Ayers와 Westcot, 1985). 우리나라의 경우 작물의 염해에 대한 연구가 많이 수행되지 않았으며, 수행된 연구의 경우에도 벼와 보리 등과 같은 곡류작물 위주의 연구가 수행된 바 있다 (심상인 등, 1998). 시설재배지의 경우, 일반 노지와 달리 온실 피복재에 의한 강수의 차단으로 관개용수 중 염분의 토양축적이 용이하고 작물의 증산활동을 포함한 작물생육환경에 차이가 있기 때문에 관개용수의 염도 수준에 대한 별도의 작물생육실험이 필요하다. 따라서 주요 시설원에 작물들을 대상으로 염도수준에 따른 작물생육 실험을 통해 생육과정 모니터링 및 수질·토양 환경 등을 분석하였다.

대상작물은 1) 실제 시설재배지에서 많이 재배되는 작물이며, 2) 재배가 용이하고, 3) 내염성이 높은 것 작물과 낮은 작물 모두 포함되어야 하며, 4) 생육기간이 비교적 짧은 작물 기준에 의해 상추, 당근, 20일무, 얼갈이배추, 아스파라거스, 딸기, 시금치 총 7가지의 채소작물이 선정되었다. 실험은 크게 고랑(점적관개)실험과 포트(지표관개)실험 2가지로 구분하였으며, 고랑실험의 경우 기존 연구에서 제안된 해당 작물의 100 %, 75 %, 50 % 수확량 임계수준을 각 처리구의 염도로 설정하였으며, 포트실험은 100 %와 90 % 수확량 임계수준을 기준으로 염도에 대한 수확량 감소기울기 수준을 고려하여 각 처리구의 염도를 설정하였다. 7개의 채소작물을 대상으로 관개용수 염도수준에 따른 생육환경, 수질·토양환경 등을 모니터링하고 분석한 결과 작물별로 차이는 있으나, 대부분 관개용수의 염도수준이 높아질수록 식물체 내 Na^+ 집적이 많이 일어나는 것으로 나타났다.

4. 기수담수화 시스템 현장적용을 위한 작물생육 평가

기수담수화 시스템의 현장적용을 위해 2가지의 작물생육 실험을 수행하였다. 먼저, 취수용수의 염도수준별 작물생육실험은 현장의 계절별·상황별 관개용수의 염도 변화를 반영하기 위해 각 염도별로 기수담수화 시스템 적용(가동)시 체염수준과 그에 따른 작물생육·수질·토양환경을 평가하고자 한 실험이고, 생육저해 염도를 고려한 작물생육실험의 경우 실제 간척지에서 고염도(4.0 dS/m 수준, 시설 채소재배가 가능한 염분농도)의 원수로 작물을 재배했을 경우와 기수담수화 시스템 적용(가동)하여 처리된 물로 작물을 재배했을 경우 작물생육·수질·토양환경을 평가하고자 한 실험이다. 취수용수의 염도수준별 작물생육실험의 대조구는 별도의 처리없이 상수도를 사용하고, 각 처리구는 해당 작물의 100 %, 75 %, 50 % 수확량

임계기준을 각 처리구의 원수 염도기준 설정하였으며, 실험 결과 모두 97 % 이상의 처리효율이 나타나는 것으로 나타났다.

생육저해 염도를 고려한 작물생육 실험(딸기, 20일 무)의 경우, 처리구는 경우 4.0 dS/m 수준의 염도와 해당 작물의 100 %, 50 % 수확량 임계기준 염도의 관개용수, 대조구는 기수담수화 시스템을 가동하여 처리된 관개용수(원수 염도 4.0 dS/m)를 사용하여 재배하였다. 그 결과, 딸기의 엽병장 항목을 제외한 엽수와 엽장, 당도, 총길이, 상부 생체중량, 20일무의 엽수, 엽장, 전체 생체중량, 상부 생체중량, 근중, 근경과 근장 모든 항목에서 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다. 모두 염도 수준이 높은 물로 관개할수록 엽수가 적고 엽장을 짧으며, 당도가 낮으며, 수확 후의 생체중량들도 낮은 값들이 나타났다. 생육상태도 육안으로 확연히 구별되었는데, 관개용수의 염도가 높아질수록 생육상태가 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 특히 염도에 민감한 딸기의 경우, 실제 시설재배지에 대한 염해 피해사례와 동일하게 고염도의 관개용수에서 작물이 서서히 타들어가면서 고사하는 현상이 나타났다.

