



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

다양한 수자원을 이용한 순환식 수경재배  
양액 관리 및 나트륨 이온 대응 기술 개발

**Closed Hydroponic Nutrient Solution and Sodium  
Ion Management Using Multiple Water Sources**

2023년 2월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과

김 주 신

다양한 수자원을 이용한 순환식 수경재배  
양액 관리 및 나트륨 이온 대응 기술 개발  
Closed Hydroponic Nutrient Solution and Sodium  
Ion Management Using Multiple Water Sources

지도교수 김 학 진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2023년 2월

서울대학교 대학원  
바이오시스템공학과  
김 주 신

김주신의 석사 학위논문을 인준함  
2023년 2월

위 원 장               정          수          (인)

부위원장               김          학          진          (인)

위     원               조          우          재          (인)

## 국문초록

순환식 수경재배는 물과 비료를 절약할 수 있는 환경친화적인 농법이지만 양액을 교체하지 않고 계속 사용하면 순환되는 양액과 초기에 사용한 양액 간의 무기 양분 비율 및 농도가 달라지므로 작물이 요구하는 양분 흡수를 최적화하기 위한 정밀 양액 관리가 필요하다. 또한 사용 용수로부터 유입되는 나트륨은 대부분이 작물에 흡수되지 않고 순환하는 양액 내 누적되기 때문에 대상 작물의 최대 염분 내성 임계치를 넘지 않게 주기적인 모니터링과 대응이 요구된다. 본 연구에서는 다양한 용수를 사용하는 순환식 수경재배 조건에서 사용하는 용수와 순환하는 양액의 성분을 고려한 이온 선택성 전극 기반 정밀 양액 관리 기술을 작물 재배에 적용하여 양액 내  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  농도를 제어하고 배액 탱크 내 나트륨 농도를 관리하는 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 질소, 칼륨, 칼슘, 나트륨 이온 선택성 전극과 8가지의 개별 비료농축액으로 구성된 양액제어기를 구성하여 순환식 수경재배 방식으로 작물을 재배하였으며 개발한 시스템이 목표 농도 범위에 맞게  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온 농도를 유지하는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 나트륨 이온을 모니터링하고 임계치 초과 시 배액을 방출하여 나트륨 농도를 낮출 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

**주요어 :** 양액재배, 이온 기반 양액 보충, 이온 선택성 전극, 정밀 양액 공급, 순환식 수경재배 나트륨 관리

**학 번 :** 2021-20662

# 목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
1. 서론	1
1.1 연구목적	5
1.2 연구사	6
1.2.1 양액 내 나트륨의 영향과 관리 방법	6
1.2.2 수질 내 개별 이온 측정 방식	7
1.2.3 순환식 수경재배 양액 관리 기술	8
1.3 기대효과	10
1.3.1 기술적 측면	10
1.3.2 경제 및 산업적 측면	10
2. 관련 이론	11
2.1 의사결정트리 기반 급액 관리	11
2.2 이온 선택성 전극의 작동원리	15
3. 재료 및 방법	18
3.1 다원수 순환식 수경재배 제어 모델	18
3.2 다원수 순환식 수경재배 제어 시퀀스	22
3.3 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템 설계	28
3.3.1 이온 선택성 전극 준비	28
3.3.2 다원수 순환식 수경재배 시스템 설계	29
3.4 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템 검증	33
3.4.1 Stepwise management test	33

3.4.2 다원수 이온 기반 양액 시스템 이용 상추 재배	35
3.4.3 다원수 이온 기반 양액 시스템 이용 토마토 순환식 수 경재배 현장 실험 .....	36
3.5 나트륨 이온 모니터링 및 나트륨 관리 기술 개발 ..	39
3.5.1 나트륨 이온 선택성 전극 제작 .....	39
3.5.2 Na 전극의 표준용액 정량측정 성능 평가 .....	39
3.5.3 나트륨 이온 선택성 전극 양액 적용성 평가 .....	40
3.5.4 나트륨 이온 축적 대응 및 모니터링을 위한 데이터베이 스, SMS 및 온라인 웹 적용 .....	43
4. 결과 및 고찰 .....	45
4.1 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템 검증 .....	45
4.1.1 Stepwise management test 결과 .....	45
4.1.2 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템의 장기 실험 결과 .....	54
4.1.3 다원수 이온 기반 양액 시스템 이용 토마토 순환식 수 경재배 현장 실험 결과 .....	60
4.2 나트륨 이온 모니터링 및 나트륨 관리 기술 개발 ..	62
4.2.1 Na 전극의 표준용액 정량측정 성능 평가 결과 ..	62
4.2.2 나트륨 이온 선택성 전극 양액 적용성 평가 .....	65
4.2.3 나트륨 이온 축적 대응 및 모니터링을 위한 데이터베이 스, SMS 및 온라인 웹 적용 .....	68
참고문헌 .....	74
Abstract .....	78

## List of Tables

Table 1.1 Drainage discharge standard for different Crops in Netherlands .....	6
Table 3.1 Chemical composition of the NO <sub>3</sub> and K ISE membranes fabricated in this study .....	28
Table 3.2 List of main components .....	31
Table 3.3 Concentration of the stock solution used for nutrient replenishment .....	32
Table 3.4 Regression equations used for NO <sub>3</sub> , K, and Ca ion concentration measurement .....	32
Table 3.5 Target concentration of nutrient solution to be spiked in the four-step validation .....	33
Table 3.6 Target concentration of nutrient solution to be spiked in the four-step validation test .....	38
Table 3.7 Chemical composition of two different sodium ion selective membranes .....	39
Table 3.8 Concentrations of standard solution used for validation of two different types of sodium ion-selective electrodes .....	40
Table 3.9 Regression equation used for Na ion concentration measurement .....	41
Table 4.1 Analysis of water sources used in stepwise test .....	49
Table 4.2 Amounts of each stock solution injected by decision-tree method for the first stepwise management test .....	50
Table 4.3 Sodium ion-selective electrodes performance test results .....	62
Table 4.4 Lab made sodium ISE selectivity coefficient of interfering ions .....	66
Table 4.5 Data format saved in big data platform .....	71

## List of Figures

- Fig. 2.1 Decision tree model for calculating the amounts of fertilizer salts to be replenished - developed by Cho(2020) ..... 14
- Fig. 2.2 Schematic diagram of using an ion-selective electrode ..... 17
- Fig. 3.1 Water circulation diagram of closed hydroponics 18
- Fig. 3.2 Operational sequence of ion-specific nutrient management using multiple water sources ..... 24
- Fig. 3.3 Changes in sodium ion-selective electrode current due during one hour ..... 25
- Fig. 3.4 EMF change of a  $\text{NO}_3^-$  ion-selective electrode after immersing into a nutrient solution ..... 26
- Fig. 3.5 Schematic diagram of the two-point normalization method used to analyze multiple water sources (Kim 2013) ..... 27
- Fig. 3.6 Images of ion-selective membrane (left),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Na}^+$  ion-selective electrode body (right) ..... 29
- Fig. 3.7 Front view (top) and side view (bottom) of the multi-source ion-specific management system ..... 30
- Fig. 3.8 An array of ion-selective electrodes immersed in sampling chamber (left), and specification of ISE used in the experiment (right) ..... 31
- Fig. 3.9 Schematic diagram of the stepwise management test : test done by mixing three different source of water (top), and four source of water (bottom) ..... 34
- Fig. 3.10 Rainwater collecting device installed next to

	experimental greenhouse .....	37
Fig. 3.11	Schematic diagram of the evaluation test done while growing cherry tomato .....	37
Fig. 3.12	Na ion monitoring system applied to cherry tomato growing site .....	42
Fig. 3.13	Sodium selective membrane (left), and lab-made sodium ion-selective electrodes (right) .....	43
Fig. 3.14	Block diagram of sodium accumulation monitoring system .....	44
Fig. 4.1	Stepwise management performance of the developed system: above graphs show the difference between target ion concentrations and actual concentrations obtained after mixing three different solutions .....	47
Fig. 4.2	Stepwise management performance of the developed system: above graphs show the difference between target ion concentrations and ion concentrations measured by ISEs after mixing four different solutions .....	48
Fig. 4.3	Linear relationship between ion concentration determined by standard analyzers and ISEs .....	51
Fig. 4.4	Water replenishment performance of stepwise management test mixing three different sources, target vs. water flow sensor value .....	52
Fig. 4.5	EC variations in the first stepwise management test determined by commercial EC sensor .....	53
Fig. 4.6	Changes in pH in the first stepwise management test determined by commercial pH sensor .....	53
Fig. 4.7	Variations in ion concentration of mixing tank analyzed	

with ion chromatography (top), and the required amounts of six ions to be replenished (bottom) .....	56
Fig. 4.8 Changes in ion concentration of add-up water measured using ISEs array .....	57
Fig. 4.9 Changes in ion concentration drainage solution measured using ISEs array .....	57
Fig. 4.10 Changes in pH in the long-term lettuce growing test determined by commercial pH sensor .....	58
Fig. 4.11 Relationship curve between nutrient solution ion determined by ISE and standard analysis .....	59
Fig. 4.12 Stepwise management performance done using nutrient management system developed by ScienceLab Corporation .....	61
Fig. 4.13 Sodium concentration determined by standard analysis vs. lab made sodium ion-selective electrode .....	63
Fig. 4.14 Calibrating plot for relating sodium electrode response to sodium concentration .....	63
Fig. 4.15 Response of sodium electrode to different sodium concentration measured for 1 minute .....	64
Fig. 4.16 Sodium concentration determined by standard analyzer vs. lab made sodium ion-selective electrode .....	65
Fig. 4.17 Ion concentration determined by standard analyzer vs. lab made NO <sub>3</sub> , K, and Ca ion-selective electrodes .....	67
Fig. 4.18 Sodium concentration determined by standard analysis vs. lab made sodium ion-selective electrode ..	68

Fig. 4.19	Sodium concentration online monitoring website developed using Node-Red	69
Fig. 4.20	Sodium concentration warning alarm system using Pushbullet	71

# 1. 서론

식물의 건전한 성장과 생존을 위해서는 17종류의 원소가 필요하며 이를 필수원소(essential element)라고 부른다. 그중 탄소(C), 수소(H), 산소(O)는 물과 이산화탄소의 형태로 식물에 공급되며 나머지 14종류 원소, 즉, 질소(N), 인(P), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 황(S), 철(Fe), 아연(Zn), 망간(Mn), 구리(Cu), 붕소(B), 몰리브덴(Mo), 염소(Cl) 그리고 니켈(Ni)은 양분으로써 공급되어 진다. 수경재배에서는 식물의 생육에 필요한 이러한 원소들을 물에 녹인 양액의 형태로 작물에 공급하는데 이때 지하수, 지표수, 하천수, 수돗물, 빗물 등이 비료와의 혼합을 위한 용수로 사용되어 진다(Lee and Kim, 2019). 모든 경우 양액 공급에 사용되는 용수는 우수한 수질이 필요하며 이화학적 성질뿐만 아니라 유해 물질을 포함하지 않을 것, 병원균을 포함하지 않을 것, 또한 장기에 걸쳐서 질적으로나 양적으로 안정적인 확보가 가능할 것이 요구된다(van der Salm et al., 2020). 이러한 조건을 갖춘 수질은 작물의 높은 수확량과 높은 품질로 이어지기 때문에(Bauder et al., 2011), 양액을 제조하기 전에 항상 사용하는 원수의 수질을 분석하는 것은 소홀히 해서는 안 되는 절차이다.

배양액을 조제할 때 무엇보다도 용수의 이화학적 특성이 우선적으로 고려되어야 하는데 이는 1) 급액 관리 그리고 2) 유해물질 관리 측면에서 매우 중요하다. 첫째, 용수에 함유된 질소, 인, 칼륨 등의 비료 성분은 비료공급을 할 때 그만큼을 제외하지 않으면 배양액 내에 이들이온이 점차 축적되어 작물생육 저하를 야기하게 된다. 배양액은 처음에 조제했을 때의 성분조성이 재배 중에도 변화되지 않으며 불필요한 성분이 축적되지 않는 것이 이상적이며 이에 따라 어떤 수질을 사용하고 있는지에 대한 사전 분석이 요구되고 결과적으로 배양액 제조 시 어떤 비료 염의 수정이 필요한지 판단하는 정밀 급액 관리가 이루어져야 한다.

둘째, 용수중에 용해되어 있는 유해물질들은 작물의 성장과 발달

을 억제하며, 병해를 일으키며, 근권부에 상처를 입히는 것으로 알려져 있어, 수질 내 유해 이온 성분 관리의 중요성이 강조된다. 염류 이온 중에서 가장 문제가 되는 것은 나트륨 (Na) 이며 높은 염분 농도는 삼투압을 증가시켜 뿌리가 배양액으로부터 양분을 흡수할 수 없게 하고 거꾸로 뿌리에서 배양액으로 수분이 빠져나가 식물을 말라 죽게 만든다. 따라서 네덜란드의 ‘날드위크(Naaldwijk) 수질 기준’에 의거하여 용수 내 나트륨 수치 80ppm 미만인 용수를 배양액 제조에 사용해야 하며 나트륨 농도가 비교적 높은 용수를 사용할 경우는 나트륨 이온 농도가 점차 높아지거나 식물 성장을 억제하지는 않는지 주의해야 한다.

앞서 강조한 1) 급액 관리와 2) 유해 이온 성분 관리는 배양액을 재사용하는 순환식 수경재배시스템을 적용한 경우 더욱 엄격하게 지켜져야 한다. 수경재배는 배출되는 배액의 폐기 또는 회수 여부에 따라 비순환식과 순환식으로 구분한다. 순환식 수경재배는 물과 비료를 절약할 수 있는 환경친화적인 재배시스템이지만(Bar-Yosef, 2008), 배양액을 교체하지 않고 계속 사용하면 순환되는 배양액과 초기에 사용한 배양액 간의 무기 양분 비율 및 농도가 달라지므로 작물이 요구하는 양·수분 흡수를 최적화하기 위한 정밀 배양액 관리가 필요하다(Miller et al., 2020). 또한 사용 용수로부터 유입되는 나트륨은 대부분이 작물에 흡수되지 않고 순환하는 배양액 내 누적되기 때문에 대상 작물의 최대 염분 내성 임계치를 넘지 않게 주기적인 모니터링과 올바른 대응이 요구된다.

현재 시중에 판매되고 있는 양액공급 시스템은 이러한 사항들을 고려한 관비 제어 작업과 유해성분 모니터링을 수행할 수 없다. 아직 수경재배 배양액 내의 양분 농도를 확인하고 양분 비율을 조절하는데 물에 녹아있는 총 이온의 양을 나타내는 전기 전도도(EC) 관리 방식을 기업들이 채택하고 있기 때문이다. 산출된 EC 값을 토대로 시비량이 결정되고 농업용수와 혼합하여 배양액을 제조하는데 이때 부족 성분과 과잉성분을 구별하지 못하여 양액 내 이온 불균형이 발생하게 된다. 이 때문에 재배자들은 배양액을 정확하게 조정하기 위해 추가로 배양액 샘플을 주기적으로 채취하여 이온 크로마토그래피 (Ion chromatography)와 유도

결합플라즈마 분광분석 (Inductively Coupled Plasma Spectrometry) 과 같은 거치식 분석 장비를 가진 시험분석센터에 배양액 성분 분석 의뢰를 맡긴다. 일반적으로 배양액 분석 결과를 얻기까지 늦게는 수 주의 시간이 걸리기 때문에 배양액 교정을 위한 즉각적인 대응과 나트륨 이온 축적에 대한 신속한 조치가 어렵다는 한계를 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 전기 전도도를 측정하는 EC 전극과는 달리 양액 내 주요 이온들을 개별적으로 특정할 수 있고 각 이온 농도에 따른 전압 차를 발생시키는 이온 선택성 전극(Ion-selective electrode, ISE) 기술을 적용한 실시간 양액 내 개별 이온 분석 방식이 보고돼 왔다(Gieling et al., 2005; Kim et al., 2013). 또한 상추 순환식 수경재배 시 양액 내 다량원소 중  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 를 양액 탱크로부터 실시간으로 측정하고 부족 이온을 개별 염의 형태로 보충해주는 급액 관리 알고리즘에 대해서도 연구된 바 있다(Cho, 2020). 그러나 아직 순환식 수경재배 급액 관리 시 사용하는 용수들의 성분까지 일일이 고려한 자동화된 양액 관리 시스템의 개발은 전무한 실정이다. 기존 연구에서는 양액 제조에 사용하는 수질이 잘 변하지 않는다는 전제를 바탕으로 사용하는 원수 성분을 고정 상수로 사용하였는데, 이는 수질 변화가 발생하는 환경에서 시스템을 적용하기에는 적합하지 않을 수 있다. 우리나라에서 양액 제조에 가장 많이 사용하는 원수는 지하수, 하천수이며 이 두 가지 수원은 계절이나 강우의 영향을 받아 수질이 변한다. 또한 순환식 수경재배에서 사용하는 폐양액의 성분도 증발산 및 작물의 사용량에 따라 상시 변하게 되는데, 본 연구에서는 이러한 변화를 모니터링하고 사용하는 다원수 성분 주입 비율에 따른 가변 비료 조성 주입 방안을 연구하여 다양한 원수와 성분을 고려한 순환식 수경재배 시스템을 만들고자 하였다.

또한 추가적으로 수경재배에서 가장 문제가 되는 염류인 나트륨 이온을 실시간으로 모니터링하여 순환식 수경재배 시 나트륨의 축적을 확인하고 대응해 줄 수 있는 기술을 본 연구에서 수행하고자 하였다.

따라서 본 연구는 나트륨 이온 모니터링과 다양한 용수를 사용

하는 순환식 수경재배 조건에서 사용하는 용수와 순환하는 양액의 성분을 모두 고려한 ISE 기반 정밀 양액 관리 기술을 개발하고자 수행되었다.

## 1.1 연구목적

네덜란드는 현재 순환식 수경재배 보급률이 95% 이상인 순환식 수경재배 강국이다. 환경오염을 막기 위해 1994년 비순환식 수경재배 시스템을 순환식 시스템으로 전환하는 법령(The Waste Water Disposal Decree)을 시작으로 2002년에는 1. 배액의 수집 및 재사용 의무화, 2. 빗물의 수집 및 용수로의 사용 의무화, 3. 배액 내 나트륨(Na) 농도가 특정 임계치를 초과해야 방출을 허용하는 강력한 조항들이 법제화되었다. 이러한 법규는 배액, 빗물, 지하수와 같은 다양한 용수를 사용하여 배양액을 특정 농도에 맞게 제조할 수 있는 급액 관리 기술의 필요와, 배액 내 나트륨 농도를 실시간으로 모니터링하고 임계치 초과 시 배액을 자동으로 방출하는 관리 기술 개발의 요구를 불러왔다. 국내의 순환식 수경재배 시스템 보급률은 5% 미만으로 낮지만, 순환식 수경재배 관련 향후 환경규제를 대비하고 순환식 양액재배 시스템 보급률을 높이기 위해서는 관련한 선행 기술 개발이 필요하다.

본 연구에서는 다양한 용수를 사용하는 순환식 수경재배 조건에서 양액 내 이온 균형 상태를 직접적으로 제시해 줄 수 있는 ISE기반 정밀 배양액 관리 기술을 구현하고 배액 내 나트륨 이온 모니터링 및 관리 기술을 개발하고자 한다.

연구 목표 : 다양한 수자원을 이용한 순환식 수경재배 양액 관리

- 배양액 혼합탱크, 보충수, 배액 탱크 내의 개별 이온 ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )을 측정하여 목표 농도에 맞게 배양액을 제조하는 양액 관리 알고리즘 개발

- 다원수 양액 관리 장치 개발 및 알고리즘 검증

세부 목표 : 나트륨 이온 모니터링 및 관리 기술 개발

- 나트륨 이온 측정을 위한  $\text{Na}^+$  이온 선택성 전극 제작 및 검증

- 나트륨 이온 실시간 모니터링을 위한 데이터베이스, SMS 및 온라인 웹 구성

- 나트륨 농도 관리를 위한 배액 관리 알고리즘 개발

## 1.2 연구사

### 1.2.1 양액 내 나트륨의 영향과 관리 방법

나트륨이 식물에 끼치는 생리적 영향에 대해서는 이미 많은 연구들이 수행되었고 관개수 안에 포함된 나트륨 수치가 식물의 생육을 원만하지 못하게 한다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 그러나 반대로 적정 수치의 나트륨은 과실의 당도나, 특수작물 내 특정 성분 함유율을 높이는 것으로 보고한 사례들도 있으며 이러한 연구결과들은 배양액 내 나트륨 모니터링의 중요성을 대두시켜다.

Besluit Glastuinbouw (2002) 법령에 따라 네덜란드에서는 배양액 내 나트륨 (Na) 농도가 특정 임계치를 초과해야 배양액 방출을 허용하고 있고 대상 작물에 따른 배양액 내 나트륨 임계치는 Table 1.1과 같다. 또한 본 법령은 배양액 성분 분석을 의무화하였으며 농가는 적어도 13주마다 한 번 배양액 내 나트륨, 인, 질소 성분을 분석하도록 권장한다.

