

Research Article



CrossMark

Open Access

## 수경배양액 무기성분농도 측정장치 개발

허정욱<sup>1\*</sup>, 박경훈<sup>2</sup>, 홍승길<sup>3</sup>, 이재수<sup>1</sup>, 백정현<sup>1</sup>, 박종택<sup>4</sup>, 이승기<sup>5</sup>

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부, <sup>2</sup>농촌진흥청 감사담당관실,  
<sup>3</sup>농촌진흥청 기술협력국, <sup>4</sup>(주)티맥, <sup>5</sup>공주대학교 산업과학대학 생물산업공학부

### Equipment Development for Inorganic-Compound Concentration Measurement in a Hydroponic Culture Solution

Jeong-Wook Heo<sup>1\*</sup>, Kyeong-Hun Park<sup>2</sup>, Seung-Gil Hong<sup>3</sup>, Jae-Su Lee<sup>1</sup>, Jeong-Hyun Baek<sup>1</sup>, Jong-Taek Park<sup>4</sup> and Seung-Kee Lee<sup>5</sup> (<sup>1</sup>Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Rural Development of Administration, Jeonju 54875, Korea, <sup>2</sup>Audit and Inspection Office, Rural Development of Administration, Jeonju 54875, Korea, <sup>3</sup>Korea Program on International Agriculture, Rural Development of Administration, Jeonju 54875, Korea, <sup>4</sup>T-MAC, Yuseong-gu, Daejeon 34054, Korea, <sup>5</sup>Major in Bio-Mechanical Engineering, Kongju National University, Yesan-gun 32439, Korea)

Received: 26 October 2020/ Revised: 30 October 2020/ Accepted: 4 November 2020

Copyright © 2020 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Jeong-Wook Heo

<https://orcid.org/0000-0002-9968-7783>

### Abstract

**BACKGROUND:** Measurement equipment was developed for inorganic nutrient concentration inside the hydroponic culture medium with several macro- and micro compositions, and applied for measuring the compositions of conventional medium.

**METHODS AND RESULTS:** Before the equipment development, sonicator and heater were utilized to control temperature around of the module mixing with color reagents and target samples among the inorganic compositions. The measurement module and multi-sampler were also manufactured based on the COMS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) and installed inside the measurement equipment. Concentration of standard solution, value measured by the equipment, standard deviation or measured average value were used for estimating the accuracy and average recall of the equipment. Yamazaki solutions with EC of 0.5, 1.5, and 2.5 dS/m were offered to confirm the

equipment accuracy and standard error.

**CONCLUSION:** It was suggested that the developed equipment could be automatically applied for measurement with accuracy of over 96% and standard errors of less than 5% on 12 macro- and micro compositions such as a NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> or Fe.

**Key words:** Absorbance, Hydroponics, Inorganic Nutrients, Measurement Module

### 서론

식물공장이나 온실과 같은 인공광 및 자연광 재배시설에서는 토양 대신 다양한 종류의 영양성분을 포함하고 있는 무기 배양액을 적정량 공급하면서 작물을 재배한다[1]. 작물 재배기간 동안 화학비료 기반의 수경배양액 농도를 작물 생장에 적합하도록 정밀하게 관리하기 위해서는 배양액내 무기성분 농도를 수시로 파악할 필요가 있다[2-4]. 일반적으로 수경재배 현장에서는 배양액내 특정 성분의 농도를 파악할 수는 없으나 총이온 농도를 파악하기 위하여 EC (Electric Conductivity) 미터를 이용하는 경우가 많다. 이 밖에 일부 특정 성분 위주의 무기성분 농도 측정용 센서, 간이 흡광도계, 이온 크로마토그래프나 이온선택성 전극 등을 이용하기도 한다[3, 4].