5. 기수담수화 시스템 공정설계 및 최적화

농업용수의 수처리 기술은 일반적인 정수처리에 비해 상대적으로 설치비가 저렴하고 필터 교체 최소화 및 단순한 운전 등 유지관리 성능이 기술 선택에 있어 매우 중요하다. 기수담수화 시스템은 간척지 및 기수역 인근의 염분이 일부 포함된 하천수를 취수하여 부유물질(SS), 이온성 물질(NaCl, T-N, T-P 등) 등을 ZT(Zeta Potential Tower) 시스템에 의해 농업용수 용도에 적합하도록 저감, 재처리하여 시설원예용수로 공급하고자 한다. 따라서, 기수담수화 시스템은 1차 ZT 전처리 장치에서 총 부유물질 및 미생물 억제로 후처리 막의 부하량을 저감하며, 2차 MF 필터로 콜로이드 미세부유물질 제거 후 3차 RO(역삼투) 막에서 이온(NaCl)물질 제거되는 공정으로 각각의 농축수는 리사이클하여 운전되도록 설계하였다. 또한, 관개용수원의 종류에 따라 기수담수화 시스템의 모듈을 표준화 및 최적화 하였다.

6. 기수담수화 시스템 현장지구 선정 및 목표수질 설정

포장단위의 실험 및 공정 설계를 통해 개발된 기수담수화 시스템의 공정을 개선하고, 다양한 농업환경에서 현장적용성을 평가하기 위해서는 실제 영농 현장에의 적용이 필요하다. 기수담수화 시스템 현장지구는 문헌조사와 탐문조사를 통해 현재 염해가 발생하고 있는 현장 1개소와 간척지의 시설재배단지 1개소를 우선적으로 고려하고자 하였다. 염해피해지구로는 '청암뜰 염해피해'로 많은 보도가 이루어진 광양 청암뜰 일대의 시설재배 농가 중 1개 농가(애호박 재배)를 선정하였다. 간척지 대상지구로는 첨단수출원예단지의 조성 계획을 수립하고 있는 이원간척지와 고흥간척지 중 간척지 내에 규모화된 첨단시설원예단지가 존재하는 것으로 조사된 고흥간척지에서 7 ha 규모로 토마토를 재배하고 있는 홍양영농조합법인 시설재배단지를 선정하였다.

기수담수화 시스템의 현장 적용을 위해서는 대상지역의 관개용수의 오염수지를 분석하여 적합한 목표수질을 설계하고, 이에 맞는 공정 설계와 운영기술을 확보해야하며, 설계용량 등의 결정이 필요하다. 이에 광양 현장지구와 고흥 현장지구를 대상으로 관개용수의 오염수지를 분석하고, 앞서 산정한 토마토와 애호박의 농업용수량과 운영주체(농민)의 의견을 종합하여 기수담수화 시스템의 목표수질과 용량을 설계하였다.

7. 기수담수화 시스템 설계·제작 및 현장운영 평가

기수담수화 시스템은 관개용수의 높은 염분농도로 인한 작물성장 저해 및 수확량 감소 등의 농작물 피해를 감소하고 간척농지의 활용성을 제고하기 위해서 개발되었다. 특히 농업용수 공급을 목적으로 함에 따라 설치비가 저렴하고 유지관리 비용이 적게 소요되어야 하며, 농업용수 특성상 짧은 시간 동안에 많은 수량을 처리해야 하므로 저비용, 고효율의 시스템 설계 및 제작·운영되어야 한다. 본 연구에서는 기수담수화 시스템을 염해 피해가 발생하고 있는 광양 현장지구의 시설재배농가 1개소(애호박 재배)를 대상으로 2016년부터 기수담수화 시스템을 설치하여 2년간 운영하였으며, 간척지의 경우 고흥 현장지구의 시설재배농가 1개소(토마토 재배)를 대상으로 1년간 (2017년) 설치·운영하였다.

광양 현장지구의 경우, 지하수(원수)를 이용하여 재배한 경우 염해피해가 육안으로 나타날 정도로 심각했으나, 기수담수화 시스템의 처리수를 이용하여 관개를 한 경우는 정상생육의 모습이 나타났으며, 수확한 애호박의 품질도 큰 차이를 보였다. 생육 모니터링을 실시한 결과도 모두 처리수로 재배한 애호박의 엽수가 많고, 엽장과 엽폭이 큰 것으로 확인되었으며, 수확량도 처리수를 이용한 경우 평균 과실수는 6.3 개, 평균 295.1 g의 중량을 나타냈으나, 지하수(원수)를 이용한 경우 평균 과실수는 4.7 개, 평균 277.2 g의 중량이 나타났다. 고흥 현장지구의 현장 운영 결과, 병충해 감소, 수정불량(화방당 2개 열매) 감소, 기형과의 감소, 작물 생육에 필요한 필수 원소의 농도 조절 용이 등의 이점이 있는 것으로 나타났다. 광양과 고흥 현장지구 모두 관개용수의 EC값은 평균 90 % 이상의 처리효율을 보였으며, 기존의 지하수 및 지표수(원수)를 이용하여 재배한 경우보다 기수담수화 시스템의 처리수(제염된 관개용수)를 사용할 경우의 결과가 좋은 것으로 나타났다.