Table 1.1 Drainage discharge standard for different Crops in Netherlands

Crop	Sodium concentration in Drainage
Tomato	184 mg/L
Sweet Pepper	138 mg/L
Cucumber	138 mg/L
Rose	92 mg/L
Carnation	92 mg/L
Eggplant	138 mg/L
Gerbera	92 mg/L
Orchid	23 mg/L

Erik van Os et al.(2016)은 염분이 초래하는 식물의 생리적 장애에 대하여 보고하고 있으며, 크게 염분은 식물의 수분 스트레스와 염분 스트레스를 일으키는 것을 확인하였다. 또한, 고농도의 나트륨은

칼슘 흡수를 감소하여 꽃썩음병이나 잎 가장자리 괴사 현상을 일으키는 것으로 보고하였다.

De Pascale et al.(2019)은 높은 나트륨 수치를 지닌 배양액을 관개에 사용할 시 식물 생육 장애를 방지하기 위한 관개량 조절 (Leaching Factor) 방법에 대하여 보고하였으며, 이에 따른 나트륨 모니터링의 중요성을 당부하였다.

### 1.2.2 수질 내 개별 이온 측정 방식

Sokalski et al.(1999)은  $\text{Ca}^{2+}$  이온에 선택적으로 반응하는 PVC고분자 막을 이용하여 ISE 전극의 내부용액 성분과 농도에 따라  $\text{Ca}^{2+}$  검출한계를  $10^{-8}\text{M}$ 까지 낮출 수 있도록 이온반응을 유도하는 연구를 통해  $\text{Ca}^{2+}$ 을 선택적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 전극에서 가장 최적의 반응을 나타내기 위해서는 정확한 선택성 계수의 측정이 이루어져야할 것으로 당부하였다.

이후 Kim et al.(2006)은 이온 선택성 전극을 시료에 직접 담귀 다양한 이온의 농도를 개별적으로 측정하는 연구를 함으로써 휴대용으로 작게 제작할 수 있기때문에 현장 적용형 기술로의 유용성을 제시하였다. 또한 Kim et al.(2013)은 컴퓨터 기반의 양액 내  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온농도를 측정 할 수 있는 어레이 형태의 자동 측정 장치를 제안 하였고, two-point 정규화 기법이 수경재배에 효과적으로 적용될 수 있는 측정방법임을 확인하였다.

Gutierrez et al.(2007)은 전위차를 이용한 전자혀(Electronic tongue)방식의 이온측정 센서를 사용하여 실제 작물재배 환경에서  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  농도 모니터링 연구를 진행하였으며, 인공 신경망 네트워크 방식을 통해 각 이온간의 간섭 현상과 온도 보상을 최소화 시키려 하였다.  $\text{Cl}^-$  이온을 제외하고 성공적인 모니터링이 가능함을 보여줬으나 센서의 드리프트 문제로 장기간 모니터링에 문제가 있음을 보고하였다.

Bamsey et al.(2012)은 이온 선택성 멤브레인에 광학 센서를 이용하여 흡광도에 따라 이온농도를 결정하는 Optodes 센서를 이용하여 양액 내  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ 의 농도를 측정하는 시스템을 개발하였으나  $Ca^{2+}$ 의 경우 내구성 및 반복성의 한계로 실제 수경재배 환경 적용을 위해서는 보완이 필요함을 보고하였다.

Kim et al.(2017)은 ISE가 포함된 임베디드 장치가 포함된 휴대용 측정 장치를 개발하여 수질과 양액의  $NO_3^-$ ,  $K^+$  이온 측정이 가능함을 보고하였다.

Cho et al.(2017)은 정밀한 수경재배 관리를 위해 현장에서 사용할 수 있는 LabVIEW(v2014, National Instruments, TX, USA) 기반의 이온 모니터링 시스템을 개발했다.  $NO_3^-$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  이온의 개별 측정을 위해 이온 선택성 전극(ISE)을 활용했고, 실제 현장에서 양액 내 이온 수준을 확인하기 위해 파프리카 재배환경에서 적용 실험을 진행했다. 이온 크로마토그래피 분석 결과와 비교하여 정확도를 분석했고, 만족할만한 측정 성능을 보였다.

### 1.2.3 순환식 수경재배 양액 관리 기술

EC/pH 기반 순환식 수경재배 양액 관리 기술에서는 양액 내 이온 균형 상태를 직접적으로 제시해줄 수 없기 때문에 양분 흡수율 변동에 의한 양액 조성 변화를 조정할 수 없다는 문제점이 있다. 또한 농업용수로 활용하는 지하수, 하천수, 빗물과 같은 대부분의 원수들은 시기별로 성분 변화가 빈번히 발생하기 때문에, 순환식 수경재배 시 양액 관리를 더욱 어렵게 만든다. 때문에 현장에 적용하여 즉각적으로 양액 내 개별이온 농도를 측정 및 관리할 수 있는 기술의 필요성이 대두되었으며, 이와 관련하여 다양한 기술들의 적용과 개발이 시도되었다.

손(1998)은 EC와 pH 기반의 정밀하게 제어되는 시스템을 설계하여 양액 내 이온농도 변화를 분석하였고, 그 결과  $NO_3^-$ ,  $K^+$  이온이 하강되었고,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , 이온농도가 상승하였음을 확인하였다. 또한,

각 이온별 EC농도에 기여하는 분포도를 시간변화에 따라 작성하여 양액 EC 제어 방식의 한계점을 지적하였다.

Hwang et al.(1998)은 퍼지제어기를 이용하여 온도, 습도, 일사량, 생육시기, EC등의 생육정보를 바탕으로 양액을 공급하는 양액 공급 시스템을 개발하였다. 정밀한 액체계량을 위하여 오버플로우식 액체 정밀 계량장치를 개발하여 양액 자동조제 및 공급시스템을 개발하였는데 예측된 양액농도를 조제하는 알고리즘은 시행착오법을 거쳐서 작성된 9개의 규칙을 통한 퍼지제어 알고리즘을 사용하였다.

Savvas et al.(1999)는 EC 기준 순환식 수경재배에서 관수와 배출되는 양액의 EC를 바탕으로 양액 내 양이온 비율을 유지하도록 자동 보충 알고리즘을 고안하였지만, 이온간 축적의 문제로 근권부 EC 값들이 증가하게 된다고 보고하였다.

Kim et al.(2013)은 투입되는 비료량을 줄이고 배출되는 오염을 극소화하기 위하여 상용의 이온전극을 이용하여 이온별 농도를 측정할 수 있는 양액 상태의 온라인 계측모듈을 개발하고 양액의 이온별 농도를 조절할 수 있는 조제 알고리즘을 개발하는 연구를 수행하였다. 하지만 전극 내 구성, 간섭 이온으로 인한 측도 설정 문제로 인해 각각의 이온을 정량 측정할 수 있는 전극과 정확한 배액성분 측정을 위한 자동 측도설정모듈 개발연구가 요구되었다.

Jung et al.(2015)는 Kim et al.(2013)이 보고하였던 2점 정규화 및  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , 그리고  $\text{Ca}^{2+}$  ISE 어레이에 기반한 개별이온 농도 제어 시스템을 개발하여 ISE 전극의 적용성 및 이에 기반한 개별이온 제어의 가능성을 확인하였으나, 측정 및 제어를 수행하는 이온이  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 로 한정되어 다른 주요 이온 성분들에 대해서는 지속적인 축적 문제를 보고하였다.

Cho (2020)는 상추 순환식 수경재배 시 ISE 어레이를 사용한 양액 내  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온 제어 방법에 대하여 실험을 진행하였으며 이때  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  외에도 측정하지 못하는 다른 다량원소를 제어하기 위하여 작물의 흡수비를 이용한  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  이온 보충

방법을 고안하였으며 추가로 미량원소의 보충 또한 제안하였다. 미량원소의 경우 미량원소가 들어가 있는 혼합비료염을 사용하여 보충수 주입량에 비례하여 미량원소를 보충하는 제어 방식을 사용하였다.

## 1.3 기대효과

### 1.3.1 기술적 측면

기존에 연구된 ISE 기반 양액 균형 제어 방식은 양액혼합탱크 내 배양액 성분만 분석하여 부족한 염을 보충하는 작업을 수행했다면 본 기술 개발에서는 배액탱크, 배양액탱크, 보충수탱크로 분석 범위를 넓혀 고품배지경 같은 더욱 다양한 순환식 수경재배 시스템에서의 배양액 정밀 관리가 가능할 것으로 보인다.

또한 나트륨 모니터링이 실시간으로 가능해짐으로 배액 관리 및 재사용 측면에서 나트륨 임계치 도달에 따른 즉각적인 대응과 안정성을 확보할 수 있을 것이라 기대된다.

### 1.3.2 경제 및 산업적 측면

순환식 수경재배에서 빈번히 발생하는 양분 과잉 및 나트륨 축적으로 인한 작물 생산성 저하 문제를 해결하고 비료 및 물 사용 효율을 높여 재배자들의 경제적인 이윤과 또 세계적으로 문제시 되는 농업 활동에 의한 환경오염을 감소하는 효과를 불러올 것으로 기대된다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 의사결정트리 기반 급액 관리

수경재배에서 작물재배에 필요한 필수 원소는 양액의 형태로 공급되어지는데 이때 사용하는 비료염은 적어도 2개 이상의 이온을 포함하고 있다. 따라서 작물에게 필요한 염을 공급할때는 여러 종류의 염의 조합을 사용하여 작물에 공급하여야지만 유연하게 개별 이온의 농도를 제어할 수 있다. 그럼에도 불구하고 관행적으로 많이 사용되는 A액 B액 염보충 방식에 비해 여러 가지 개별 비료를 사용하게 되면 양액 농도를 제어하기 위해 더욱 복잡한 계산이 요구되고 양액관리를 위해 공간차지와 탱크 설치 비용이 증가한다는 제한 사항이 발생한다. 또한 염 선발을 잘못하게 되면 양분 공급이 원활하지 않는 문제가 발생한다. Cho(2020)는 이러한 문제를 해결하기 위해  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 그리고  $\text{K}_2\text{SO}_4$  총 7가지의 개별 비료를 사용한 의사결정나무 기반 이온 농도 제어 알고리즘을 보고하였다. 의사결정 나무는 데이터를 분석하여 이들 사이에 존재하는 패턴을 예측 가능한 규칙들의 조합으로 나타내는 분류 알고리즘으로 William Belson(1959)이 고안하였다.

Cho(2020)가 제시한 의사결정나무 기반 급액 관리 알고리즘은 3가지 파트로 나뉘어 있다. 첫 번째 파트는 양액 내 개별 이온이 목표 농도에 도달하기 위한 필요 보충량을 구하는 파트이다. 현재 만들어진 양액탱크 내 양액의 부피(L)와 개별염들의 농도를 알면 특정 부피(L)를 가지면서 동시에 특정 목표 이온 농도를 가진 양액을 만들기 위한 개별 염의 보충량을 아래 식(Eq. 2-1)을 통해 산출할 수 있다.

$$N_x = T_x \times V_{target} - D_x \times V_{current} - W_x \times (V_{target} - V_{current}) \quad \text{Eq. (2-1)}$$

여기서

$N_x$  = 필요 이온 보충량[mg] ( $x = \text{Ca, K, NO}_3, \text{NH}_4, \text{Mg, P}$ )  
 $T_x$  = 각 이온의 목표 농도[mg/L] ( $x = \text{Ca, K, NO}_3, \text{NH}_4, \text{Mg, P}$ )  
 $D_x$  = 이온선택성전극(ISE)으로 측정된 현재 양액 내 이온농도 [mg/L]  
 ( $x = \text{Ca, K, NO}_3, \text{NH}_4, \text{Mg, P}$ )  
 $W_x$  = 수질 분석을 통해 얻은 원수 내 각 이온의 농도 [mg/L] ( $x = \text{Ca, K, NO}_3, \text{NH}_4, \text{Mg, P}$ )  
 $V_{\text{target}}$  = 배양액 혼합탱크의 목표 수위 [Liter]  
 $V_{\text{current}}$  = 현재 배양액 혼합탱크의 수위 [Liter]

두 번째 파트는 Eq.(2-1)에 의해 계산된 개별 이온들의 보충 필요량을 의사결정나무를 사용하여 최적화시키는 작업이다. 의사결정 나무 기반 최적화는 개별 비료의 과잉 투입을 최소화하면서 개별 이온들의 우선순위에 따른 정확한 보충을 진행하기 위한 보충 규칙을 결정한다. 또한 사용하는 비료에 따른 보충량을 제시해 준다. 양액 제조에 사용하는 비료염들은 앞서 언급하였듯이 적어도 2개 이상의 이온을 포함하고 있으므로 모든 염들을 정확하게 목표농도에 도달하게 비료염을 주입하기는 매우 어렵다. 따라서 제어하는 개별 이온들에 우선순위를 두어 어떤 이온을 상대적으로 목표값에 근사하게 금액 관리를 할지 사전에 우선순위를 두어야 하며 우선순위에 따른 의사결정나무 모델을 사용해서 최적화된 비료염 투입량을 산출해야 한다. 의사결정나무 모델을 통해 최적화된 개별 이온들의 보충 필요량이 산출되면 결과값을 바탕으로 개별 비료와 보충수의 투입 제어를 할 수 있다. 개별비료의 정밀 투입은 펌프의 작동 시간을 제어함으로 작동하며 이때 Eq.(2-2)을 이용하여 개별 비료 투입 펌프의 작동 시간을 산출한다.

$$P_x = \frac{M_x}{C_x \times D_x} \quad \text{Eq.(2-2)}$$

여기서

$x = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}, \text{KH}_2\text{PO}_4, \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4, \text{KNO}_3, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O},$  혹은  $\text{K}_2\text{SO}_4$

$P_x =$  개별 비료염 투입을 위한 펌프의 작동시간[s]

$M_x =$  의사결정나무에 의해 결정된 최적화된 개별 비료염 투입량[mg]

$C_x =$  개별 비료염의 농도[mg/L]

$D_x =$  펌프의 초당 토출량[L/s]

의사결정나무 기반 급액 관리 알고리즘의 마지막 단계는 미량원소와 원수 보충 제어다. 양액 내 미량원소를 측정할 수 있는 센서의 개발은 미비한 상태로 미량원소의 보충은 원수 보충량에 비례하여 제어할 수 있으며 Eq.(2-3)의 식으로 정밀 투입 펌프의 작동시간을 결정한다.

$$P_m = \frac{C_m \times (V_{target} - V_{current})}{D_m} \quad \text{Eq.(2-3)}$$

여기서

$P_m =$  미량원소 보충을 위한 펌프의 작동시간[s]

$C_m =$  미량원소 투입 제어인자

$D_m =$  펌프의 초당 토출량[L/s]

그 후 마지막으로 특정 목표 부피를 가진 양액을 만들기 위한 보충수의 투입량을 Eq.(2-4)를 이용하여 제어할 수 있다. 보충수의 투입량은 목표 부피에서 현재부피를 뺀 값에 앞서 투입한 8가지의 개별비료량(L)을 차감하여 산출할 수 있다.

$$P_w = \frac{V_{target} - V_{current} - \sum V_{stock\ solution\ x} - V_m}{D_w} \quad \text{Eq.(2-4)}$$

여기서

$x = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}, \text{KH}_2\text{PO}_4, \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4, \text{KNO}_3, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O},$  혹은  $\text{K}_2\text{SO}_4$

$P_w =$  원수 보충을 위한 펌프의 작동시간[s]

$\Sigma V_{stock\ solution\ x} =$  앞서 주입한 모든 개별 비료염의 투입량[L]

$V_m =$  앞서 주입한 미량원소 혼합 비료염의 투입량[L]

$D_w =$  펌프의 초당 토출량[L/s]

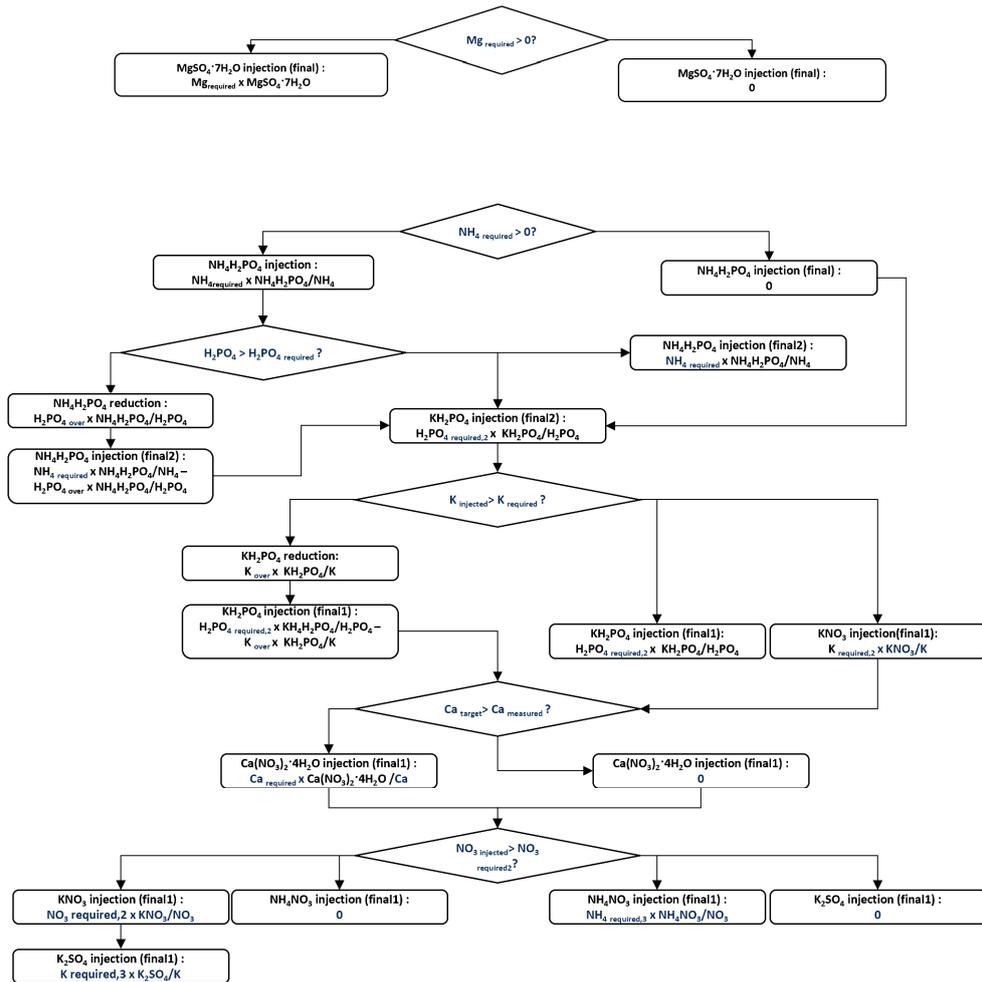


Figure 2.1 Decision tree model for calculating the amounts of fertilizer salts to be replenished - developed by Cho(2020)

## 2.2 이온 선택성 전극의 작동원리

Craggs et al.(1974)이 Poly-vinyl chloride(PVC) 형태의 고체막 전극을 개발한 이래 고분자 막을 이용한 수많은 이온 선택성 전극 개발 연구가 수행되었다. PVC 막전극은 선택성 및 감응속도에서 액막전극, 유리막전극 등과 같은 다른 형태의 이온 선택성 전극과 비교했을 때 장점을 보이며, 제조 및 소형화가 용이하여 이온 분석에 널리 사용된다. 이온 선택성 막은 일반적으로 PVC와 같은 고분자 지지체(matrix), 특정 이온에 감응하여 전하 분리를 유도하는 이온 선택성 물질(ionophore) 그리고 가소제(plasticizer)로 이루어져 있으며 이들을 적절히 혼합하여 이온의 정량적 정보를 확인하는데 사용할 수 있다. 이온의 정량적 정보는 막 전위차(membrane potential)를 측정하는 방식으로 구해질 수 있으며 이는 Eq.(2-5)의 Nerstian 방정식으로 표현된다.

$$E = E_o + \frac{RT}{Z_A F} \log[a_i] \quad \text{Eq.(2-5)}$$

여기서

$E$  = Cell potential(mV)

$E_o$  = Cell constant(mV)

$R$  = Ideal gas constant(= 8.314 J/mol · K)

$T$  = Temperature(K)

$F$  = Faraday constant(= 9.65×10<sup>4</sup> C/faraday)

$Z_A$  = Charge number of response ion

$a_i$  = Activity of response ion

위 식은 이상적인 이온 선택성 전극의 막전위 변화로 방해이온(Interfering ion) 없이 단 한가지의 특정 이온에만 고분자막이 감응한 경우 성립한다. 이온 전하가 1이고 온도가  $T=298K$ 이며 방해 이온이 섞

여있지 않은 경우  $a_i$ 의 농도가 10배 변화함에 따라 이론적으로 0.05916[V]의 막전위 변화를 보인다.