\*Corresponding author: Jeong-Wook Heo  
Phone: +82-63-238-4063; Fax: +82-63-238-4035;  
E-mail: wooncho@korea.kr

수경재배 현장에서는 특히 EC 미터를 주로 사용하는데 이는 배양액 구성성분의 농도를 개별적으로 측정하는 것이 아니라 총이온 농도를 측정하는 방법이다. 따라서 EC 미터는 수경배양액에 녹아 있는 총이온농도를 측정하기 때문에 배양액을 구성하는 각각의 무기성분 농도에 대한 정확한 정보를 파악할 수 없다. EC 미터는 취급이 용이하지만 측정시 배양액과 주변 온도에 민감하게 반응하므로 전극 확인 및 세척작업 등 주기적으로 사용전·후 세심한 관리가 필요하다 [2-4]. 한편 발색법을 이용한 간이 흡광도계를 이용하여 무기성분 농도를 측정하기도 하는데, 배양액에 포함되어 있는 1개의 특정 무기성분을 1회 측정하기 위하여 30분 이상의 시간이 필요하다. 또한 측정대상 시료의 발색을 위해 필요한 반응시약 사용량도 1회 측정에 20 ml 이상 소요되는데, EC 미터와 달리 1회 측정시 1개의 특정 성분만 측정할 수는 있으나 배양액에 포함되어 있는 모든 무기성분을 대상으로 반복 측정을 고려하면 많은 시간과 노력이 소요되는 단점이 있다. 또한 대량성분 위주의 배양액 성분 농도를 측정하기 위하여 센서나 이온 크로마토그래피가 사용되기도 한다[5]. 측정용 센서를 사용할 경우에는 1개 특정 성분당 개별 센서가 필요하며, 센서에 따라서는 수십~수백만원으로 비교적 고가이므로 수종의 성분 농도를 측정하기 위해서 성분 종류만큼의 센서가 필요하여 사용자의 경제적 부담이 크다. 또한 무기성분 중에서도  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 상대적으로 높은 수경배양액을 대상으로 하는 경우 질산염에 의한 센서오염으로 정확도가 저하한다. 또한 사용연수가 사용연수가 경과함에 따라 센서의 정밀도가 저하하는 단점도 있다. 또한 3~5종 이내의 대량성분을 중심으로 센서가 개발되어 대량성분 이외에 배양액내 포함되어 있는 다양한 종류의 대량이나 미량의 무기성분 농도를 측정하기가 곤란하다.

인공광이나 자연광을 이용하는 재배시설인 식물공장이나 온실에서는 토양 대신 무기배양액을 사용하여 담액식(DFT, Deep Flow Technique), 분무식(Aeroponics), 박막식(NFT, Nutrient Film Technique) 등의 방식으로 무기성분으로 구성된 배양액을 공급하여 작물을 수경재배한다[6, 7, 9]. 배양액의 종류에 따라 성분별로 농도차이가 있는데, 특히 상추와 같은 호랭성 엽채류 재배를 위해 범용되는 무기배양액인 Yamazaki 잎상추액의 경우에는 배양액의 EC가 1.5 dS/m일 때 재배초기 배양액내 포함되어 있는 Fe나 Si는 약 2~10 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}$

약 17 mg/L 포함되어 있다[8]. 이에 반하여  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 함량은 약 97 mg/L 포함되어 있는데 재배가 종료되는 시점에서도 투입된  $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 작물체에 의해 전량 흡수되지 않고 초기 투입량의 1/3 이상 남아 있는 것으로 보고되고 있다. 이는 재배작물의 종류에 따라서 질소흡수 패턴과 재배종료후 잔여양분의 양이 달라질 수 있다는 것을 시사한다. 특히 수경재배작물의 생육단계나 작물을 둘러싼 환경변화에 의해 질소흡수가 저해되거나 재배초기 투입량이 과다할 경우 재배종료시까지 배양액내 다량의 질소성분이 남아 있는 상태로 배양액이 폐기되어 환경오염의 원인이 될 수 있다[7].

현재 수경재배한 작물체내 질산염 과잉 축적이나 흡수되지 않고 남아 있는 성분을 포함한 폐배양액에 의한 환경오염 등의 문제점들이 거론되고 있어 화학비료 사용량을 줄이면서 친환경적으로 작물을 수경재배하는 기술들이 요구되고 있다 [9-12]. 수경배양액내 무기성분 농도를 최적으로 제어하기 위하여 재배초기 무기성분 공급량 및 재배기간중 성분 흡수패턴 분석 등 재배기간 경과에 따라 농도를 편리하고 정확하게 측정하고 작물의 생육단계별로 무기배양액 구성성분의 농도를 측정할 수 있다면 폐기되는 배양액에 의한 환경오염과 화학비료 사용량 저감 등 부족하거나 과잉되는 양분이 없어 친환경적이며 경제적인 수경재배가 가능할 것으로 생각된다[8].