8. 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화

관개용수의 높은 염분농도로 인한 작물성장 저해 및 수확량 감소 등의 농작물 피해를 감소하고 간척농지의 활용성을 제고하기 위해서 염분제거를 위한 기수담수화 기술 개발이 필요하다. 이와 같은 기수담수화 기술은 농업용수 공급을 목적으로 함에 따라 설치비가 저렴하고 유지관리 비용이 적게 소요되어야 하며, 농업용수 특성상 짧은 시간 동안에 많은 수량을 처리해야 하므로 저비용, 고효율의 시스템을 설계, 제작, 운영하여 그 적용성을 평가하였다. 개발된 기수담수화 시스템의 현장운영을 통해 운영성능 평가하고, 개선방안을 도출하여 기수담수화 시스템의 운영 매뉴얼을 수립하였다. 또한, 원수(지하수, 간척지 담수호 등) 성상별 주요 설계인자 및 공정체계를 구축하였으며, 각 운용시나리오별 시스템의 운영 매뉴얼을 제시하였다.

제4장 목표달성도 및 관련분야 기여도

제1절 목표달성도

구분	연구개발의 목표	평가의 착안점	가중치	달성도
1 차 년 도	<ul style="list-style-type: none"> 간척지 및 염해우심지역의 원예단지 유형 구분 및 적정 수질기준 정립 <ul style="list-style-type: none"> - 고염도 원예단지 농업용수 취수이용 사례조사 - 원예단지 유형구분 - 원예단지 농업용수 수질기준(안) 제시 	원예단지 유형구분 및 수질기준의 적정성	30	100%
	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 기술의 현장실용화 지역 발굴 및 조사 <ul style="list-style-type: none"> - 현장실용화 대상지구 현황조사 - 염해우심지역의 시설재배단지 중심으로 현장 실용화 지역 선정 - 기수담수화 시스템 목표수질 설정 	현장실용화 지역의 적정성	30	100%
	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 공정설계 및 Test-bed 설계 <ul style="list-style-type: none"> - 처리공법의 특징 및 장단점 비교 평가 - 기수담수화 시스템의 Pilot plant 제작 및 적용 - 기수담수화 시스템 설계인자 분석 및 도출 - 기수담수화 공정 개선 및 최적운영 조건 도출 	기수담수화 시스템 공정설계 및 Test-bed 설계의 적정성	40	100%
2 차 년 도	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 적용지구의 작물생육 및 환경영향조사 <ul style="list-style-type: none"> - 관개용수 염도수준에 따른 작물생육 평가 - 기수담수화 시스템 현장 지구의 작물생육 및 수질·토양환경 조사 - 기후변화에 따른 원예단지의 농업용수 수요량 산정 및 분석 	염도별 작물생육·수질·토양환경 평가의 적정성	50	100%
	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 Test-bed 제작 및 운영 <ul style="list-style-type: none"> - 원예단지 유형 및 현장여건을 고려한 기수담수화시스템 Test-bed 제작 - 기수담수화 시스템 운영계획 수립 - 운영 시나리오에 따른 모니터링 및 평가 실시 	기수담수화 시스템의 현장지구 설치·운영의 적정성	30	100%
	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 공정개선 및 최적운영 조건 도출 <ul style="list-style-type: none"> - 유입 수질 및 유량에 따른 시험운영 - 현장시험운영에 따른 모듈별 구조 및 성능개선 	공정개선 및 최적운영조건의 적정성	20	100%
3 차 년 도	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 적용에 따른 작물생육 및 환경영향 조사 <ul style="list-style-type: none"> - 현장 지구 수질·토양·생육 환경 영향 조사 - 현장 지구 전후검토를 위한 영향 조사 	염도별 작물생육실험 및 기수담수화 현장지구의 작물생육·수질·토양환경 평가의 적정성	50	100%
	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 적용 타당성 평가 및 개선방안 도출 <ul style="list-style-type: none"> - 공정별 용량검토·설계 및 효과대비 경제성분석 - 현장운용평가 및 성능유지를 위한 최적제어기술 적용 - 현장 규모별, 수질 수준별 최적 공정별 모듈 최적화 및 생산공정 개발 	기수담수화 시스템 적용 타당성 평가 및 개선방안의 적정성	30	100%
	<ul style="list-style-type: none"> 기수담수화 시스템 스마트 운영기술 표준화 및 산업화 전략 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 농업용 목적의 다양한 유형별 공급을 위한 지능제어 및 스마트 운영기술 개발 - 저비용·저에너지 소비를 위한 운영 및 관리전략 개발 - 기수담수화 시스템 기술의 사업화 전략 수립 	스마트 운영기술 표준화 및 산업화 전략 수립의 적정성	20	100%