방해 이온을 포함하는 경우 막 전위차의 변화는 Eq.(2-6) 니콜스키-아이젠만(Nicolsky-Eisenman) 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$EMF = E_0 + E_j + S \log[a_i + \sum K_{ij}(a_j)^{Z_i/Z_j}] \quad \text{Eq. (2-6)}$$

여기서

$E_0$  = Standard potential (mV)

$E_j$  = liquid junction potential (mV)

$S$  = Nernstian slope (theoretically, 59.16/ $z_i$  mV/decade)

$a_i$  = activity of primary ion (M)

$a_j$  = activity of interfering ion (M)

$Z_i$  = Charge of primary ion (M)

$Z_j$  = Charge of interfering ion (M)

$K_{ij}$  = Selectivity coefficient

이러한 원리를 가진 이온 선택성 전극을 사용하면 이온 선택성 전극이 방출하는 막 전압을 토대로 용액 내 특정 이온의 농도를 유추할 수 있다.

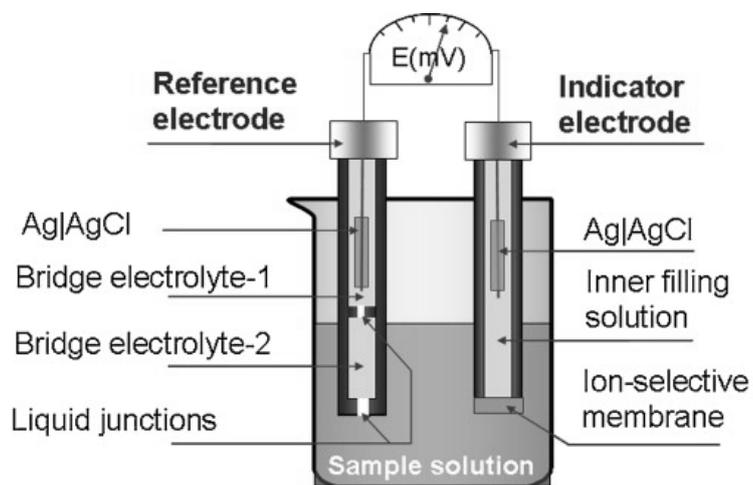


Figure 2.2 Schematic diagram of using an ion-selective electrode

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1. 다원수 순환식 수경재배 제어 모델

순환식 수경재배 시스템에서의 기본적인 양수분 관리는 작물 흡수에 의해 발생한 배액 탱크의 수위 및 양분 농도 변화를 보상하는 방식으로 진행된다. 이때 양액을 작물 재배에 적합한 상태로 복구하기 위해서는 신규 용수와 농축 비료액이 적정량만큼 투입되어야 한다. 이렇게 조제된 양액이 작물 재배 구역에 공급되어 다시금 회수되어 양액 공급부에서 재사용되는 거동을 고려하면 다원수 순환식 수경재배 시스템에서의 용수의 순환은 Fig. 3.1 그리고 Eq.(3-1)과 같이 모델화할 수 있다.

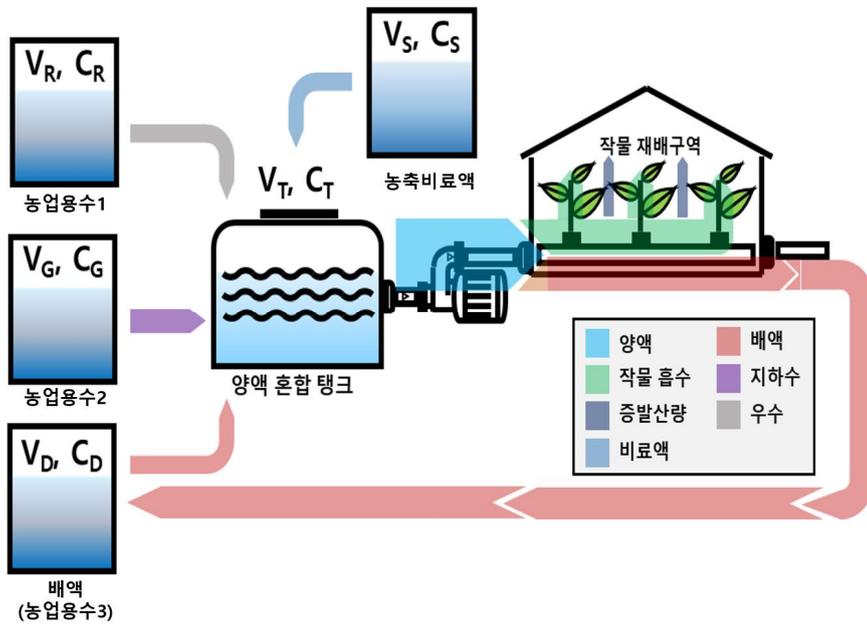


Figure 3.1 Water circulation diagram of closed hydroponics

$$V_T C_T = V_R C_R + V_G C_G + V_D C_D + V_S C_S \quad \text{Eq. (3-1)}$$

여기서, T는 공급 양액, R은 농업용수1, G는 농업용수2, D는 배액(농업용수3), S는 농축비료액, 그리고 V, C는 각각 해당 용수의 부피(L) 및 이온 농도(mg/L)를 의미한다. 제시한 순환식 용수 모델을 기반으로 하였을 때, 효과적으로 작물 재배에 최적화된 이온별 농도값 조성을 위해서는 사용하는 모든 농업용수에 대해 주요 양분 성분에 대한 측정이 요구된다.

선행연구에서 제시한 개별염들의 필요 보충량(Eq. 2-1)에서 착안하여 Eq.(3-1)에 제시한 다원수 용수 순환 모델은 다양한 용수를 혼합할 때 필요 이온 보충량을 Eq.(3-2)와 같이 구할 수 있다. 마찬가지로 양액의 현재 부피(L)와 개별 염들의 현재 이온 농도(mg/L) 그리고 목표하는 양액의 부피(L)와 개별 염들의 목표 이온 농도(mg/L)를 토대로 비료 및 물 보충에 필요한 개별 이온 보충량을 산출할 수 있다. Eq.(3-2)에서는 다원수 순환식 수정재배 제어를 위해 사용하는 용수들의 혼합 비율을 두어 각 용수의 사용 비율을 결정할 수 있다. 따라서 다양한 원수들 중 어떤 수원을 더 많이 사용할지에 대한 결정을 사용비율 값을 바꿔가며 제어할 수 있다.

$$N_I = T_I \cdot V_t - D_I \cdot V_c - W_I \cdot \left( \frac{V_t - V_c}{a+b+c \dots} \right) \cdot a - E_I \cdot \left( \frac{V_t - V_c}{a+b+c \dots} \right) \cdot b - R_I \cdot \left( \frac{V_t - V_c}{a+b+c \dots} \right) \cdot c \dots \quad \text{Eq. (3-2)}$$

여기서

$N_I$  = 보충할 다량 이온의 양 [mg] (I = NO<sub>3</sub>, K, Ca, NH<sub>4</sub>, Mg, P)

$T_I$  = 각 이온의 목표 농도 [mg/L] (I = NO<sub>3</sub>, K, Ca, NH<sub>4</sub>, Mg, P)

$D_I$  = 양액 혼합 탱크 내 이온 농도 측정값 [mg/L] (I = NO<sub>3</sub>, K, Ca, NH<sub>4</sub>, Mg, P)

$W_1$  = 1번 농업용수 탱크 내 이온 농도 측정값 [mg/L] (I = NO<sub>3</sub>, K, Ca, NH<sub>4</sub>, Mg, P)

$E_i$  = 2번 농업용수 탱크 내 이온 농도 측정값 [mg/L] (I = NO<sub>3</sub>, K, Ca, NH<sub>4</sub>, Mg, P)

$R_i$  = 3번 농업용수 탱크 내 이온 농도 측정값 [mg/L] (I = NO<sub>3</sub>, K, Ca, NH<sub>4</sub>, Mg, P)

$V_t$  = 양액 혼합 탱크 목표 수위 [L]

$V_c$  = 양액 혼합 탱크 현재 수위 [L]

$a, b, c \dots n$  = 각 원수의 혼합 비율

Eq.(3-2)은 몇 개의 농업용수를 양액 혼합 탱크에 섞는지에 따라 확장되거나 축소될 수 있다. 이후 선행연구에서 제시했던 방법대로 Eq.(3-2)에 의해 계산된 개별 이온들의 보충 필요량을 의사결정나무(Fig. 2.1)를 사용하여 최적화를 진행할 수 있다. 의사결정나무를 통해 산출된 개별 비료염들의 투입량은 펌프의 토출량을 알면 작동시간을 제어함으로써 정밀투입이 가능하다. 개별 비료 주입을 위한 펌프 작동시간 제어에 필요한 식은 선행 연구와 마찬가지로 Eq.(3-3)을 이용하여 펌프 제어를 수행할 수 있다.

$$P_x = \frac{M_x}{C_x \times D_x} \quad \text{Eq.(3-3)}$$

여기서

$x$  = Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KNO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O, 혹은 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

$P_x$  = 개별 비료염 투입을 위한 펌프의 작동시간[s]

$M_x$  = 의사결정나무에 의해 결정된 최적화된 개별 비료염 투입량[mg]

$C_x$  = 개별 비료염의 농도[mg/L]

$D_x$  = 펌프의 초당 토출량[L/s]

다원수 순환식 수경재배 급액 관리 알고리즘의 다음 단계는 미량 원소 보충이며 이는 선행연구의 원수 보충 제어 방식과 동일하다. 측정에 한계가 있는 미량원소의 보충은 원수 보충량에 비례하여 제어되며 Eq.(3-4)의 식으로 정밀 투입 펌프의 작동시간을 결정한다.

$$P_m = \frac{C_m \times (V_{target} - V_{current})}{D_m} \quad \text{Eq.(3-4)}$$

여기서

$P_m$  = 미량원소 보충을 위한 펌프의 작동시간[s]

$C_m$  = 미량원소 투입 제어인자

$D_m$  = 펌프의 초당 토출량[L/s]

다원수 순환식 수경재배 급액 관리 알고리즘의 마지막 단계는 원수 보충 제어다. 특정 목표 부피를 가진 양액을 만들기 위한 보충수의 투입량을 Eq.(3-5)를 이용하여 제어할 수 있다. 또한 Eq.(3-5)를 사용하여 보충에 사용하는 원수들의 사용 비율을 결정하여 차등하게 보충수의 투입을 제어할 수 있다. 보충수의 투입량은 목표 부피에서 현재부피를 뺀 값에 앞서 투입한 8가지의 개별비료량(L)을 차감하여 산출할 수 있으며 총 필요 원수 보충량(L)을 사용하는 원수들의 사용 비율에 따라 각각 설정하면 다원수 보충 비율 제어가 가능해진다.

$$P_{w1} = \frac{V_{target} - V_{current} - \sum V_{stock\ solution\ x} - V_m}{(a+b+\dots) \times D_{w1}} \times a$$

$$P_{w2} = \frac{V_{target} - V_{current} - \sum V_{stock\ solution\ x} - V_m}{(a+b+\dots) \times D_{w2}} \times b$$

⋮

$$P_{wm} = \frac{V_{target} - V_{current} - \sum V_{stock\ solution\ x} - V_m}{(a+b+\dots) \times D_{wm}} \times n$$

⋮

Eq.(3-5)

여기서

$x = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}, \text{KH}_2\text{PO}_4, \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4, \text{KNO}_3, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O},$  혹은  $\text{K}_2\text{SO}_4$

$P_w =$  원수 보충을 위한 펌프의 작동시간[s] (펌프 번호 : 1,2 ...  $n$ )

$\sum V_{stock\ solution\ x} =$  앞서 주입한 모든 개별 비료염의 총 투입량[L]

$V_m =$  앞서 주입한 미량원소 혼합 비료염의 투입량[L]

$D_w =$  펌프의 초당 토출량[L/s] (펌프 번호 : 1,2 ...  $n$ )

$a, b, c \dots n =$  사용하는 원수들의 혼합 비율

본 실험에서는 이온선택성 전극을 사용하여 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ ), 칼륨( $\text{K}^+$ ), 질산염( $\text{NO}_3^-$ )의 보충 필요량을 특정할 수 있었고 실시간으로 측정하지 못하는 암모늄( $\text{NH}_4^+$ ), 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ ), 인산( $\text{PO}_4^{3-}$ ) 이온의 농도는 기존 연구에서(Sonneveld et al., 1997; D. Savvas et al., 2006) 제시한 작물의 양분 흡수비에 따른 이온농도 예측법에 따라  $\text{NH}_4\text{-NO}_3, \text{Mg-Ca}, \text{P-NO}_3$ 를 각각 0.029:1, 0.5882:1, 0.0108:1 비율로  $\text{NH}_4^+, \text{Mg}^{2+}, \text{PO}_4^{3-}$  이온의 필요 보충량을 산출하였다. 그리고 황산염의 경우 산소화되었을 시 과잉으로 존재하여도 작물에게 큰 영향을 주지 않음으로  $\text{SO}_4^{2-}$  비료염의 농도제어는 고려하지 않았다(Sonneveld et al., 1997).

### 3.2. 다원수 순환식 수경재배 제어 시퀀스

다원수 순환식 수경재배의 양액 관리 작동 시퀀스는 Fig. 3.2와 같다. 첫 번째 단계는 농도를 알고 있는 두 개의 용액 *LOW*와 *HIGH* 사용하여 이온 선택성 전극을 보정하는 단계이다. 이온 선택성 전극이 순

환식 수경재배 양액 제어에 적용된 사례는 드문데 그 이유가 이온 선택성 전극의 강인성이 만족할 수준에 미치지 못하고, 온도, 이물질, 녹조와 같은 외부 환경에 큰 영향을 받는 특성 때문이다. 또한 대표적으로 신호 표류 현상이 이온 선택성 전극의 사용을 어렵게 한다. Fig. 3.3처럼 시간이 지남에 따라 이온 선택성 전극이 방출하는 전류와 전압에 변화가 발생하고 이는 측정 오차를 유발한다.

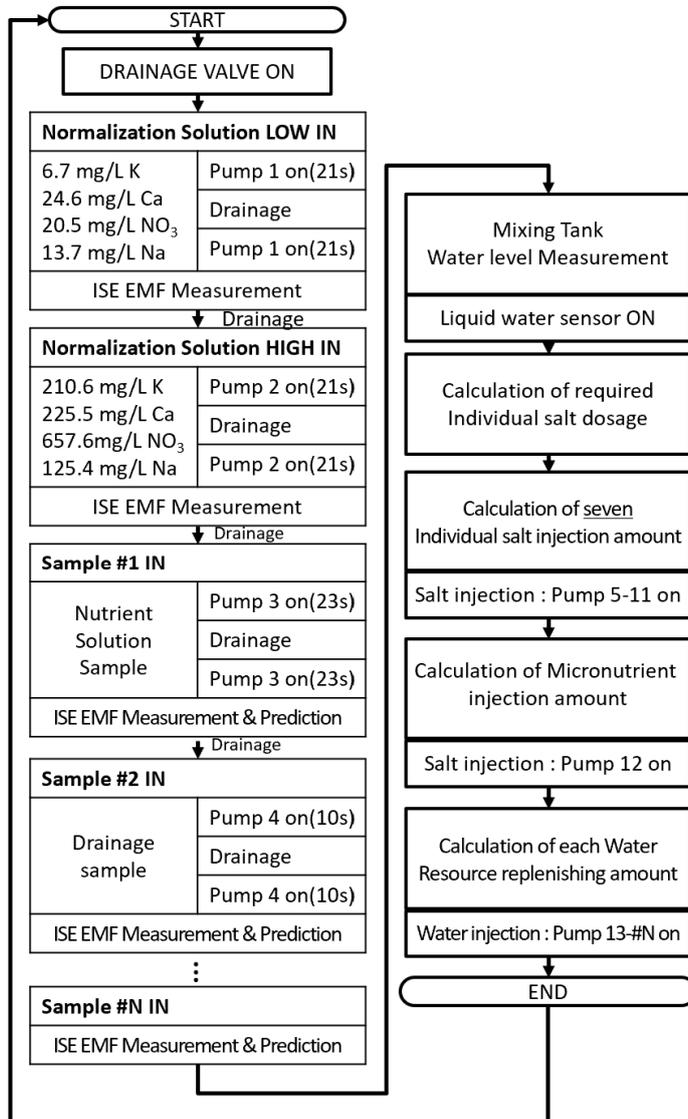


Figure 3.2 Operational sequence of ion-specific nutrient management using multiple water sources

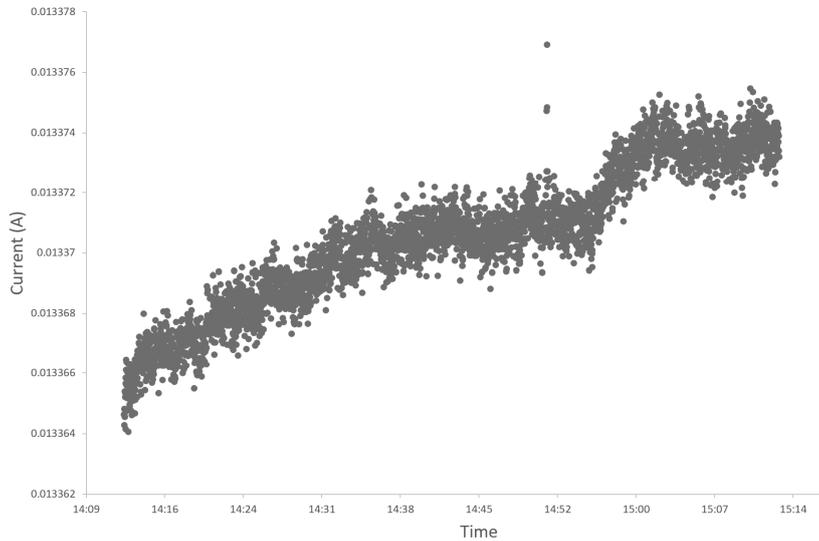


Figure 3.3 Changes in sodium ion-selective electrode current due during one hour

따라서 이온 선택성 전극 사용 전 보정하는 작업이 필요하고 이는 알고있는 농도 *LOW*와 *HIGH*를 사용한 2점 정규화 방식을 통해 해결 할 수 있다. Kim et al.(2013)이 제시한 Fig. 3.5의 2점 정규화 기법을 사용하면 이온 선택성 전극의 강인성과 측정 정확도를 높일 수 있으며 동시에 측정마다 매번 회귀 검량식을 작성하는 문제점을 제거할 수 있다. *LOW*와 *HIGH* 용액의 샘플링을 두 번씩 진행했는데 첫 번째 샘플링 은 챔버를 닦아내는 린싱 작업을 위한 동작이다. 이는 샘플링 챔버에 잔존하는 다른 용액을 닦아 내어 다른 용액들의 영향을 최소화하기 위한 절차이다. 또한 샘플링 챔버에 *LOW*와 *HIGH*용액이 채워지고 2분 뒤의 막전위(EMF)를 측정값으로 고려하여 농도 예측에 사용하였다. 이는 이온선택성 전극의 경우 새로운 용액을 측정하게 되는 경우 안정화 되기까지 시간이 걸리는 특성 때문이다. 일반적으로 2분 안에 안정된 신호를 측정할 수가 있게 된다(Fig. 3.4).