제2절 관련분야 기여도

1. 연구 분야별 기여도

가. 농업용수 활용을 위한 기수담수화 처리기술

- 본 연구과제에서 개발한 저비용·고효율 기수담수화 시스템은 간척농지 및 염해우심지역의 원예단지에 적용함으로써 안전하고 경제적인 농업용수를 확보
- 지하수, 하천수, 하수방류수, 해수 등 원수의 성분과 농도에 따른 공정 설계 및 현장적용으로 경제성, 안정성을 고려한 담수화 공정 시스템을 개발함
- 현장 맞춤형 기수담수화 시스템 운영 기술 표준화
- 사용자(농민)가 직접 운전 가능한 편의성 고려한 제어 시스템 적용 기술

나. 원수성상에 따른 수처리기술(분리막 및 전처리 기술개발)

- 지하수, 하천수, 하수방류수, 해수 등 원수성상에 따른 수처리기술 표준 공정 개발
- 탁도, 부유물제거를 위해 전기축매 기술을 적용하여 필터없이 실시간으로 유기 오염물을 부상시켜 제거할 수 있는 수처리 기술 개발
- 분리 막 적용의 기술의 한계점을 개선한 반영구적 여재 적용 기술과 농도에 따른 희석 제어 시스템 기술 마련

2. 기대성과

가. 기술적 측면

- 농업용수는 타목적의 용수와는 다르게 많은 양의 물을 안전하고 저렴하게 처리하여 공급해야 하지만 기존의 담수화 시스템을 농업용수 처리시스템으로 활용하기에는 처리비용이 높아 경제적 한계가 있었음, 본 연구로부터 개발될 저비용, 고효율 기수담수화 시스템은 이와 같은 제약요인을 최소화하고, 첨단시설농업에서 요구하는 수질기준을 달성할 수 있도록 보장할 수 있을 것으로 예상됨
- 기수담수화 시설 건설 시공과 더불어 공정최적화 기술 개발로 인해 대형설계 경쟁력을 확보할 수 있으며, 개발된 결과를 현장에 곧바로 적용할 수 있어 사업화가 용이할 것으로 예상되며 농림축산식품부 농업용수 개발사업분야에 적용할 수 있을 것으로 예상됨
- 맞춤형 저비용 고효율 양질의 수자원 공급이 가능해 짐에 따라 지역특성을 고려한 분산형 물공급과 맞춤형 농업재이용 생산 시스템으로 농촌 환경 개선에 이바지 할 것으로 예상됨

나. 경제·산업적 측면

- 세계 물산업은 향후 10년간 2배 이상으로 확대 (2015년 1,598조원)되어 세계 경제의 한 축으로 이를 것으로 전망되고 있으며, 국내에서도 담수화사업은 물산업분야의 핵심과제로 많은 투자가 이루어지고 있지만 가장 많은 물을 사용하고 있는 농업용수 분야에서는 이러한 기술이 채택되고 있지 않은 실정으로 본 연구결과는 산업적으로 파급효과가 높은 것으로 예상됨

- 본 연구개발 성과는 농업용수 수요량이 연간 8천만^m에 이르는 새만금 간척지의 농업용수 공급에 적용 가능할 것으로 예상되며, 이는 평균 사업 단가를 적용할 경우 8,000억원 이상의 사업효과가 예상됨
- 가뭄 등 비상급수가 필요할 때, 기수담수화 시스템을 통해 처리된 수자원은 가용수자원으로 가치가 높으며, 신규 수자원개발에 대체할 수 있는 대체수자원의 가치도 매우 높음
- 사계절 풍부한 청정 농업용수 공급이 가능함에 따라 고품질 수익형 수출주도형 농작물 재배시스템 구축이 가능하여 고부가가치 수익형 농작물 재배에 따른 농촌지역 소득 창출 및 지역 발전에 기여할 수 있을 것으로 예상됨
- 양질의 농업용수 공급에 따라 생산된 농산물에 대한 대국민 안전인식 제고에 기여할 것으로 예상됨
- 기수담수화 시스템 개발을 통하여 수질개선효과, 간척농지 활용성 증가, 농산물 안정성 제고, 농가소득 증가 등 간접효과를 고려할 경우 사업화로 인한 효과는 직접 효과의 상응하는 정도로 나타날 것으로 예상됨