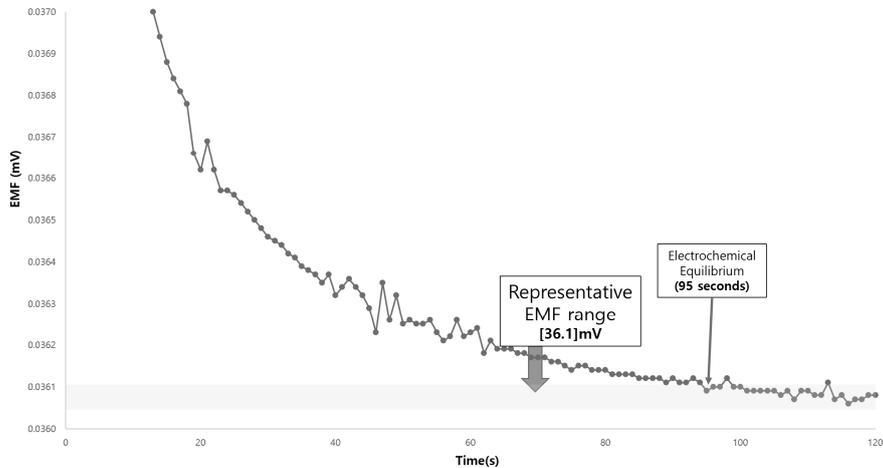
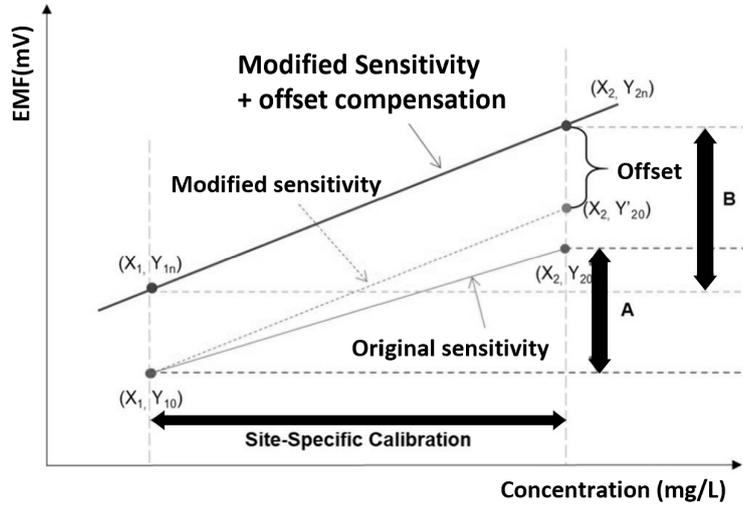


Figure 3.4 EMF change of a  $\text{NO}_3^-$  ion-selective electrode after immersing into a nutrient solution

다원수 순환식 수경재배 제어 시퀀스의 다음 단계는 양액 제어에 사용하는 원수들의 수질을 확인하는 단계이다. 이때 먼저 현재 양액의 이온 농도를 확인하고, 그 후 다른 용수들을 샘플링하여 각 이온 선택성 전극이 방출하는 막전위를 측정하였다. 측정된 막전위는 앞서 진행한 2점 정규화 작업에서 산출된 보상식에 대입하여 각 원수의 수질 상태를 확인하는 절차를 거친다. 각 원수의 수질 농도는 목표 개별 이온 농도(mg/L)와 목표 부피(L)를 가진 양액을 제조하기 위하여 개별 이온 투입량을 산출하기 위하여 사용되었다. 본 논문에서는 다원수 순환식 수경재배에 사용하는 원수의 총 숫자만큼 작동 시퀀스의 수질 측정 부분을 늘리거나 줄임으로 양액제어를 진행하였다.

다음 단계에서는 목표 양액 부피와(L) 목표 개별 이온 농도(mg/L)를 가진 양액을 제조하기 위해 Eq.(3-2)의 식을 이용하여 필요 개별 이온의 보충량을 산출하는 부분이다. 여기서는 먼저 현재 양액 혼합탱크의 부피를 측정하여 현재 양액의 부피를 구한다. 본 연구에서는 액체용 초음파센서(UG01, Echopod, USA)를 사용하여 물 높이를 부피로 환산하여 사용하였다. 그 후 의사결정나무 염 투입 알고리즘을 통한 최적화를 거쳐 개별 비료 보충과, 미량원소 보충, 그리고 마지막으로

다양한 원수 보충을 통하여 양액 다원수 순환식 수경재배 양액 관리 시퀀스를 완료하였다.



$$\text{ratio} = \frac{B}{A} = \frac{Y_{2n} - Y_{1n}}{Y_{20} - Y_{10}}$$

$$\text{offset} = Y_{2n} - Y'_{20}$$

$$\text{Compensation} = (\text{EMF} \times \text{ratio}) + \text{offset}$$

Figure 3.5 Schematic diagram of the two-point normalization method used to analyze multiple water sources (Kim 2013)

### 3.3. 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템 설계

#### 3.3.1 이온선택성 전극 준비

Table 3.1 Chemical composition of the  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{K}^+$  ISE membranes fabricated in this study

Component	$\text{NO}_3^-$		$\text{K}^+$	
	Reagent <sup>z</sup>	Composition (wt% <sup>y</sup> )	Reagent <sup>z</sup>	Composition (wt% <sup>y</sup> )
Ionophore	TDDA	4.0	Valinomycin	2.0
Plasticizer	NPOE	67.75	Dos(Bis)	64.7
Matrix	PVC	28.25	PVC	32.8
Additive	-		KTpCIPB	0.5
Inner solution	0.01M $\text{NaNO}_3$ + 0.01M $\text{NaCl}$		0.01M $\text{KCl}$	

본 연구에서는 양액 제조를 위해 쓰이는 농업용수 내 질산염, 칼륨, 그리고 칼슘 이온 농도 측정을 위해 개별 이온의 농도에 따라 상이한 전압을 발생시키는 이온 선택성 전극을 채택했다. 이때 칼슘 이온 선택성 전극(Orion 9320BN, Thermo Fisher Scientific, USA)으로는 상용제품을 이용하였고 나머지 전극은 선행 연구에서(Kim et al., 2006) 제시한 방법대로 직경 2.5mm PVC(poly vinyl chloride) 고분자 막(Fig. 3.6)에 각종 전기 활성 물질(Table 3.1)을 도핑한 후 전극 본체에(Fig. 3.6) THF(tertrahydrofuran)로 부착하여 사용하였다. 제작한 이온선택성 전극의 내부 기준 전극은 Ag/AgCl 잉크(Model 01164, ALS, Japan)를 도포한 지름 1mm 은선(Model 265,594, Sigma Aldrich, USA)을 사용하였다. 전극 제작 후 질산염 및 칼륨 전극 본체는 각각 0.01M  $\text{NaNO}_3$  + 0.01M  $\text{NaCl}$ 과 0.01M  $\text{KCl}$  용액으로 채워졌으며 전극의 안정화를 위해 동일 용액에 6시간 담근 뒤 사용되었다. Fig. 3.6과 같이 각 전극은 어레이 형태로 하나의 상용 기준 전극(Orion 900200, Thermo Fisher Scientific, USA)과 연결하여 아크릴

챔버에 샘플링된 용액의 각 이온 농도를 측정하는 데 이용되었다.

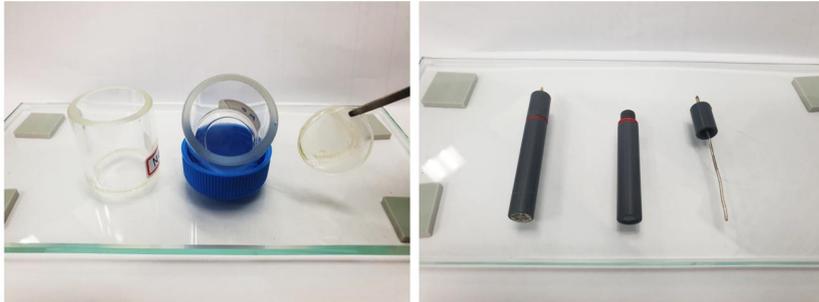


Figure 3.6 Images of ion-selective membrane (left),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Na}^+$  ion-selective electrode body (right)

### 3.3.2 다원수 순환식 수경재배 시스템 설계

다양한 용수 내  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  농도를 측정하고 개별 이온을 보충하는 Fig. 3.7의 실험 장치를 제작하여 서울대학교 바이오시스템공학과 공동 연구실험실에 설치하였다. 실험 장치는 박막식(Nutrient film technique) 순환식 수경재배 방식으로 30주의 로메인 상추가(*Lactuca sativa var. longiflora*) 정식된 재배 베드, 배액을 수집하는 배액 탱크, 보충수를 저장하는 원수 탱크, 각 용수와 비료염을 혼합하는 양액 혼합 탱크, 다량원소 보충을 위한 7가지의 개별 비료염 및 미량원소 보충을 위한 1개의 혼합 염, ISE 센서 어레이(Fig. 3.8), 샘플링 챔버, *LOW-HIGH* 캘리브레이션 용액, 식물의 광합성을 유도하기 위한 LED 등, 그리고 연동펌프를 제어하여 양액공급 및 양액 제조 동작을 자동으로 수행하는 제어부로 이루어졌다. 본 실험 장치의 주요 구성 요소의 사양은 Table 3.2와 같다.

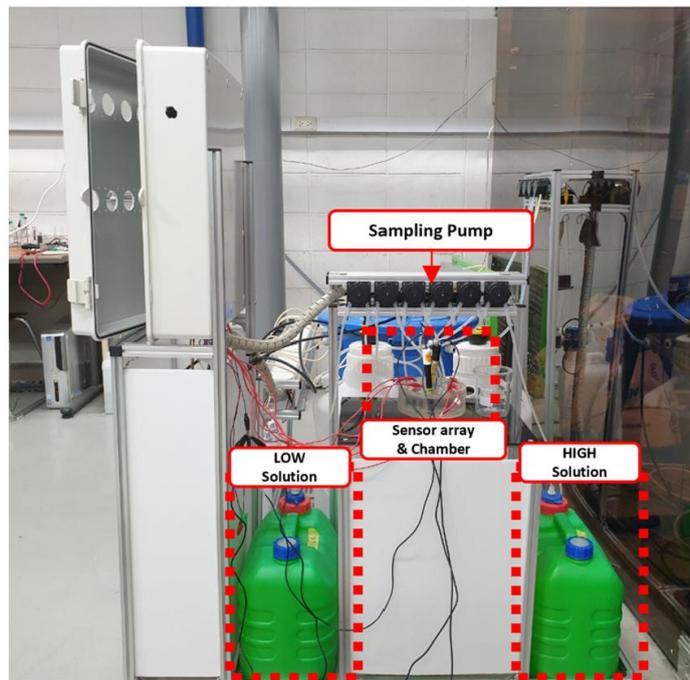
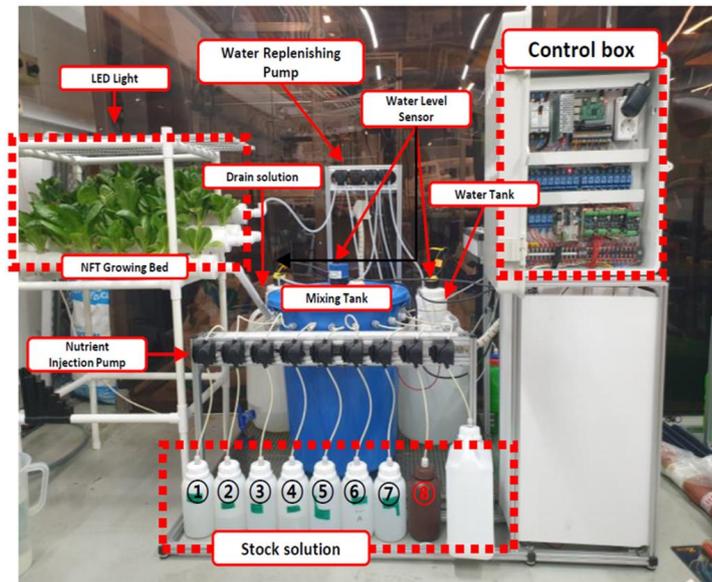


Figure 3.7 Front view (top) and side view (bottom) of the multi-source ion-specific management system

Table 3.2 List of main components

Component	Model
Main Control System	Raspberry Pi 3 Model B, Rasperry Pi Foundation, England
Sample Chamber	A chamber of Poly(methyl methacrylate), Megascience, S. Korea
Water replenishing pump / sampling pump	SR10/50, ASF THOMAS, Germany
Stock solution replenishing pump	Boxer_15QQ, Boxer Pump, Germany
Water-Level Sensor	EchoPod UG01, Flowline Inc., USA
Mixing Tank	55 L nutrient solution mixing tank
Relay	8-Channel relay, Ningbo Songle Relay Co.,ltd, China
ISE Filter	Sallen Key Filter, Labmade
ADC converter	AD712JN, Analog Devices Inc. USA
LED light bar	SL-310 RGB LED lamp, STECH LED Co., S. Korea

라즈베리파이 임베디드 보드의 GPIO에 릴레이를 연결하여 연동 펌프(Boxer\_15QQ, Boxer Pump, Germany)를 제어하는 방식으로 이온기반 다원수 양액 제어 시스템이 가동되었다. 연동펌프를 이용하여 Fig. 3.2의 다원수 양액 제어 시퀀스가 구동되었으며 샘플링, 염보충, 원수 보충을 수행했다. 아크릴 챔버에 샘플링된 용액은 샘플링 2분 후  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , 그리고  $\text{Ca}^{2+}$  이온 선택성 전극의 막전위 측정에 사용되었으며 이때 라즈베리파이는 ADC 컨버터와 SPI 통신을하여 100kHz로 막전위를 수집하였다. 사용된 전극별로 만개의 데이터를 수집하여 평균을 낸 값을 내부 메모리에 저장하여 다원수 내 개별 이온 농도 측정에 활용하였다. 또한 신호의 안정성을 높이기 위해 2차 sallen-key 로우패스필터를 적용하여 노이즈 제거에 사용하였다.

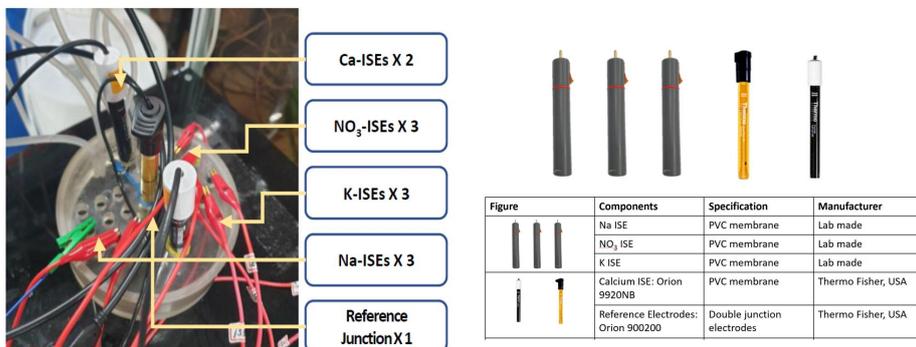


Figure 3.8 An array of ion-selective electrodes immersed in sampling chamber (left), and specification of ISE used in the experiment (right)

Table 3.3 Concentration of the stock solution used for nutrient replenishment

No.	Stock solution	Concentration (mg/L)
①	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	70,864
②	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	30,350
③	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	75,074
④	KNO <sub>3</sub>	24,169
⑤	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	40,417
⑥	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	32,986
⑦	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	52,531
⑧	Micronutrient (Fe-EDTA, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O, ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O, CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	400 times concentrated Hoagland solution (Hoagland and Arnon, 1950)

염 보충을 위하여 사용한 8개의 개별 비료 염은 Table 3.3의 농도로 준비되었다. 이때 개별 비료염의 농도는 사용하는 연동 펌프의 초당 토출량을 고려하여 준비되어야 한다. 토출량이 작은 연동펌프에 너무 낮은 농도의 개별 비료염을 사용하면 보충 작업에 오랜 시간이 걸림으로 주의해야 한다. 본 연구에서 사용한 연동 펌프는 1mL/s 의 토출량을 가진 연동펌프다.

마지막으로 제작된 전극은 다원수 수질 성분 모니터링을 위해 Table 3.4의 검량식을 이용하였다. 이때 2가지의 다른 검량식을 사용하여 두 가지 다른 검량식에서도 비슷한 값을 유추해 낼 수 있는지 확인하였다.

Table 3.4 Regression equations used for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, and Ca<sup>2+</sup> ion concentration measurement

Ion	Regression Equation	R <sup>2</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Y = -0.041log X + 0.8406	0.95
	Y = -0.046log X + 1.2392	0.95
K <sup>+</sup>	Y = 0.046log X + 1.1404	0.98
	Y = 0.034log X + 0.9811	0.98
Ca <sup>2+</sup>	Y = -0.036log X + 1.6711	0.94

### 3.4 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템 검증

#### 3.4.1 Stepwise management test

로메인 상추 재배 시험에 앞서 제작한 실험 장치의 비료 및 물 보충 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해 앞선 연구에서(Jung et al., 2015; Cho et al., 2017) 제시한 단계별 관리 실험(stepwise management test)을 진행하였다. 단계별 관리 실험은 양액 혼합 탱크 내 수위(L)와  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 목표 이온 농도를 임의로 변형시키며 제작한 시스템이 단계별 목표(Table 3.5)에 맞게 여러 용수를 혼합하여 양액을 제조할 수 있는지 검증하는 방법이다.

Table 3.5 Target concentration of nutrient solution to be spiked in the four-step validation

Step	Target ion concentration (mg/L)					
	$\text{NO}_3^-$		$\text{K}^+$		$\text{Ca}^{2+}$	
	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
Initial	434.0	434.0	117.29	117.3	105.3	80.2
1 <sup>st</sup> step	347.2	550	93	200	80	150
2 <sup>nd</sup> step	480	600	130	250	90	200
3 <sup>rd</sup> step	530	650	160	300	110	250
4 <sup>th</sup> step	580	700	190	350	140	300

이때 Fig. 3.2와 같은 순서로 다원수 이온 기반 양액 관리 알고리즘이 작동하였으며 Fig. 3.9(top) 그리고 Fig. 3.9(bottom)과 같이 양액 제조에 사용하는 용수의 개수를 변화시켜가며 실험을 진행하였다. 각 용액의 이온 농도를 분석하기 전 *LOW*와 *HIGH* 캘리브레이션 용액을 아크릴 챔버에 연동 펌프로 주입시켜 ISE 전극 신호를 보정하였고 양액 혼합 탱크, 배액 탱크 그리고 원수 탱크의 용수를 샘플링하여 각 탱크 내 용액의 현재  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  농도를 측정하였다.

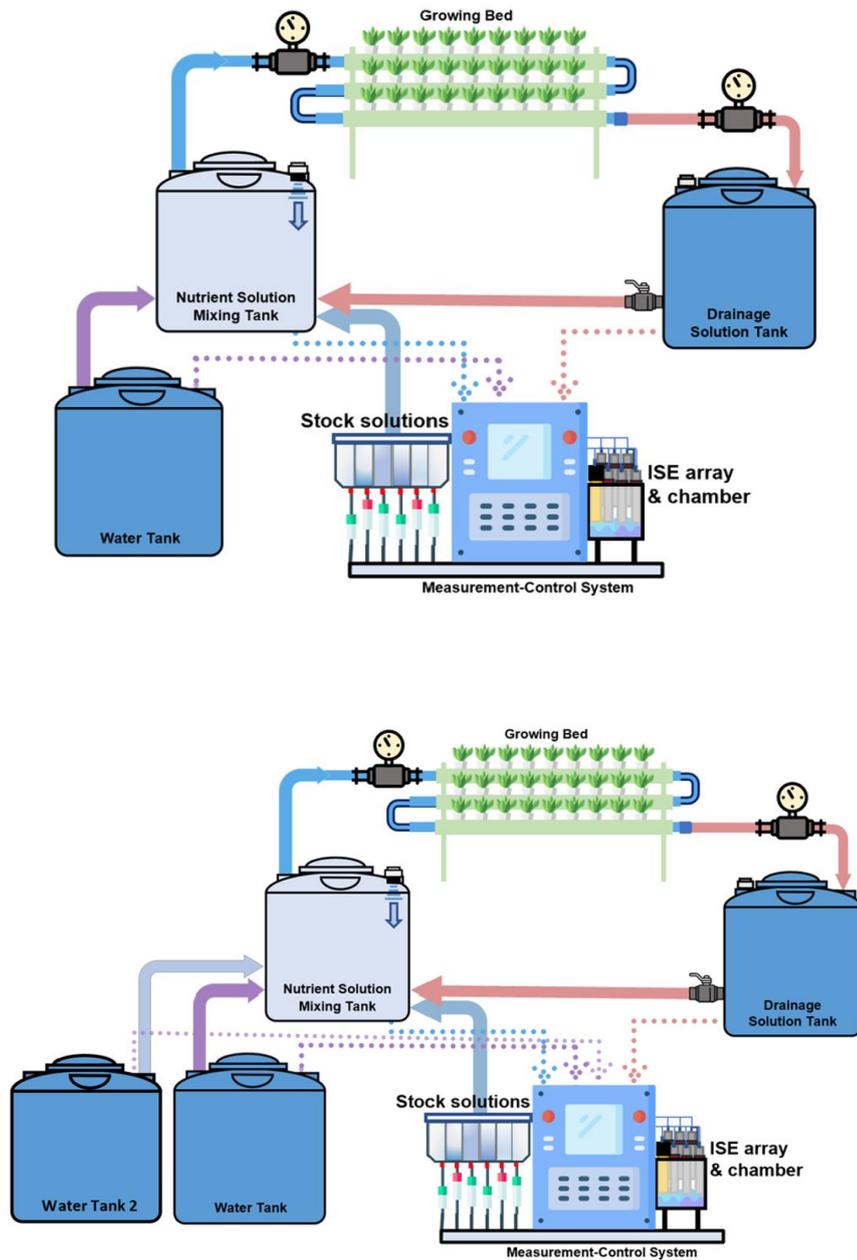


Figure 3.9 Schematic diagram of the stepwise management test : test done by mixing three different source of water (top), and four source of water (bottom)

그 후 각 용수 상태를 바탕으로 목표 부피와 목표 이온 농도를 갖춘 양액을 조제하는데 필요한 용수 및 염 주입량을 산출하고 양액 혼합 탱크에 필요량을 투입하였다. 본 작동 시퀀스에는 양액이 제대로 만들었는지 확인하는 피드백 제어 동작은 수행하지 않았다. 이때 첫번째 실험에서 Fig. 3.9(top) 용수 보충을 위한 배액과 원수의 혼합 비율은 1:1로 설정하였으며 두번째 실험에서는 Fig. 3.9(bottom) 배액, 1번 원수, 2번 원수의 비율을 3:2:5로 두었다. 단계별 다원수 이온 기반 관리 결과는 분석값과 목표값을 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)로 계산함으로써 양액 관리 성능을 평가했다(Eq. 3-6).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{pred}_i - \text{target}_i)^2} \quad \text{Eq. (3-6)}$$

첫 번째 단계별 양액 관리 실험 중 양액 혼합 탱크 내 EC와 pH 변화를 상용 수질 분석기(Orion VersaStar Pro, Thermo Fisher Scientific, USA)에 EC 전극(011510MD, Thermo Fisher Scientific, USA)과 pH 전극(8107UWMMD, Thermo Fisher Scientific, USA)을 연결하여 측정하였다.

### 3.4.2 다원수 이온 기반 양액 시스템 이용 상추재배

다음으로는 박막식 순환식 수경재배 방식으로 상추재배를 하며 앞서 개발한 시스템의 장기간 이온 균형 유지 성능을 확인하는 실험을 14일간 진행하였다. 총 30주의 로메인 상추 모종을 박막식 재배 베드에 스펀지큐브(25×25×25mm)를 이용해 정식 하였고 한 시간 간격으로 양액을 공급하였다. RGB 혼합광을 기본광으로 설정하였으며 광주기는 12(명)/12(암)시간 주기로 처리하였다. 양액 혼합 탱크 내 목표 농도는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 각각 434mg/L, 117mg/L, 80mg/L으로 고정하였고 양액 탱크의 목표 수위는 20L로 지정하였다. 양액 탱크의 목표 수위가

10L 이하로 낮아지면 Fig. 3.2의 다원수 이온 기반 양액 관리 알고리즘을 자동으로 실행하여 급액 관리를 실시하였다.

### 3.4.3 다원수 이온 기반 양액 시스템 이용 토마토 순환식 수경재배 현장 실험

개발한 다원수 이온 기반 양액 시스템을 (주)과학기술분석센터에 의뢰하여 양액제어기를 제작하고 (Fig. 3.11) 비료 및 물 보충 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해 앞선 제시한 단계별 관리 실험(stepwise management test)을 진행하였다. 단계별 관리 실험에서는 마찬가지로 양액 혼합 탱크 내 수위(L)와  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 목표 이온 농도를 임의로 변형시키며 (주)과학기술분석센터의 양액제어기에 탑재한 알고리즘이 단계별 목표(Table 3.6)에 맞게 여러 용수를 혼합하여 양액을 제조할 수 있는지 검증하였다. 마찬가지로 제작한 양액제어기는 Fig. 3.2와 같은 순서로 다원수 이온 기반 양액 관리 알고리즘이 작동하였으며 우수, 배액, 그리고 수원 농장의 수도에서 나오는 물을 사용하여 양액 제조에 실험을 진행하였다. 첫 두 단계는, 양액, 배액, 수돗물을 혼합하였고, 나머지 두 단계는 양액, 배액, 그리고 우수를 혼합하였다. 각 용액의 이온 농도를 분석하기 전 마찬가지로 *LOW*와 *HIGH* 캘리브레이션 용액을 아크릴 챔버에 연동 펌프로 주입시켜 ISE 전극 신호를 보정하였고 양액 혼합 탱크, 배액 탱크, 원수 탱크, 우수 탱크의 용수를 샘플링하여 각 탱크 내 용액의 현재  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  농도를 특정하였다. 우수는 Fig. 3.10과 같이 우수 집수장치를 이용하여 모아둔 우수를 사용하였다.

그 후 각 용수 상태를 바탕으로 목표 부피와 목표 이온 농도를 갖춘 양액을 조제하는데 필요한 용수 및 염 주입량을 산출하고 양액 혼합 탱크에 필요량을 투입하였다. 단계별 다원수 이온 기반 관리 결과는 분석값과 목표값을 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)로 계산함으로써 양액 관리 성능을 평가했다(Eq. 3-6).



Figure 3.10 Rainwater collecting device installed next to experimental greenhouse.



Figure 3.11 Schematic diagram of the evaluation test done while growing cherry tomato

Table 3.6 Target concentration of nutrient solution to be spiked in the four-step validation test

Step	Target ion concentration (mg/L)		
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Initial	133.0	210.0	45.3
1 <sup>st</sup> step	220	250	50
2 <sup>nd</sup> step	350	280	70
3 <sup>rd</sup> step	450	310	90
4 <sup>th</sup> step	550	340	110

## 3.5 나트륨 이온 모니터링 및 나트륨 관리 기술 개발

### 3.5.1 나트륨 이온 선택성 전극 제작

Na<sup>+</sup> 이온을 검출하기 위한 이온 선택성 막은 Cadogan et al. (1992)이 제시한 방법에 따라 2가지 방법으로 제작되었다. Table 3.7은 두 가지의 다른 나트륨 이온 선택성 막의 구성 성분을 나타낸다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 그리고 K<sup>+</sup> 전극의 제작과 동일하게 PVC 고분자 지지체에 도핑된 화학물질에 THF 용액을 2mL 혼합하여 24시간 건조시킨 뒤 내부 충전 용액을 채워 Na 전극을 제작하였다.

Table 3.7 Chemical composition of two different sodium ion selective membranes

	Na <sup>+</sup> (1)	Na <sup>+</sup> (2)
<b>Ionophore</b>	Sodium Ionophore X 0.7wt%, 1.4mg	Sodium Ionophore X 1.0wt%, 2.0mg
<b>Plasticizer</b>	NPOE 66.1wt%, 127.1 $\mu$ l	DOS 65.7wt%, 143.8 $\mu$ l
<b>Matrix/polymer</b>	PVC 33.0wt%, 66.0mg	PVC 32.85wt%, 65.7mg
<b>Additive</b>	KTpClPhB 0.2wt%, 0.4mg	NaTFPB 0.45wt%, 0.9mg
<b>Inner &amp; Conditioning</b>	0.01M NaCl	
	Dissolved in THF (tetrahydrofuran) 2mL	

### 3.5.2 Na 전극의 표준용액 정량측정 성능 평가

제작된 두 가지의 나트륨 이온 선택성 전극을 이용하여 6.17,

15.99, 100.33, 280.09, 547.10, 1835.06mg/L의 농도를 가진 6가지 용액의 농도를 예측하는 방식으로 제작한 나트륨 이온 선택성 전극의 평가를 실시했다. 각각 3가지의 이온선택성 전극을 3반복 하여 실험을 진행하였다. 본 결과는 서울대학교 농업생명과학공동기기원(NICEM)에서 ICP 분석을 통해 얻은 나트륨 농도를 바탕으로 제작한 나트륨 이온 선택성 전극의 측정 농도와 1:1 분석을 통해 이루어졌다. 본 실험에서 사용한 LOW와 HIGH 용액은 탈이온수에 녹여 제작되었으며 LOW용액은 26.60 mg/L, HIGH용액은 200.85 mg/L의 농도를 지닌 것을 NICEM 분석결과를 통하여 확인할 수 있었다.

Table 3.8 Concentrations of standard solution used for validation of two different types of sodium ion-selective electrodes

	1	2	3	4	5	6
Na <sup>+</sup> (mg/L)	6.17	15.99	100.33	280.09	547.10	1835.06

### 3.5.3 나트륨 이온 선택성 전극 양액 적용성 평가

경기도 수원시 서울대학교 부속농장의 단동 비닐온실에 방울토마토 순환식 수경재배 실험 베드를 구축하였고 16일 동안 배액 내 나트륨 농도를 개발한 나트륨 이온 선택성 전극으로 모니터링하는 실험을 진행하였다. 이때 양액 제조에 사용한 원수에는 Na 농도 함량이 매우 낮았기 때문에 염분 농도 모니터링을 위해 인위적으로 NaCl을 양액과 혼합하여 초기 나트륨 농도를 45mg/L로 설정하였다. 그 후 8일간 NaCl 추가해 가며 188mg/L 까지 인위적으로 증가시켜 나트륨 이온 선택성 전극의 반응성을 확인하였다. 실험 9일 차에는 배액에 원수를 보충하여 희석한 후 양액 내 나트륨 농도 변화 양상을 지켜보았다.

배액 내 나트륨 이온을 모니터링하기 위한 임베디드 모니터링 시스템의 외형은 Figure 3.12과 같이 구성하였다. 임베디드 보드인 라즈베리파이 3B+를 사용하여 ADC 컨버터를 통해 들어오는 나트륨 이온

선택성 전극의 막전위를 기록하여 2점 정규화 기법을 통해 배액 내 나트륨 농도를 예측하였다.

실험 기간 배액은 1일 1회 간격으로 샘플링되었으며 이를 서울대학교 농업생명공동과학기원(NICEM)에 수질 분석 의뢰하여 표준분석 결과값과 나트륨 모니터링 결과를 비교하였다. 이때 개별 이온 선택성 전극 오차율 측정 공식을(Eq.3-6) 사용하여 전극의 측정 정확도를 평가하였다. 또한 마찬가지로 제작된 전극은 나트륨 성분 모니터링을 위해 Table 3.9의 검량식을 이용하였다.

$$\% \bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{Y-X}{X} \right)_j \times 100 \quad \text{Eq. (3-6)}$$

여기서

j: j번째 지시값, n: 측정횟수

X: 기준시험법 측정값, Y: 시험방법 측정값

Table 3.9 Regression equation used for Na ion concentration measurement

Ion	Regression Equation	R <sup>2</sup>
Na	Y = 0.0255log X + 0.9802	0.98



Figure 3.12 Na ion monitoring system applied to cherry tomato growing site

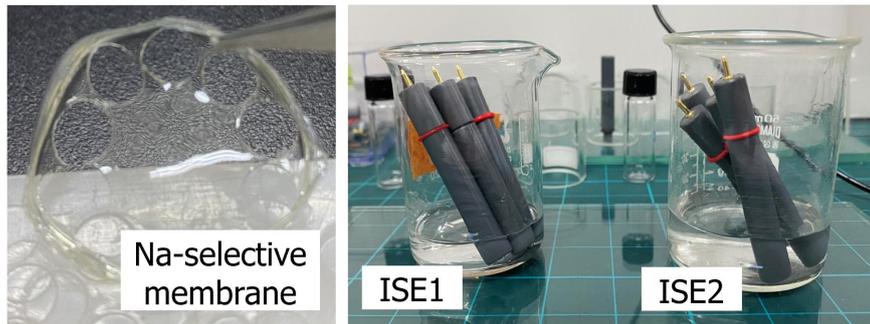


Figure 3.13 Sodium selective membrane (left), and lab-made sodium ion-selective electrodes (right)

### 3.5.4 나트륨 이온 측정 대응 및 모니터링을 위한 데이터베이스, SMS 및 온라인 웹 적용

나트륨 이온 측정 대응을 위하여 앞서 3.4.2에서 제시한 상추 순환식 수경재배 실험에서 양액 혼합 탱크에 임의로 나트륨을 타 순환하는 배액에 나트륨이 쌓일 수 있도록 실험을 구성하였다. 배액 샘플은 Fig. 3.8에 구성한 아크릴 챔버에 연동펌프를 사용하여 샘플링 되었으며 3개의 Na 이온 선택성 전극을 가지고 현재 농도를 예측하였다. 배액 내 나트륨이 70mg/L를 초과하였을 시 배액을 방출하여 나트륨 농도가 떨어지는지 확인하였다. 나트륨 이온 측정에 즉각적으로 대응할 수 있는 방안으로 사용자를 위한 온라인 웹 모니터링 구성과 SMS 메시지 서비스 그리고 데이터베이스를 적용하였다. 온라인 모니터링으로는 이온 모니터링 장치를 사물인터넷으로 구현 할 수 있는 node-red라는 프로그램을 이용하여 실시간 모니터링 온라인 웹을 구성하였으며 SMS 메시지 서비스로는 pushbullet이라는 앱을 사용하여 SMS기능을 구현하였다. 마지막으로 데이터베이스로는 PostgreSQL을 사용하였다.

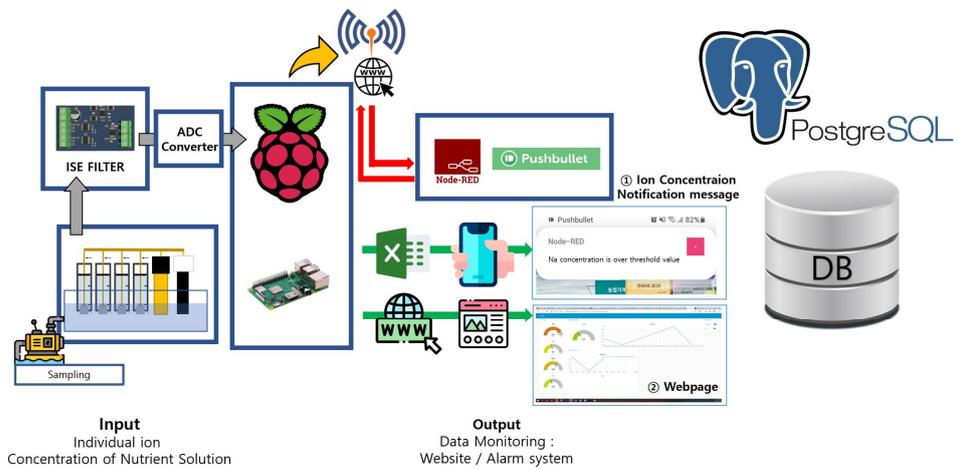


Figure 3.14 Block diagram of sodium accumulation monitoring system

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템 검증

#### 4.1.1 Stepwise management test 결과

다원수 이온 기반 양액 관리 시스템의 단계별 양액 관리 성능은 Fig. 4.1 그리고 Fig. 4.2와 같다. Fig. 4.1은 잔존 양액, 배액 그리고 원수까지 총 세 가지의 용액을 혼합하여 다원수 양액 관리 알고리즘을 동작한 염 보충 결과를 나타내며 Fig. 4.2의 그래프는 가용 용수를 하나 더 추가하여(Fig. 3.9) 네가지 용액을 혼합하여 원하는 이온 농도를 가진 양액을 만드는 작업을 수행한 결과를 보여준다. 각 용수의 이온 농도를 측정하는데 앞서 제시한 이온 선택성 전극이 사용되었고 앞서 제시한 다원수 양액 관리 플로우 차트와 제어 수식을 토대로 시스템이 자동으로 양액을 제작하였다.

각 단계별 양액을 샘플링하여 수질 분석기관에 분석을 맡기고 분석 결과를 참값으로 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 실험을 한 결과는 다음과 같다. 1) 3가지 용액 혼합 : Fig. 4.1의 전체 단계별 목표값과 서울대 농생명과학공동기기원의 수질 분석값을 평균 제공근 오차로 비교한 결과 다원수 이온 기반 양액 관리 시스템의 보충 성능은  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  순으로 높게 나타났으며 각각 RMSE 12.2mg/L, 23.2mg/L, 31.0mg/L로 준수한 결과를 나타냈다.

마찬가지로 가용 용수를 추가하여 진행한 시스템의 보충 성능(Fig. 4.2)은 전체 단계별 목표값과 측정값을 평균 제공근 오차로 계산하여 산출하였고  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  각각 RMSE 21.86mg/L, 24.77mg/L, 14.64mg/L로 상대적으로 준수한 결과를 보였다. 전자의 경우 Ca와 K의 보충 성능이 다소 높았으며  $\text{NO}_3^-$ 는 후자가 더 좋은 결

과를 보여주었다.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , 그리고  $\text{NO}_3^-$  순으로 양액 제조 결과가 좋은 이유는 예상대로 의사결정 나무에 기반한 염 주입 알고리즘이  $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$  순으로 목표 농도에 정확하게 염 주입을 할 수 있도록 제어했기 때문이다. 그러나 후자의 경우  $\text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$  순으로 잘 나왔는데 그 이유는 이온 선택성 전극이  $\text{Ca}^{2+}$ 를 높게 예측하면서  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 염을 다소 적게 주입하였고 이로 인해  $\text{NO}_3^-$ 에 끼치는 영향이 줄어든 것으로 판단된다.

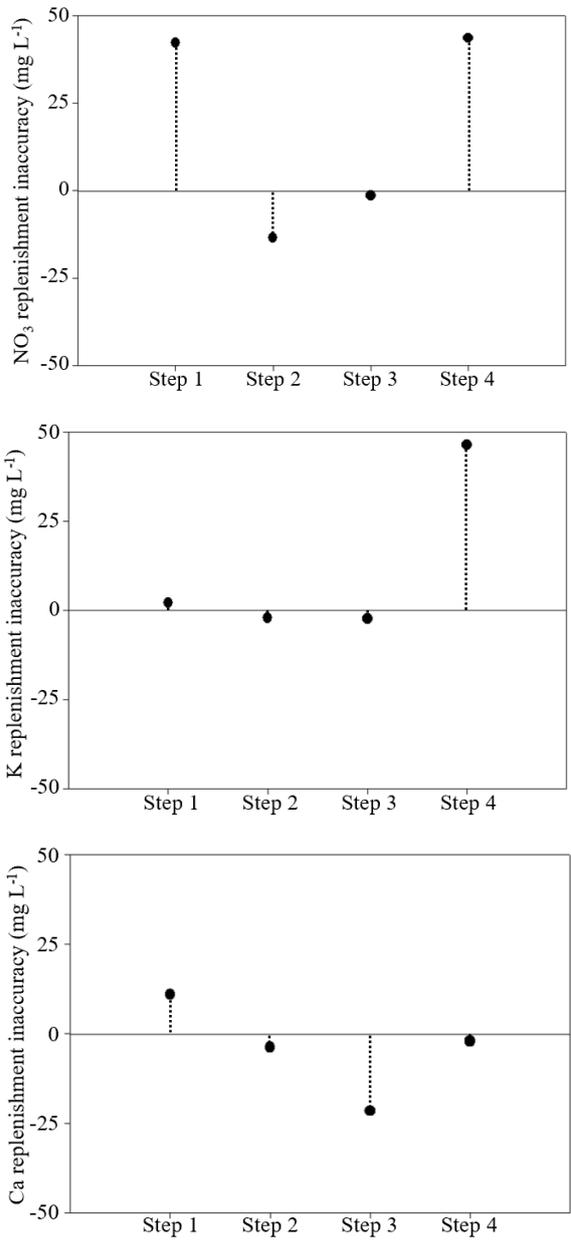


Figure 4.1 Stepwise management performance of the developed system: above graphs show the difference between target ion concentrations and actual concentrations obtained after mixing three different solutions

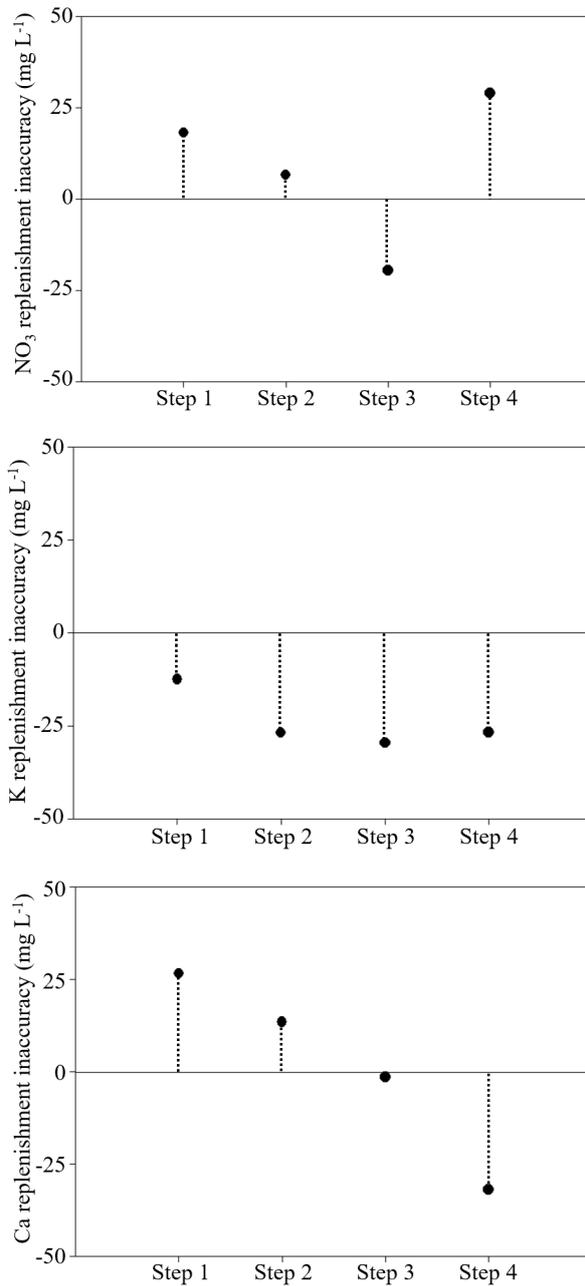


Figure 4.2 Stepwise management performance of the developed system: above graphs show the difference between target ion concentrations and ion concentrations measured by ISEs after mixing four different solutions

Table 4.1 Analysis of water sources used in stepwise test

Measurement	Units	Drainage Water	Water 1	Water 2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		231.2	22.6	10.3
K <sup>+</sup>	(mg·L <sup>-1</sup> )	59.0	9.1	3.2
Ca <sup>2+</sup>		65.4	23.9	23.5

물 보충을 위하여 사용한 배액과 원수의 수질 분석 결과는 Table 4.1에 제시되었다. 제작한 시스템이 다양한 원수의 수질을 고려한 양액 관리를 수행할 수 있는지 확인하였으며 Fig. 4.3은 단계별 양액 관리 실험 시 이온 선택성 전극으로 측정된 각 용수 내 이온 농도와 표준 분석 기기의 측정값을 1:1 대조한 결과이다. 3가지 종류의 이온 선택성 전극 모두 1에 근접한 기울기를 보였으며 결정계수가 0.92 이상으로 높은 선형성이 확인되었다. 측정 범위 내 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 이온 선택성 전극의 평균 제곱근 오차는 각각 RMSE 43.6mg/L, 11.5mg/L, 11.1mg/L로 높은 측정 정확도를 나타냈으며 이온 선택성 전극의 다원수 양액 제어 적용이 가능함을 확인하였다.