제5장 연구결과의 활용계획

제1절 활용계획 일반사항

- 기후변화 및 도시화와 같은 변해가는 환경에 대비할 수 있는 지속가능한 농업을 위한 논의의 출발점
- 간척지 및 염해우심지역에서의 안전하고 경제적인 고품질의 농업용수 확보를 통한 고소득 우수농산물 재배 기여
- 전국 시/군/구 지자체에 저비용·고효율 기수담수화 시스템으로 보급 추진
- 농식품부 및 기타 정부기관에 시험 및 연구용으로 보급 추진
- 관련 사업의 기술적 교두보로 활용
- 향후 동남아시아 및 물 부족 국가로의 수출 기대

제2절 제품화 및 사업화 계획

1. 제품 생산 및 교육계획

- 농업용도에 맞는 용수 공급(맞춤형) 하이브리드 기술 개발
- 농업용 기수담수화 국산화 공정 개발
- 기수담수화 모니터링 시스템 개발
- 공정별 맞춤형 자동제어 시스템 개발
- 특허 및 신기술 출원/등록
- 제품의 설치 및 교육을 위한 신규인력 확보

2. 주요 수요처 마케팅 계획

수요 예상처	<ul style="list-style-type: none">▪ 전국 시/군/구 등 262개 기초지자체▪ 관련 정부기관(농식품부, 환경부 등) 및 한국농어촌공사, 수자원공사 등 관련 정부투자기관 (15,000 여개)▪ 관련 연구 대학 및 연구소 (100여개)
--------	--

- 제품개발 특화
 - 초고속 전처리 기술로 전기축매를 이용한 고액분리 기술
 - 염분농도에 따른 희석 공정 제어시스템 기술

3. 기술이전 계획

- 본 연구기술개발을 성공적으로 수행한 후, 기술성 평가와 지적재산권 출원, 세부 기술이전 전략 및 계획을 수립한 후, 개발 결과물을 참여기업에 기술이전 실시

■ 사업화 계획

구 분		사업화 년도					
		2017년 (개발종료 해당년)	2018년 (종료 후 1년)	2019년 (종료 후 2년)	2020년 (종료 후 3년)	2021년 (종료 후 4년)	(2022)년 (종료 후 5년)
사업화 제품		저비용, 고효율 기수담수화 시스템					
판매 계획 (억원)	내 수	50	100	150	200	200	200
	수 출	-		-	40	60	100
	계	50	100	150	240	260	300

제6장 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당사항 없음

제7장 연구개발 결과의 보안등급

해당사항 없음

제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당사항 없음

제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적

해당사항 없음

제10장 연구개발과제의 대표적 연구실적

번 호	구분 (논문 /특허 /기타)	논문명/특허명 /기타	소속 기관명	역할	논문게재지 /특허등록 국가	코드번호		D-12	
						Impact Factor	논문게재일 특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부 /인용횟수 등)
1	특허	초고속 고액분리 시스템을 구비하는 기수 담수화 장치	서울 대학교, (주)블루 비에스	공동개발	대한민국		2016.04.05		
2	논문	Assessing the effects of indirect wastewater reuse on paddy irrigation in the Osan River watershed in Korea using the SWAT model	서울 대학교	제1저자 및 공동저자	Agricultural Water Management	2.848	2016.01	단독사사	SCI
3	논문	A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale	서울 대학교	제1저자 및 공동저자	Agricultural Water Management	2.848	2016.06	단독사사	SCI
4	논문	Effects of Irrigation with Saline Water on Crop Growth and Yield in Greenhouse Cultivation	서울 대학교	제1저자 및 공동저자	Water	1.832	2016.04	단독사사	SCIE
5	논문	Irrigation Water Quality Standards for Indirect Wastewater Reuse in Agriculture: A Contribution toward Sustainable Wastewater Reuse in South Korea	서울 대학교	제1저자 및 공동저자	Water	1.832	2016.04	단독사사	SCIE