Table 4.2 Amounts of each stock solution injected by decision-tree method for the first stepwise management test

Step	Injected salts (mg)							Sub-Total
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> • 4H <sub>2</sub> O	KNO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub> • 7H <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
1 <sup>st</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2 <sup>nd</sup>	0.0	2068.0	0.6	0.0	1102.2	0.0	0.0	3170.2
3 <sup>rd</sup>	404.2	795.3	613.6	0.0	29.9	377.3	0.0	2220.3
4 <sup>th</sup>	5788.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5614.3	4217.8	15620.4
Sub- Total	6192.5	2863.3	613.6	0.0	1132.1	5991.6	4217.8	
Overall Total	Total salts injected: 21010.9(mg) = 21.011 gram							

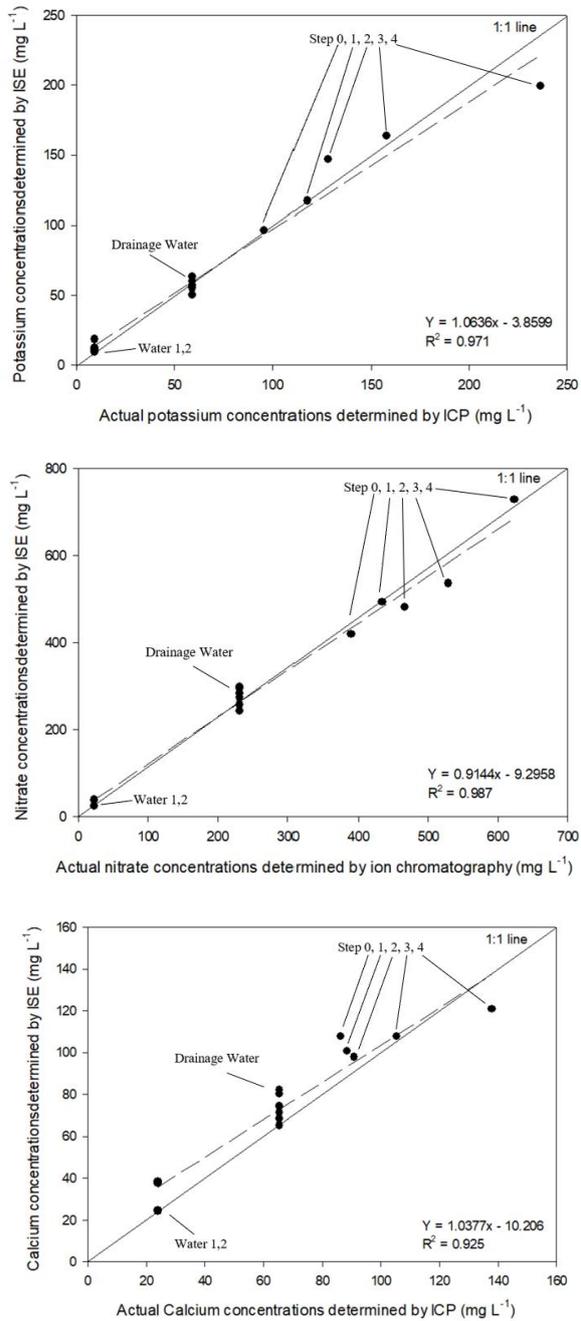
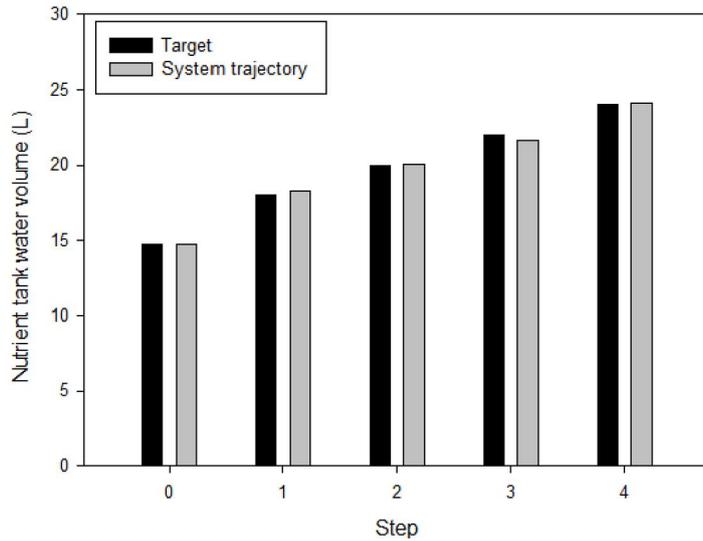


Figure 4.3 Linear relationship between ion concentration determined by standard analyzers and ISEs



4.4 Water replenishment performance of stepwise management test mixing three different sources, target vs. water flow sensor value

Figure 4.4는 3가지 용액을 혼합한 첫 번째 실험에서 물 높이 측정 센서가 측정한 양액 부피와 목표 양액 부피의 결과를 비교한 그래프이다. 제조된 양액 내 각 성분의 농도가 정확하려면 물 보충 또한 정확하게 수행되어야 하며 오차가 커질수록 양액 관리 성능이 떨어진다. 개발한 시스템에서의 물 보충 성능은 RMSE 0.214L로 나타났으며 4번 중 최소 물 보충 오차는 2단계에서 나타난 0.072L 그리고 최대 오차는 4단계에서 나타난 0.381을 얻었다. 물 보충 성능과  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , 그리고  $\text{Ca}^{2+}$ 의 보충 정확도를 비교하였을 때 물 보충 오차가 가장 적은 2단계에서  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , 그리고  $\text{Ca}^{2+}$ 의 합산 오차도 제일 적게 나타났으며, 물 보충 오차가 가장 큰 4단계에서 본 이온들의 합산 오차가 제일 크게 나타난 것으로 분석되었다.

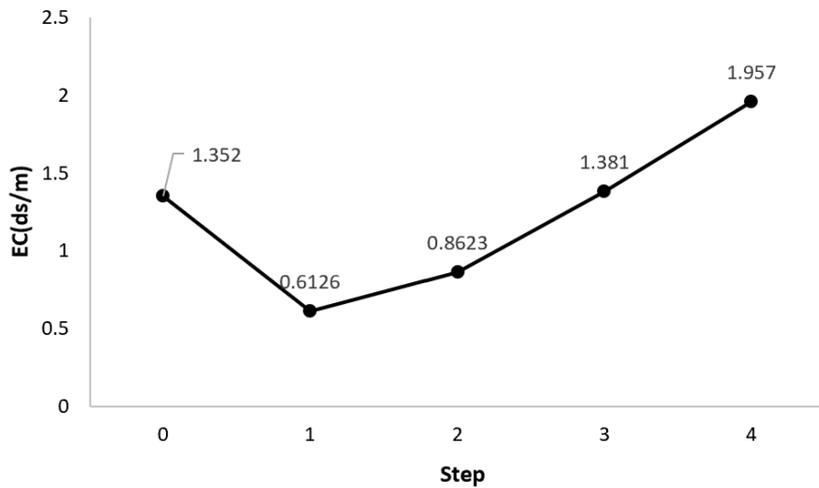


Figure 4.5 EC variations in the first stepwise management test determined by commercial EC sensor

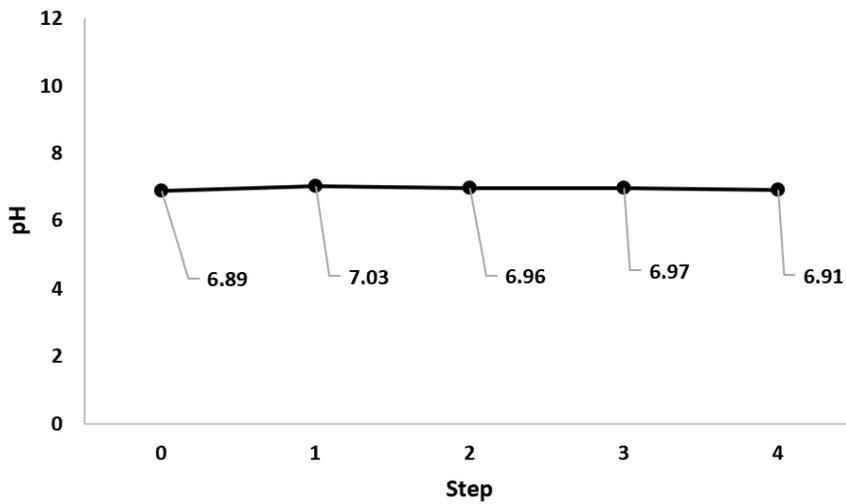


Figure 4.6 Changes in pH in the first stepwise management test determined by commercial pH sensor

## 4.1.2. 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 시스템의 장기 실험 결과

Fig. 4.7 그리고 Fig. 4.8는 2022년 4월 13일부터 4월 26일까지 실시한 상추 순환식 수경재배 실험에서의 양액 혼합 탱크, 배액 탱크, 그리고 보충수 탱크 내  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온의 변화와 여섯 이온의 보충량을 나타낸다. 각 용수의 성분 상태는 매일 오후 8시에 측정되었으며 양액 탱크의 수위가 10L 이하로 내려간 경우 Fig. 3.2의 양액 정밀 관리 동작이 수행되었다. 각 양액 혼합 탱크의 수위 저하로 인한 물 및 비료염 보충은 실험 2일 차, 4일 차, 6일 차, 9일 차, 11일 차 그리고 13일 차까지 총 여섯 번 수행되었고 보충할 다량 이온의 양은 현재 양액, 배액 그리고 원수의  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온 농도를 Eq.(3-2)에 대입하여 산출되었다.

실험 시작 4일 차, 7일 차 그리고 10일 차에는 원수 탱크의 물을 새로 채웠고 그 결과 보충수 성분의 변화가 관찰되었다(Fig. 4.8). 또한 실험 중 새로 유입되는 배액으로 인해 배액 탱크 내 양분 성분의 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4.9). 비료염을 고정 비율로 주입 시키는 EC 제어 방식과는 달리 본 시스템은 재배기간 동안 순환하는 양액과 양액 제조에 사용하는 용수들의 양분 변화를 고려하여 상황에 맞는 염을 주입시켰다(Fig. 4.7). 이로써 개발한 다원수 이온 기반 양액 관리 알고리즘이 양액 제조에 사용하는 용수들의 양분 변화를 고려하여 개별 염을 가변적으로 주입할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 4.7은 2주간의 재배기간 동안 표준분석기로 측정한 양액 탱크 내 양분 변화를 보여준다. 이온별 목표값과 실제 값을 평균 제공근 오차로 비교 분석한 결과 다원수 이온 기반 양액 관리 시스템의 장기 실험 성능은  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  각각 RMSE 60.6mg/L, 21.0mg/L, 9.86mg/L으로 나타났다. 2일 차와 6일 차의 양액 보충 과정에서 질산염과 칼륨의 농도가 높아지는 현상이 있었으나 추후 보충을 통해 질산염의 값이 안정화되는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 장기 이온

관리 결과에서도  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , 그리고  $\text{NO}_3^-$  순으로 양액 제조 결과가 좋았는데 예상대로 의사결정 나무에 기반한 염 주입 알고리즘이  $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$  순으로 목표 농도에 정확하게 염 주입을 할 수 있도록 제어가 되었기 때문이다.

결론적으로 다원수 이온 기반 양액 관리 알고리즘은 순환하는 양액, 배액 및 보충수가 함유한  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온의 농도를 이온 선택성 전극으로 측정하고 부족한 염만 보충하여 각 이온의 농도를 목표값에 근접하게 유지할 수 있는 것으로 판단된다.

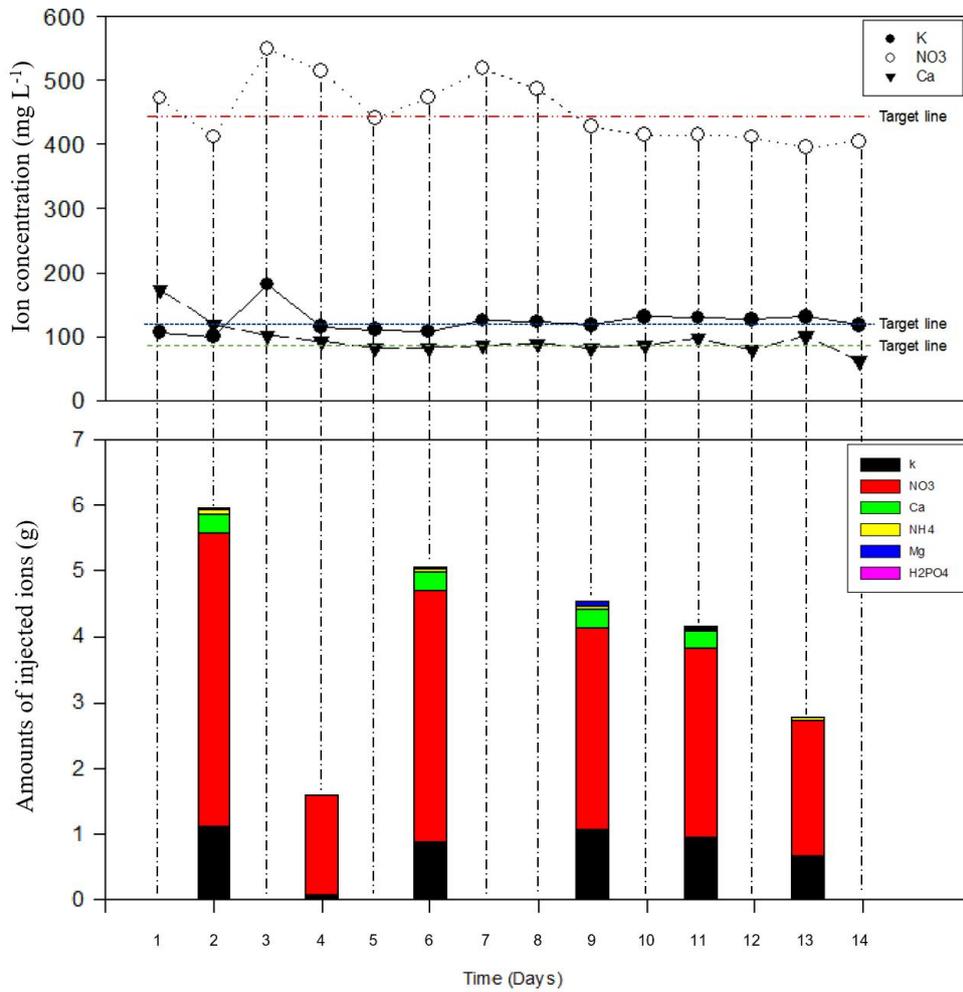


Figure 4.7 Variations in ion concentration of mixing tank analyzed with ion chromatography (top), and the required amounts of six ions to be replenished (bottom)

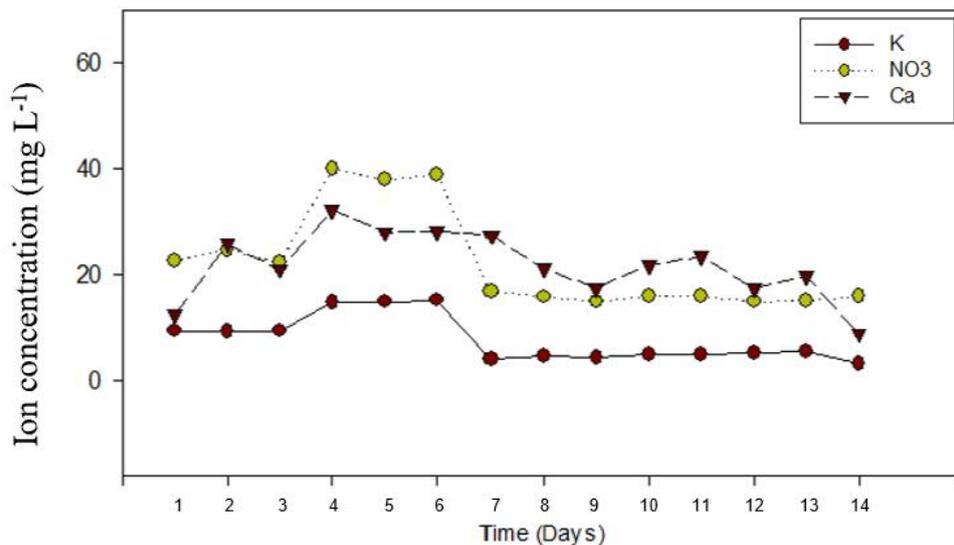


Figure 4.8 Changes in ion concentration of add-up water measured using ISEs array

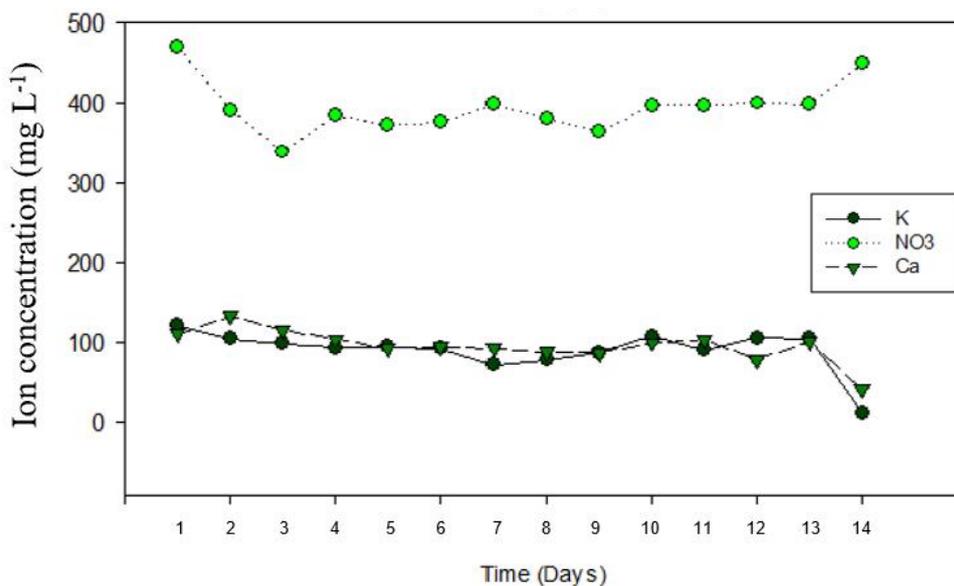


Figure 4.9 Changes in ion concentration drainage solution measured using ISEs array

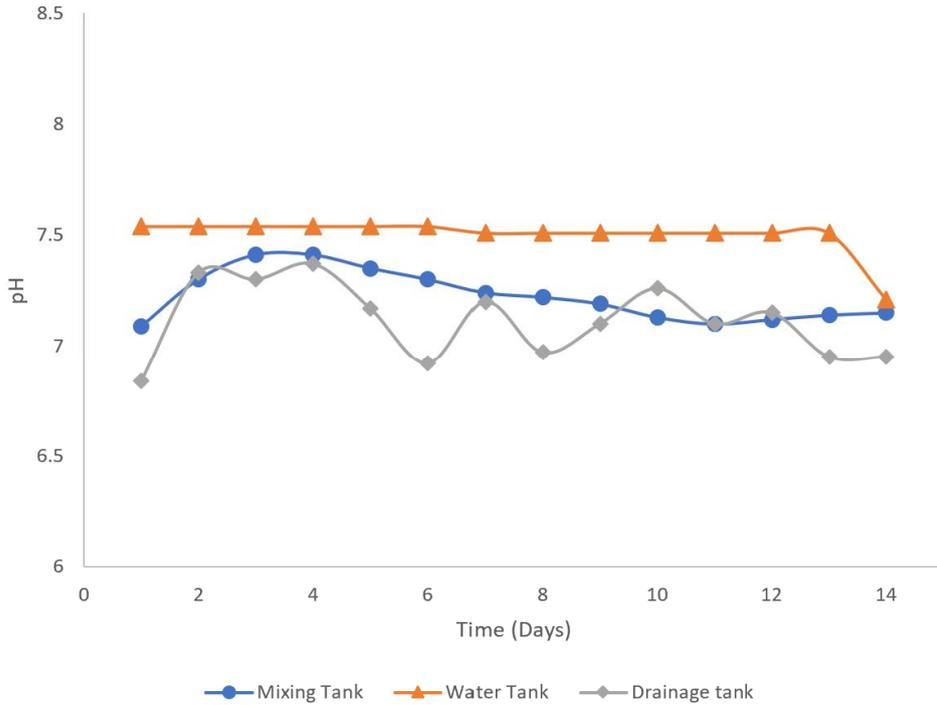


Figure 4.10 Changes in pH in the long-term lettuce growing test determined by commercial pH sensor

Fig. 4.10은 재배실험 중 pH변화를 보여준다. 재배기간 중 pH는 7.09~7.41 범위에서 변화하였으며 다원수 이온 기반 양액 관리 시스템으로 인한 pH 1이상의 큰 변동은 나타나지 않았다. 일반적으로 상추는 6.0 내외의 pH에서 잘 자라며 상추 재배 시 pH 농도는 4.0~8.0 사이에 있어야 한다. 제작한 알고리즘은 pH를 제어하는 알고리즘이 구성되어 있지 않지만 pH를 조절할 수 있는 알고리즘을 추가한다면 pH 제어 또한 가능할 것으로 판단된다.

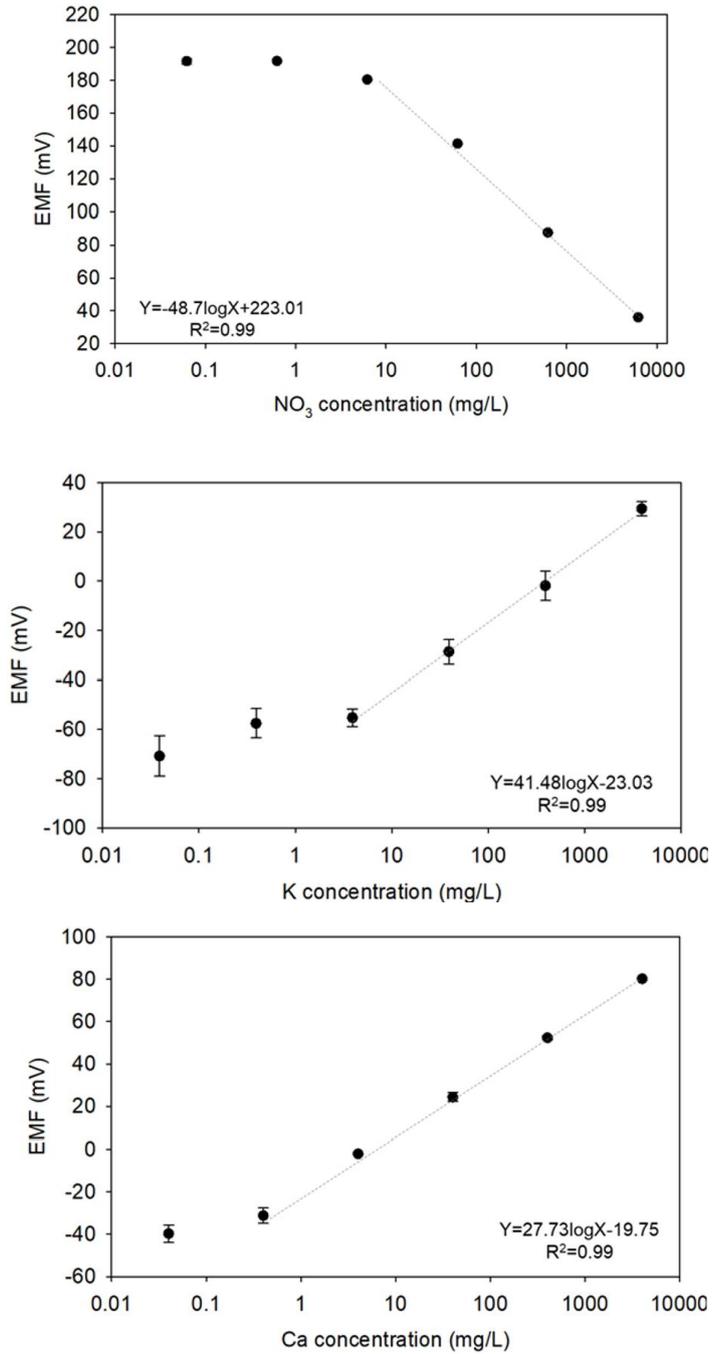


Figure 4.11 Relationship curve between nutrient solution ion determined by ISE and standard analysis

### 4.1.3 다원수 이온 기반 양액 시스템 이용 토마토 순환식 수경재배 현장 실험 결과

(주)과학기술분석센터의 양액제어기(Fig 3.11)에 탑재하여 다원수 이온 기반 양액 관리 실험을 한 결과는 Fig. 4.12와 같다. Fig. 4.12는 잔존 양액, 배액, 우수, 농장의 수도에서 나오는 원수까지 총 네 가지의 용액을 혼합하여 다원수 양액 관리 알고리즘을 동작한 염 보충 결과를 나타낸다. 각 용수의 이온 농도를 측정하는데 앞서 제시한 이온 선택성 전극이 사용되었고 다원수 양액 관리 플로우 차트와 제어 수식을 토대로 시스템이 자동으로 양액을 제작하였다.

각 단계별 양액을 샘플링하여 수질 분석기관에 분석을 맡기고 분석 결과를 참값으로 다원수 이온 기반 양액 정밀 관리 실험을 한 결과는 다음과 같다. Fig. 4.12의 전체 단계별 목푼값과 서울대 농생명과학 공동기기원의 수질 분석값을 평균 제곱근 오차로 비교한 결과 다원수 이온 기반 양액 관리 시스템의 보충 성능은  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  순으로 높게 나타났으며 각각 RMSE 22.6mg/L, 37.5mg/L, 58.75mg/L로 나타났다. 본 결과는 앞서 4.1.1에서 도출한 결과보다 성능면의 저하가 나타났는데 이는 4.1.1 실험에 사용한 요인 실험 장치가 (주)과학기술분석센터에서 제작한 양액제어기 보다 고사양의 정밀 펌프를 사용했기 때문이라고 사료된다.

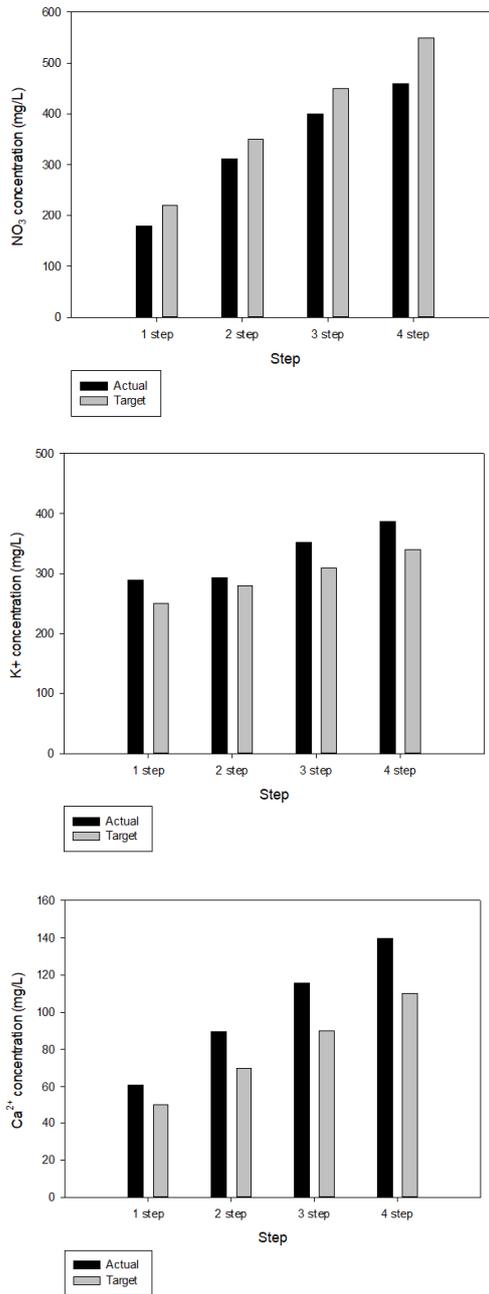


Figure 4.12 Stepwise management performance done using nutrient management system developed by ScienceLab Corporation.

## 4.2 나트륨 이온 모니터링 및 나트륨 관리 기술 개발

### 4.2.1 Na 전극의 표준용액 정량측정 성능 평가 결과

두 가지의 다른 제작법(Table 3.6)으로 만들어진 각각의 나트륨 이온 선택성 전극을 이용하여 Table 3.7에 제시된 6가지의 나트륨 농도를 예측하는 실험을 진행한 결과 각 전극의 나트륨 측정 정확도는 Table 4.3와 같이 나타났다. 본 결과는 서울대학교 농업생명과학공동기 기원(NICEM)에서 ICP 분석을 통해 얻은 나트륨 농도를 바탕으로 제작한 나트륨 이온 선택성 전극의 측정 농도와 1:1 분석을 통해 이루어졌다.

Table 4.3 Sodium ion-selective electrodes performance test results

mg/L	Na <sup>+</sup> ISE1 Measurement	RMSE(%)	Na <sup>+</sup> ISE2 Measurement	RMSE(%)
6.1	6.3 ± 1.7	48.4	6.1 ± 0.1	3.8
15.9	15.7 ± 1.1	12.4	15.1 ± 0.5	11.4
100.3	103.9 ± 1.9	6.9	106.0 ± 1.2	10.1
280.0	286.0 ± 7.2	5.7	290.3 ± 3.4	6.6
547.1	559.8 ± 10.0	5.1	559.5 ± 8.1	4.7
1835.0	1834.1 ± 179.4	16.9	1808.1 ± 82.7	8.2

실험 결과 2번 조성의 나트륨 이온 선택성 전극의 성능이 1번 조성의 나트륨 전극보다 좋은 것으로 판단되었다. 2번 나트륨 전극의 경우 6개의 다른 농도에서 전체적으로 우수한 상대 정확도를 보였으며 충분한 적용성이 있다고 판단되었다. 2번 전극의 측정 성능 실험의 결과는 Fig. 4.13와 같으며, 수질 분석기관의 결과와 비교하였을 때 결정계수가 0.99로 높은 상관관계를 갖는 회귀식을 얻을 수 있었다.

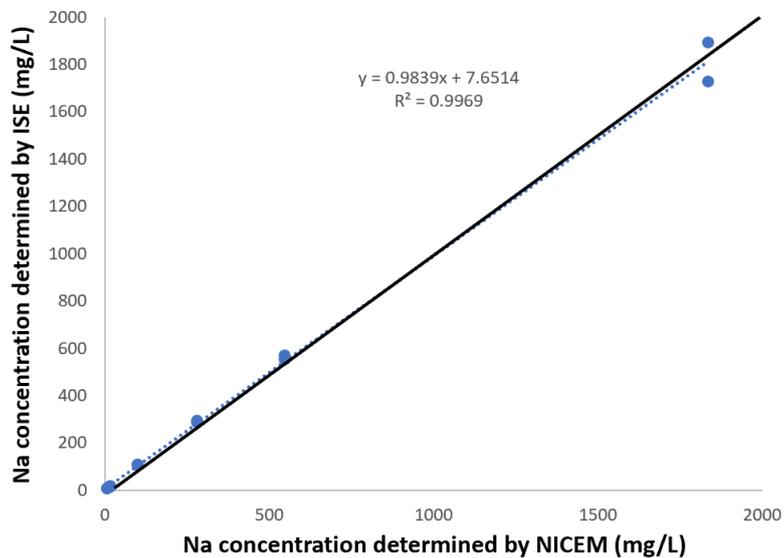


Figure 4.13 Sodium concentration determined by standard analysis vs. lab made sodium ion-selective electrode

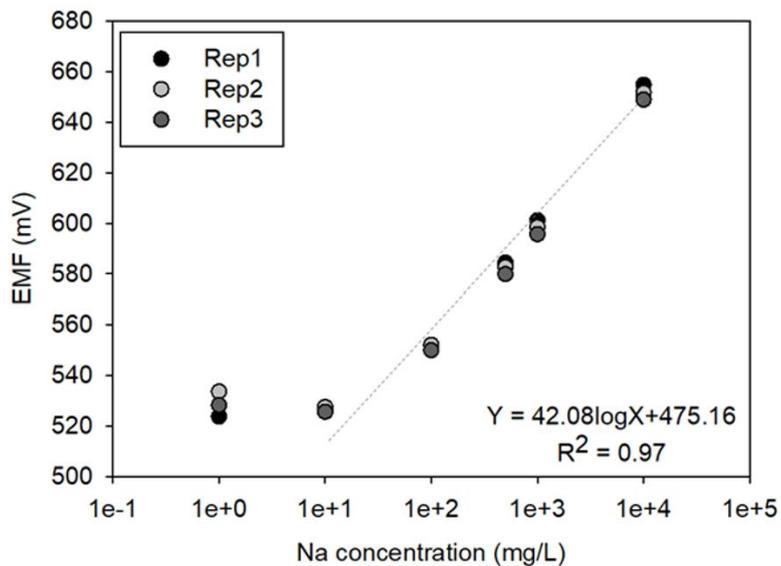


Figure 4.14 Calibrating plot for relating sodium electrode response to sodium concentration

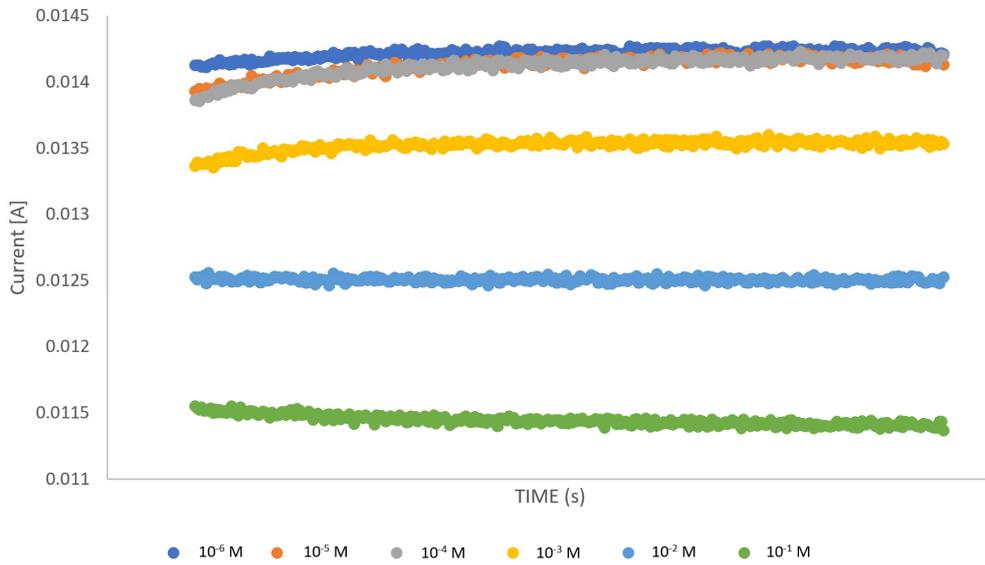


Figure 4.15 Response of sodium electrode to different sodium concentration measured for 1 minute

## 4.2.2 나트륨 이온 선택성 전극 양액 적용성 평가

Fig. 4.16는 16일간의 방울 토마토 재배실험에서 얻은 양액을 실시간으로 측정하여 2개의 나트륨 전극을 통해 나트륨 농도를 측정한 결과 그래프이다. 재배 기간 중 양액은 1일 1회 간격으로 샘플링을 수행하였으며 수질 분석 의뢰하여 표준분석 결과값과 두 개의 나트륨 전극의 예측 결과를 비교 하였다. 이때 Eq.3-6을 사용하여 전극의 측정 성능의 평가한 결과 나트륨 전극은 각각 18.59%와 16.00%의 측정 오차를 보였다. 16일차에서 2번 나트륨 전극이 측정 실패로 인해 오차가 크게 발생하여 오차율이 상승하였다.

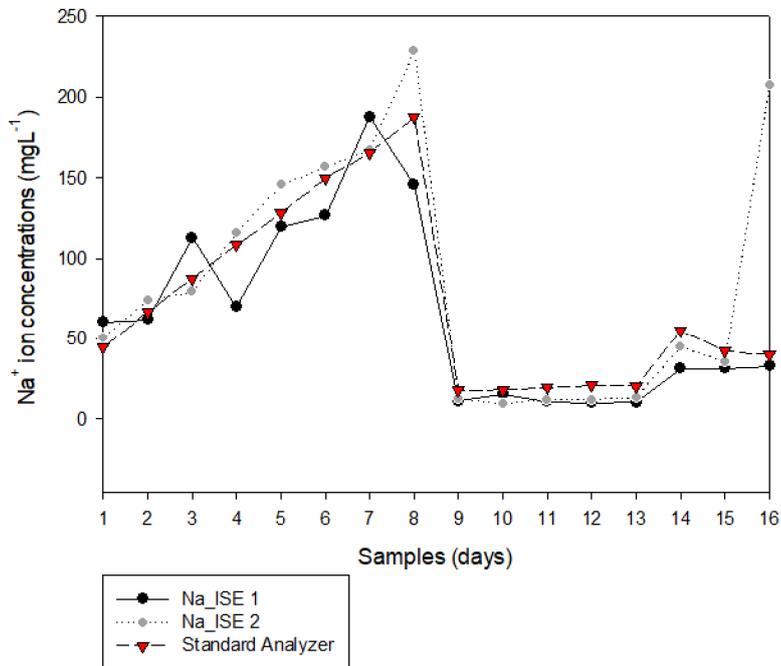


Figure 4.16 Sodium concentration determined by standard analyzer vs. lab made sodium ion-selective electrode

나트륨 전극에 의해 같은 1가 양이온인 칼륨(K) 전극과 간섭이 생길 것이라 염려되었으나 염려와는 다르게 칼륨을 포함한 주요 이온 전극들도 전체적으로 우수한 상대 정확도를 보여주었다(Fig. 4.17). K<sup>+</sup> 전극은 각각 9.69%와 29.45%의 측정 오차율을 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 각각 11.27%와 4.00% 그리고 Ca는 1.93%의 측정 오차를 보였다. Table 4.4는 Kim(2022)에서 수행한 본 나트륨 전극의 선택성 결과를 보여준다. 제작한 1번 나트륨 전극에 간섭 영향은 K<sup>+</sup>가 가장 컸고, 다음으로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, 그리고 Mg<sup>2+</sup>의 영향이 가장 적었다.