제11장 기타사항

해당사항 없음

제12장 참고문헌

1. Asano, T., F. L. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, and G. Tchobanoglous, 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies and Applications*, first ed. McGraw-Hill, New York.
2. Asish Kumar Parida and Anath Bandhu Das, 2005, Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60, 324 - 349.
3. Ayers, R. S., and D. W. Westcot, 1985. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, revised 1, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
4. Baille, A., C. Kittas, and N. Katsoulas, 2001. Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agric. Forest Meteorol.*, 107: 293-306.
5. Bauder, T. A., R. M. Waskom, P. L. Sutherland, and J. G. Davis, 2011. (5/11). *Irrigation Water Quality Criteria*. Colorado State University, Fort Collins, CO, Colorado State University Extension no. 0.506 <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00506.html>
6. Beltran, J. M., 1999. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural Water Management* 40: 183-194.
7. Bonachela, S., Gonzales, A.M., Fernandez, M.D., 2006. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrigation Sci.* 25, 53-62.
8. Brissaud, F., 2008. Criteria for water recycling and reuse in the Mediterranean countries. *Desalination* 218: 24-33.
9. British Columbia Ministry of Agriculture. Fisheries and Food (BC MAFF), Abbotsford Agriculture Centre, 1996. *Irrigation water quality for BC greenhouses*.
10. Bustan, A., M. Sagi, Y. D. Malach, and D. Pasternak, 2004. Effects of saline irrigation water and heat waves on potato production in an arid environment. *Field Crops Research*, 90: 275-285.
11. Bustingorii, C. and R. S. Lavado, 2014. Soybean as affected by high concentrations of arsenic and fluoride in irrigation water in controlled conditions. *Agricultural Water Management* 144: 134-139.
12. Chapman, P. D., and P. F. Pratt, 1961. *Methods of analysis for soils, plants and water*. University of California: Division of Agricultural Sciences, CA.
13. Chiou, R. J., 2008. Risk assessment and loading capacity of reclaimed waste-water to be reused for agricultural irrigation. *Environ. Monit. Assess.* 142: 255-262.
14. De Pascale, S., F. Orsini, R. Caputo, M. A. Palermo, G. Barbieri, A. Maggio, 2012. Seasonal and multiannual effects of salinization on tomato yield and fruit quality. *Functional Plant Biology*, 39: 689-698.
15. Dole, J. M., and H. F. Wilkins, 1999. *Floriculture: principles and species*, Rentice-Hall, USA.

16. Fageria, N. K., V. C. Baligar, and R. B. Clark, 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 185–268
17. Fageria, N. K., V. C. Baligar, and R. J. Wright, 1990. Iron nutrition of plants: An overview on the chemistry and physiology of its deficiency and toxicity. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 25: 553–570.
18. Fernandez, C., J. E. Cora, J. A. C., Araujo, 2003. Reference evapotranspiration estimation inside greenhouses. *Scientia Agricola*, 60(3): 591–594.
19. Fernandez, M. D., S. Bonachela, F. Orgaz, R. Thompson, J. C. Lopez, M. R. Granados, M. Gallardo, E. Fereres, 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig. Sci.* 28(6): 497–509.
20. Food and Agriculture Organization (FAO), 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 24, FAO, Rome.
21. Food and Agriculture Organization (FAO), 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome.
22. Food and Agriculture Organization (FAO), 2002, Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. FAO Irrigation and Drainage paper 61.
23. Food and Agriculture Organization (FAO), 2013. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. FAO plant production and protection paper 217, FAO, Rome.
24. Grattan, S. R., L. Zeng, M. C. Shannon, and S. R. Roberts, 2002. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. *California Agriculture* 56(6): 189–195.
25. Gupta, U. C., and S. C. Gupta, 1998. Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: Implications for management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29: 1491–1522.
26. Hamilton, A. J., F. Stagnitti, X. Xiong, S. L. Kreidil, K. K. Benke, and P. Maher, 2007. Wastewater irrigation: the state of play. *Vadose Zone J.* 6: 823–840.
27. Harmanto, V. M. Salokhe, M. S. Babel, and H. J. Tantau, 2005. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agric. Water Manage.* 71: 225–242.
28. Hergert, G. W., and D. Knudsen, 1977. Irrigation water quality criteria. Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension. Paper 1416. available at <http://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/1416>
29. Jang, T., S. B., Lee, C. H. Sung, H. P. Lee, and S. W. Park, 2010. Safe application of reclaimed water reuse for agriculture in Korea. *Paddy and Water Environment*, 8(3): 227–233.
30. Jeong, H. S., T. I. Jang, C. H. Seong, and S. W. Park, 2014. Assessing nitrogen fertilizer rates and split applications using the DSSAT model for rice irrigated with urban wastewater. *Agricultural Water Management*, 141: 1–9.

31. Jolliet, O., 1999. The water cycle, Ecosystem of the world-20-Greenhouse ecosystems, Amsterdam.
32. Lee, O.J., M.W. Park, J. H. Lee, S. D. Kim, 2016, Future PMPs projection according to precipitation variation under RCP 8.5 climate change scenario, J. Korea Water Resour. Assoc. 49(2): 107-119.
33. Maas, E. V., 1990. Crop salt tolerance. In K.K. Tanji, ed. Agricultural salinity assessment and management, Ch. 13, ASCE, Manuals & Reports on Engineering 71: 262-304.
34. Maas, E. V., and G. J. Hoffman, 1977. Crop salt tolerance . Current assessment. J. Irrigation and Drainage, ASCE, 103: 115-134.
35. Mass, E. V., and S. R. Grattan, 1999. Crop yields as affected by salinity. In R. W. Skaggs and J. van Schilfgaarde, eds., Agricultural Drainage. Agron. Monograph 38. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
36. Mears, D. R. 1990. Opportunities for collaborative Indo-US greenhouse research. In: Proceedings of XI International Congress: The Use of Plastics in Agriculture. Oxford and IBH Publishing Company Private Limited, New Delhi, India.
37. Mpusia, P. T. O., 2006. Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation, M.Sc. Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
38. Orgaz, F., M. D. Fernandez, S. Bonachela, M. Gallardo, and E. Fereres, 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agric. Water Manage. 72: 81-96.
39. Petterson, S. R., N. Ashbolt, and A. Sharma, 2001. Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: a screening-level risk assessment. Water Environ. Res. 72: 667-672.
40. Ragusa, S. R., D. S. de Zoysa, and P. Rengasamy, 1994. The effect of microorganisms, salinity and turbidity on hydraulic conductivity of irrigation channel soil, Irrig. Sci., 15: 159-166.
41. Scofield, F. E., 1936. The salinity of irrigation water. Smith. Instit. Ann. Rep., 1935: 275-283.
42. Shannon, M. C., C. M. Grieve, 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. Scientia Horticulturae 78: 5-38.
43. Singh, R. B., P. S. Minhas, C. P. S. Chauhan, R. K. Gupta, 1992. Effect of high salinity and SAR waters on salinization, sodication and yields of pearl-millet and wheat. Agricultural Water Management 21: 93-105.
44. Sonneveld, C., and W. Voogt, 2009. Plant Nutrition of Greenhouse Crops, Springer.
45. Stanghellini, C., 1993. Evapotranspiration in greenhouse with special reference to Mediterranean conditions. ACTA, 335: 295-304.
46. Tedeschi, A., R. Dell'Aquila, 2005. Effects of irrigation with saline waters at different concentration, on soil physical and chemical characteristics. Agricultural Water Management 77: 308-322.

47. Texas A&M, 2003, Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies.
48. Thompson, R. B., C. Martinez-Gaitan, M. Gallardo, C. Gimenez, and M. D. Fernandez, 2007. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. *Agric. Water Manage.* 89: 261-274.
49. United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2012. Guidelines for Water Reuse, 600/R-12/618, Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
50. United States Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., USDA Handbook 60.
51. Vinten, A. J. A., U. Minelgrin, and B. Yaron, 1983. The effect of suspended solids in wastewater on soil hydraulic conductivity: II. Vertical distribution of suspended solids. *Soil Science Society of America Journal* 47: 408-412.
52. Wang, Z., Z. Liu, Z. Zhang, and X. Liu, 2009. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20cm standard pan evaporation in Northeast China. *Scientia Horticulture* 123(1): 51-57.
53. Welch, R. M., W. H. Allaway, W. A. House, and J. Kubota, 1991. Geographic distribution of trace element problems. In: Mortvedt JJ, Cox FR, Shuman LM, Welch RM, editors. *Micronutrients in agriculture*. 2nd ed. Madison, WI: Soil Sci Soc Am Inc: 31 - 57.
54. World Health Organization (WHO), 2006. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. World Health Organization, Geneva.
55. 고관달, 권준국, 이용호, 2013. 1. 우리나라 시설원예산업의 태동과 발전. *한국원예 발달사*: 487-497.
56. 국립기상연구소, 2012, 전지구 기후변화 보고서 2012.
57. 국립농산물품질관리원, 2017, 농산물표준규격정보. <http://www.naqs.go.kr/>.
58. 국토해양부, 2011. 수자원장기종합계획 2011-2020.
59. 기상청, 2012, 한반도 기후전망 보고서.
60. 김의양, 영산강 지구 대규모 농업회사 시범재배 포기, 노컷뉴스, 2011년 10월 4일자. <http://m.nocutnews.co.kr/news/880579>.
61. 나영석, 광양시, 청암뜰 염수피해 2년만에 원인 규명 용역추진, 경향신문, 2014년 2월 14.일자. http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=201402141447241&code=950312.
62. 농림과학기술원, 2006. 작물별 시비처방기준.
63. 농림부, 1996. 밭경지정리방안과 효율적인 관개방법 개발연구.
64. 농림수산식품부, 2010. 농림수산식품부고시 제2010-47호.
65. 농림축산식품부, 2013. 산척지 이용 종합계획(안) 2013-2017.
66. 농림축산식품부, 2014a. 2013 농림축산식품 통계연보.
67. 농림축산식품부, 2014b. 2013 시설채소 온실현황 및 채소류 생산실적.
68. 농림축산식품부, 2015. 2014 시설채소 온실현황 및 채소류 생산실적.