Table 4.4 Lab-made sodium ISE selectivity coefficient of interfering ions

	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
logK <sup>pot</sup>	-3.94	-2.61	-4.13	-3.43

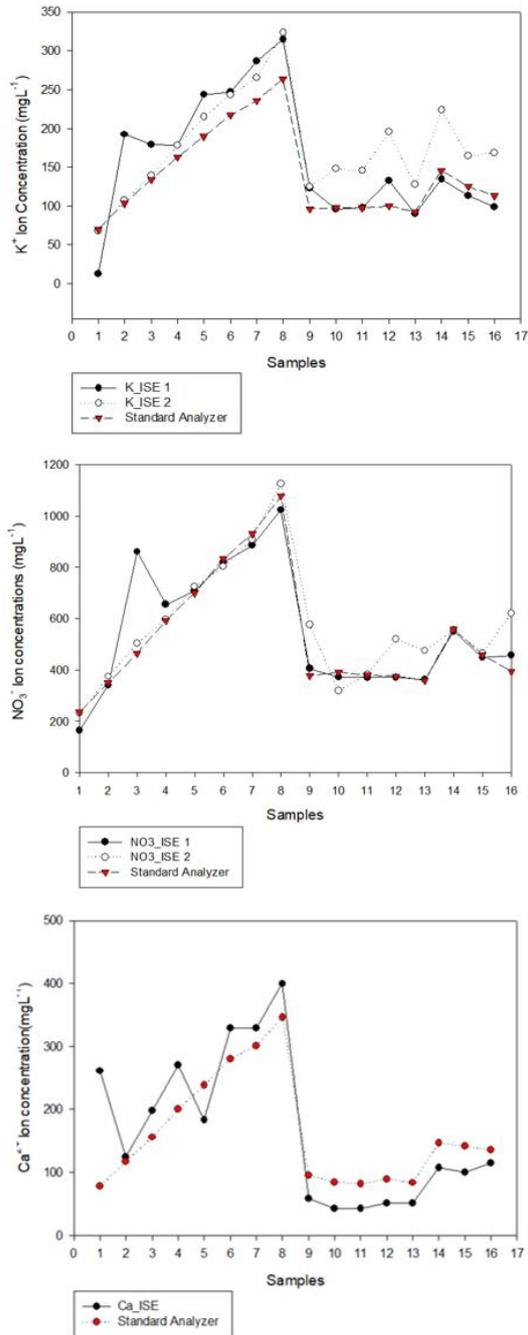


Figure 4.17 Ion concentration determined by standard analyzer vs. lab made NO<sub>3</sub>, K, and Ca ion-selective electrodes

### 4.2.3 나트륨 이온 축적 대응 및 모니터링을 위한 데이터베이스, SMS 및 온라인 웹 적용

Fig. 4.18은 배액 내 나트륨 농도의 변화를 보여준다. 임의로 NaCl이 타진 양액을 작물에게 주어 나트륨이 거의 흡수 되지 않고 쌓일 수 있는 환경을 만든 결과 실험 시작 7일차에 배액 내 나트륨 농도가 70mg/L을 초과하였다. 네덜란드에서는 Besluit Glastuinbouw (2002) 법령에 따라 상추 순환식 수경재배 시 나트륨 농도가 5mmol/L 이상이면 배액을 방출하게 하였고 이를 바탕으로 방출 농도 70mg/L를 선정하였다. 나트륨 농도가 70mg/L를 초과하면 이에 따라 배액 탱크를 수동으로 비워배액을 방출하였고 새로 유입된 배액 내 나트륨 농도는 낮아진 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 수집된 나트륨 농도는 Node-RED를 사용하여 인터넷 모니터링 환경을 구성하여 실시간으로 재배자가 나트륨 수치를 확인할 수 있게 하였다(Fig. 4.17). 또한 Pushbullet 어플리케이션을 사용하여 배액 내 나트륨 측정 후 사용자에게 SMS 알람을 보내고 나트륨 농도가 한계치를 넘을 경우 사용자에게 경고 알람을 보내는 기능을 Fig. 4.19과 같이 구현하였다. 마지막으로 수집된 나트륨 농도를 제어기의 저장공간과, 데이터베이스에 저장하여 데이터의 변화를 확인할 수 있게 시스템을 구성하였다.

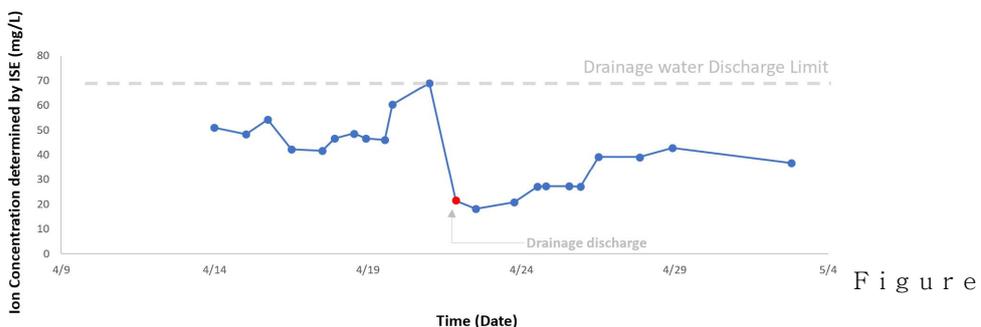


Figure 4.18 Sodium concentration determined by standard analysis vs. lab made sodium ion-selective electrode

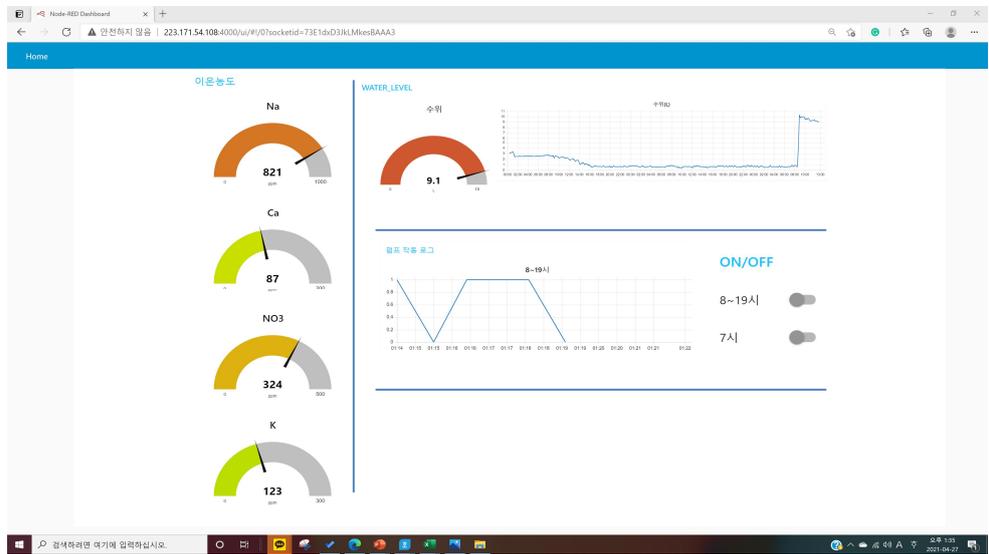
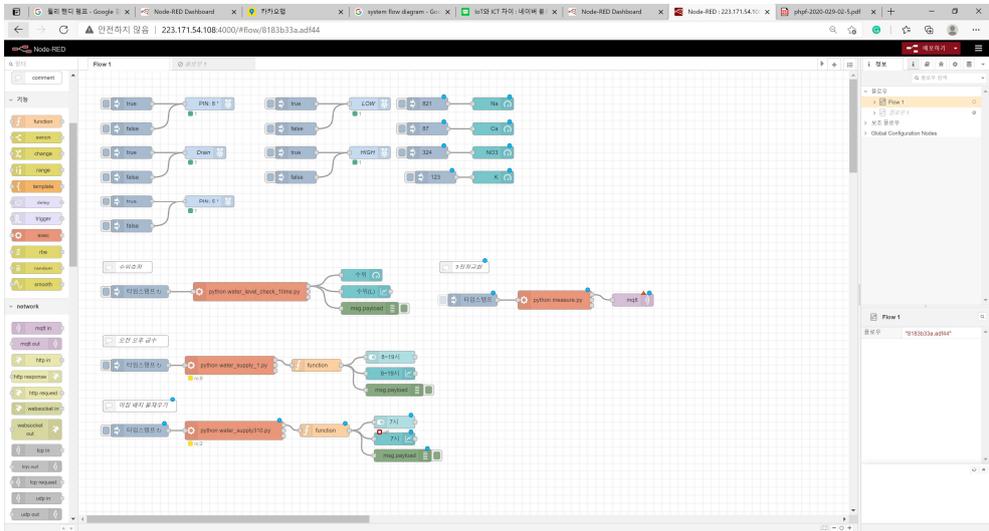


Figure 4.19 Sodium concentration online monitoring website developed using Node-Red

Node-RED를 이용하여 모니터링 기능을 만드는 방법은 다음과 같다. 1) 라즈베리파이에 Node-Red를 설치. 커맨드창 → sudo apt-get update → sudo apt-get upgrade → sudo apt install build-essential git curl → bash <(curl -sL https://raw.githubusercontent.com/node-red/linux-installers/master/deb/update-nodejs-and-nodered)

2) Node-RED 시작. 커맨드창 → node-red start

3) Exec 노드를 사용하여 이온 모니터링을 하는 파이썬 코드 실행

4) Exec 노드의 출력 부분을 그래프, 게이지바 같은 UI 노드에 연결

5) 라즈베리파이에 할당된 ip주소 ex. 192.168.0.1:1880/ui로 접속하여 실시간 온라인 모니터링 가능

6) 라우터의 파워포워딩 기능을 사용하면 외부 ip에서도 본 웹 사이트로 연결 가능

Node-RED와 Pushbullet 어플리케이션을 이용하여 실시간 알림 메시지를 보내는 방법은 다음과 같다.

1) 라즈베리파이에 Node-RED 설치

2) Node-RED 시작

3) Node-RED에 pushbullet 설치 (option → app설치창 pushbullet 검색)

4) 휴대폰에 pushbullet 어플리케이션 설치

5) 위 4)번의 Exec 노드의 끝에 pushbullet연결, pushbullet아이디 비번 로그인

6) Exec 노드를 사용하여 이온 모니터링을 하는 파이썬 코드 실행하면 핸드폰으로 실시간 결과 전달

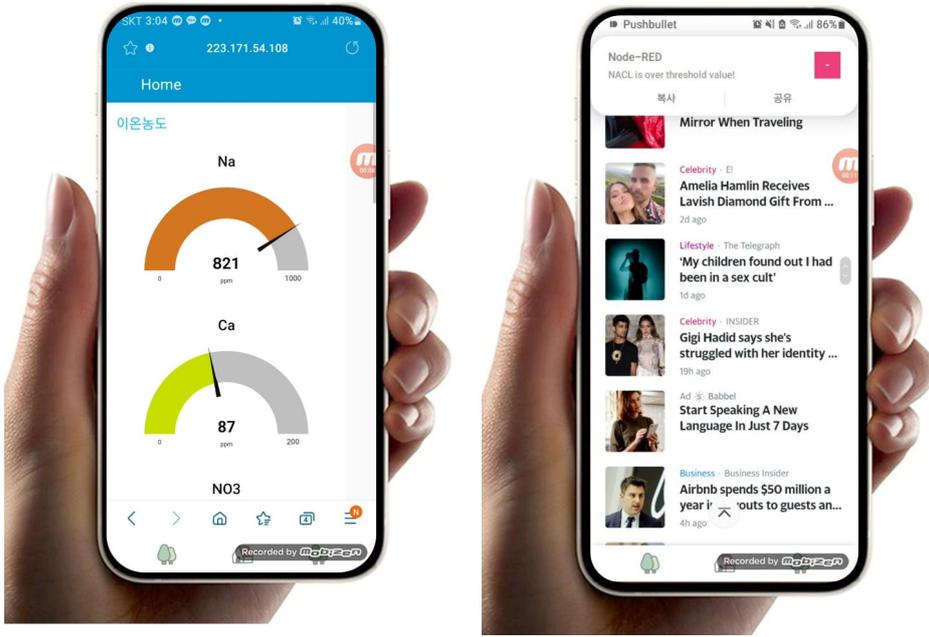


Figure 4.20 Sodium concentration warning alarm system using Pushbullet

Table 4.5 Data format saved in big data platform

Date	ISE	LOW (EMF)	NUT (EMF)	HIGH (EMF)	mg/L (Predicted Value)	Ratio	Offset	Compensation
8/4 11:40	Ca	1.804	1.772	1.757	112.978	0.756	0.256	1.595
8/4 11:40	NO <sub>3</sub>	1.745	1.902	1.925	422.482	-0.347	1.391	0.732
8/4 11:40	K	1.442	1.438	1.337	180.892	0.651	0.163	1.099
8/4 11:40	Na	1.938	1.877	1.816	41.955	-0.202	1.4	1.022

## 5. 요약 및 결론

본 연구는 다양한 용수를 사용하는 순환식 수경재배 조건에서 이온선택성 전극을 사용한 양액 정밀 제어 방법을 구명하고 배액 내 나트륨 이온 모니터링 및 관리 기술을 개발하기 위해 실시되었다.

첫째, 이온 기반 다원수 양액 관리는 양액 제조를 위해 사용하는 다양한 용수들의 양분 농도를 특정할 수 있다면 작물 재배에 최적화된 양액을 효과적으로 제조할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사용되는 농업용수의 성분을 측정하고 원하는 이온 농도를 가진 양액을 제조할 수 있는 다원수 순환식 수경재배 관비 제어 알고리즘을 개발하였고 6개의 다량원소 중  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , 그리고  $\text{Ca}^{2+}$  이온의 양액 내 농도 제어 성능을 평가하였다. 본 알고리즘의 성능평가를 위해 양액의 목표 이온 농도를 임의로 바꾸가며 단계별 양액 제조 성능을 평가하였고 목표 수준에 준하여 양액을 제조하는 것을 확인하였다. 그 후 실시한 14일간의 상추 재배실험에서도  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  각각 RMSE 60.6mg/L, RMSE 21.0mg/L, RMSE 9.86mg/L의 평균 제공근 오차의 성능을 보이며 양액을 관리할 수 있는 것을 확인하였다. 아직 특정하지 못하는 이온들을 검출할 수 있는 센서와 장비 개발에 관한 연구가 추가로 수행된다면 본 연구에서 제시한 수식들을 사용하여 나머지 이온에 대한 농도제어가 가능하리라 판단된다. 더 나아가 현재 2개 이상의 이온이 커플링된 비료염의 사용이 보충 정확도를 저해시키고 있으나 독립적인 이온 형태로 존재하는 새로운 비료염들의 개발이 각 이온의 염 보충 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 순환식 수경재배에서 나트륨이 순환하는 양액에 누적되는 것을 최소화하기 위한 나트륨 축적 관리 기술을 개발하였다. 나트륨 외에도 양액 내 유해 물질의 축적은 작물의 생육에 악영향을 미치며 이때는 화학적, 그리고 생물학적인 방법으로 유해성분을 제거하거나 양액을 일부 방출하여 유해 성분이 축적되는 것을 방지할 수 있다. 본 연구에서는 직접 제작한 나트륨 이온 선택성 전극으로 양액 내 나트륨 성분을 모니터링하는 연구를 수행하였으며 6.1~1835mg/L까지 6가지의 다른 나트륨 농도를 가진 용액의 나트륨 농도를 예측하는 실험을 진행한 결과

제작한 나트륨 전극의 높은 측정 정확도를 확인할 수 있었다. 그 후 상추 순환식 수경재배 실험에 나트륨 모니터링 장치를 적용하여 나트륨 전극의 양액 적용성을 확인하였고 사용자 편의를 위한 실시간 모니터링 웹 사이트와 SMS 알람기능 그리고 데이터베이스 기능을 구현함으로 나트륨 추적 대응을 위한 인터페이스를 마련하였다.

## 참 고 문 헌

1. 손정익. 1998. 양액의 정밀 제어 및 이온의 EC 기여도 분석. 원예과학기술지 16 (3):352-354.
2. Bamsey, M., Graham, T., Thompson, C., Berinstain, A., Scott, A., & Dixon, M. (2012). Ion-specific nutrient management in closed systems: the necessity for ion-selective sensors in terrestrial and space-based agriculture and water management systems. *Sensors*, 12(10), 13349-13392.
3. Bar-Yosef, B. (2008). Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses. *Soilless Culture: Theory and Practice*, 343-424.
4. Bauder, T. A., Waskom, R. M., Sutherland, P. L., Davis, J. G., Follett, R. H., & Soltanpour, P. N. (2011). Irrigation water quality criteria. *Service in Action*; No. 0.506.
5. Besluit Glastuinbouw, 2002. Regulation Greenhouse Horticulture. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0013430/2012-01-01>.
6. Cadogan, A., Gao, Z., Lewenstam, A., Ivaska, A., & Diamond, D. (1992). All-solid-state sodium-selective electrode based on a calixarene ionophore in a poly (vinyl chloride) membrane with a polypyrrole solid contact. *Analytical Chemistry*, 64(21), 2496-2501.
7. Cho, W. J., Kim, H.-J., Jung, D. H., Kang, C. I., Choi, G.-L., & Son, J.-E. (2017). An embedded system for automated hydroponic nutrient solution management. *Transactions of the ASABE*, 60(4), 1083-1096.
8. Cho, W. J. (2020). Precision Hydroponic Nutrient Solution Management System based on Ion-Specific and Crop Growth Sensing, a dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy.

9. Craggs, A., Moody, G. J., & Thomas, J. D. R. (1974). PVC matrix membrane ion-selective electrodes. Construction and laboratory experiments. *Journal of Chemical Education*, 51(8), 541.
10. De Pascale, S., Incrocci, L., Daniele, M., Youssef, R., & Pardossi, A. (2019). Advances in irrigation management in greenhouse cultivation.
11. Gieling, T. H., Van Straten, G., Janssen, H. J. J., & Wouters, H. (2005). ISE and chemfet sensors in greenhouse cultivation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 105(1), 74-80.
12. Gutierrez, M., Alegret, S., Caceres, R., Casadesus, J., Marfa, O., & Del Valle, M. (2007). Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 57(1), 12-22.
13. Hwang, H. J., Ryu, K. H., Cho, S. I., Kim, G. Y., & Lee, K. C. (1998). Development of an automatic nutrient-solution supply system using fuzzy control. *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery (Korea Republic)*.
14. Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California agricultural experiment station, 347(2nd edit).
15. Jung, D. H., Kim, H. J., Choi, G. L., Ahn, T. I., Son, J. E., & Sudduth, K. A. (2015). Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes. *Transactions of the ASABE*, 58(5), 1309-1319.
16. Kim, H. J., Hummel, J. W., & Birrell, S. J. (2006). Evaluation of nitrate and potassium ion-selective membranes for soil macronutrient sensing. *Transactions of the ASABE*, 49(3), 597-

606.

17. Kim, H. J., Kim, W. K., Roh, M. Y., Kang, C. I., Park, J. M., & Sudduth, K. A. (2013). Automated sensing of hydroponic macronutrients using a computer-controlled system with an array of ion-selective electrodes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 46-54.

18. Kim, H. J., Dong Wook Kim, Won Kyung Kim, Woo Jae Cho, and Chang Ik Kang. 2017. "PVC Membrane-Based Portable Ion Analyzer for Hydroponic and Water Monitoring." *Computers and Electronics in Agriculture* 140:374-85.

19. Kim, Y. H. 2022. "Development of Ion-Selective Electrode-based Na Ion Monitoring System in Nutrient Solution." Seoul National University, thesis for Bachelor's degree.

20. Lee, S. Y., & Kim, Y. C. (2019). Water treatment for closed hydroponic systems. *J. Korean Soc. Environ. Eng*, 41(9), 501-513.

21. Miller, A., Adhikari, R., & Nemali, K. (2020). Recycling nutrient solution can reduce growth due to nutrient deficiencies in hydroponic production. *Frontiers in Plant Science*, 11, 607643.

22. Savvas, D., and G. Manos. "Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems." *Journal of agricultural engineering research* 73.1 (1999): 29-33

23. Savvas, D., Passam, H. C., Olympios, C., Nasi, E., Moustaka, E., Mantzos, N., & Barouchas, P. (2006). Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. *HortScience*, 41(7), 1667-1673.

24. Sokalski T., A. Ceresa, M. Fibbioli, T. Zwickl, E. Bakker and E. Pretsch. (1999). Lowering the Detection Limit of Solvent

Polymeric Ion-Selective Membrane Electrodes. 2. Influence of Composition of Sample and Internal Electrolyte Solution. *Analytical Chemistry*, 7(6):1210-1214

25. Sonneveld, C., Voogt, W., & Spaans, L. (1997). A universal algorithm for calculation of nutrient solutions. *International Symposium on Growing Media and Hydroponics* 481, 331-340.

26. van der Salm, C., Voogt, W., Beerling, E., van Ruijven, J., & van Os, E. (2020). Minimising emissions to water bodies from NW European greenhouses; with focus on Dutch vegetable cultivation. *Agricultural Water Management*, 242, 106398.

Abstract

# Closed Hydroponic Nutrient Solution Management Using Multiple Water Sources

JooShin Kim

Department of Biosystems Engineering

The Graduate School

Seoul National Univer\_sity

A properly ion-balanced nutrient solution is vital for plant growth. However, when reusing a nutrient solution, the nutrient balance is likely to fluctuate and become unsuitable for irrigation. Furthermore, unwanted substances like sodium accumulation can be occurred. Ionic imbalance problems that cause plant growth disorders in nutrient solutions can be minimized if the nutrient concentration of the various water sources can be determined and considered when making the nutrient solution. Sodium accumulation can also be controlled if it is monitored in situ. In this study, a closed hydroponics nutrient management algorithm for multiple water sources was developed. And sodium ion monitoring system was implemented. To this end, a nutrient solution controller composed of

nitrogen, potassium, calcium, and sodium ion selective electrodes and 8 individual fertilizer stocks was constructed to grow crops in a closed hydroponic method. Performance tests were conducted by verifying the developed system's ability to maintain  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Ca}^{2+}$  ion concentrations at their target values and by monitoring sodium ion concentration at drainage water and discharging it at its critical concentration. As the results of this study, it was observed that  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Ca}^{2+}$  ion concentration of nutrient solution could be controlled when mixing multiple water sources and sodium ion concentration could be controlled by monitoring and discharging the drainage water.

**keywords : Nutriculture, Ion-specific nutrient solution management, Ion-selective electrodes, Precision nutrient solution supply, Sodium accumulation management**

***Student Number : 2021-20662***