69. 농어촌연구원, 2009. 새만금지역 용수활용방안 연구.
70. 농업과학기술원, 2010. 토양 및 식물체 분석법.
71. 농촌진흥청, 2007, 주요 원예작물 재배력.
72. 농촌진흥청, 2012, 농업과학기술 연구조사분석기준.
73. 농촌진흥청, 2016. 농업용수 수질분석 실무 매뉴얼.
74. 박주식, 진상뜰 염해는 "하천 준설 때문", 광양시민신문, 2013년 4월 27일자.
<http://www.gycitizen.com/news/articleView.html?idxno=3573>.
75. 서순규, 광양시, 청암뜰 피해대책 난항, 뉴스1, 2013년 9월 27일자.
<http://news1.kr/articles/?1338176>.
76. 송정현, 정한석, 박지훈, 송인홍, 강문성, 박승우, 2014. 미처리하수지구 논에서의 수질 및 토양 특성 분석. 한국농공학회논문집, 56(5): 19-29.
77. 심상인, 이상각, 강병화, 1998. 내염성 식물의 탐색 및 생물학적 염해 모니터링 기술의 개발: II. 염분스트레스에 대한 작물의 출현과 초기 생장 반응. 한국환경농학회지, 17(2): 122-126.
78. 안관옥, 섬진강 하구 잔물피해 즉각조사하라, 한겨레, 2013년 10월 1일자.
<http://www.hani.co.kr/arti/society/area/605415.html>.
79. 안병환, 광양 진상면 애호박단지, 염수피해로 몸살, 한국농어민신문, 2013년 4월 04일자.
<http://www.agrinet.co.kr/news/articleView.html?idxno=117937>.
80. 안윤주, 이우미, 윤춘경, 2006. 국내 농업용수 수질기준의 적정성 평가 및 추가수질항목 제안. 한국하천호수학회지, 39(3): 285-295.
81. 엄기철, 박소현, 유성녕, 2012. 노지재배 고추재배시 물절약형 관개 기준에 의한 물절약량 산정 연구. 한국토양비료학회지, 45(2): 301-305.
82. 엄기철, 정필균, 고문환, 김상희, 유성녕, 박소현, 허승오, 하상건, 2010. 봄배추의 물 절약형 관개기준 설정. 한국토양비료학회지, 43(6): 812-822.
83. 유승환, 최진용, 이상현, 오윤경, 박나영, 2012, 고해상도 기후시나리오를 이용한 논용수 수요량 및 단위용수량의 기후변화 영향 분석, 한국농공학회논문집, 54(2), 15-26.
84. 이남호, 황한철, 남상운, 홍성구, 전우정, 1998. 시설농업을 위한 관개시설의 이용실태 조사분석. 한국농공학회지, 40(6): 37-45.
85. 이슬비, 홍창오, 오주환, Jessie Gutierrez, 김필주, 2008. 섬진강 하구 관개용수 염화에 의한 시설재배단지 토양의 염류집적 심화. 한국환경농학회지, 27(4): 349-355.
86. 장정렬, 이성학, 조영권, 최진용, 2014. 새만금 간척지구의 농업용지 토지이용계획을 고려한 농업용수 수요량 산정. 한국관개배수, 21(1): 1-16.
87. 정필균, 엄기철, 손연규, 고문환, 김상희, 박소현, 유성녕, 2011. 가을배추의 물 절약형 관개기준 설정. 한국토양비료학회지, 44(5호): 679-687.
88. 정한석, 박지훈, 성충현, 장태일, 강문성, 박승우, 2013. 간접하수재이용에 따른 논에서의 수질 및 토양환경 영향 분석. 한국농공학회논문집, 55(3): 91-104.
89. 조동권, 멀쩡한 나무도 물만 주면 시름시름, 농민신문, 2012년 7월 2일자.
http://cluster1.cafe.daum.net/_c21_/bbs_search_read?grpId=1MaRC&fId=apmd&datanum=329&openArticle=true&docId=1MaRCapmd32920120718142621.

90. 초당대학교 환경기술연구소, 2005. 광양(Ⅲ) 공업용수도사업에 따른 섬진강 환경 영향 조사 보고서.
91. 한국농업경영포럼, 2013. 간척지의 농업적 이용을 위한 간척지별 세부활용계획 수립방안 연구.
92. 한국농촌경제연구원, 2014. 시화간척지 대송단지의 농업적 토지이용계획 수립.
93. 환경부, 2014, 수질오염공정시험방법.
94. 환경부, 2014. 2013 하수도통계.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농생명 산업기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림 축산식품부에서 시행한 농생명산업기술개발사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.