따라서 본 연구에서는 인공광 및 자연광 재배시설에서 수경재배시 사용하는 화학비료 기반의 배양액내 무기성분 농도 측정기술의 모듈화, 효율성 및 비용 절감을 위하여 질소, 인산, 칼륨, 철 등 대량 또는 미량성분의 농도를 자동으로 연속 측정하여 모니터링할 수 있는 장치를 개발하였다.

## 재료 및 방법

### 초음파 발생장치 및 항온장치 제작

사용자가 농도를 측정하기 전에 측정환경 설정(주기, 시간 등) 이외에 별도의 조작없이 무기성분을 자동으로 측정하기 위하여 측정모듈 내에 측정시료와 발색시약이 혼합되도록 하였는데 이때 반응 셀의 착색이나 미세기포가 발생할 수 있어 측정결과의 오차가 커질 것으로 판단되어 이를 방지하기 위한 소형 초음파 발생장치를 모듈에 부착하였다. 초음파 발생장치는 PVDF (Polyvinylidene Fluoride Film)로 제조한 압전소자로 전원은 5 V로 하였다(Fig. 1).

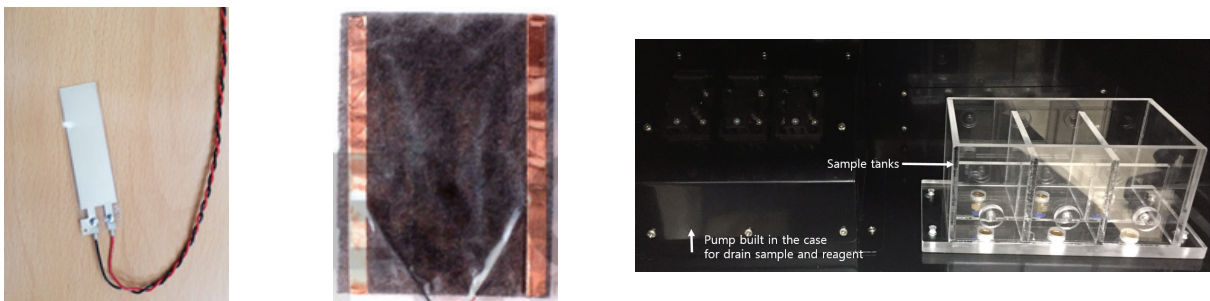


Fig. 1. Piezoelectric element used for the ultrasonic generating, heating pad for temperature control, and multi-sampler diagram designed in the CMOS measurement module.

측정모듈 적용시 초음파 발생장치 이외에 온도의 변화에 따라 시료와 시약의 반응속도와 흡광도에 영향을 미치기 때문에 측정의 정확도와 재현성을 높이고, 반응속도의 안정화 및 편차를 최소화하며 혼합물의 수온 변화에 의한 기포발생을 억제하기 위하여 가열·항온장치를 부착하였다. 무기성분 농도를 측정하는 모듈에 면상 발열체 원리를 적용하여 Carbon이 도포된 필름에 전도성 동박 테이프(3 M 1181)를 부착하여 Heater를 제작하였다. 발열용 패드와 동박 테이프는 12 V였으며 동박 테이프 두께는 0.07 mm로 접착제는 전기전도성 아크릴계 접착제를 사용하였다.

**COMS 기반 흡광도 측정 CMOS 모듈 설계 및 제작**

Prototype 자동측정장치 외관은 내산성의 HDPE (High Density Polyethylene) 재질로 제작하였으며 시료와 발색시약이 혼합되는 모듈은 내식성 재질로 만들었다. 측정장치 내부에는 측정시료와 반응시약의 정량이송을 위하여 Peristaltic 펌프(150 series, Williamson Manufacturing Company Ltd, U.K.)를 장착하였고 Power supply는 RS-75-12와 RS-75-24 (Mean Well, U.S.A.)로 하였다. 측정대상 시료의 농도를 산정하기 위하여 농도산출 알고리즘을 만들었다(Fig. 2). 본 연구에서는 20~50 mW의 저전력으로 회로 구성이 비교적 단순하다는 장점 때문에 LED를 활용하여, CMOS photodetector로 흡광도를 측정하고자 하였다. CMOS 모듈은 측정시료가 저농도일 경우에는 560 nm 파장에서, 시료농도가 고농도일 경우에는 525 nm 파장에서 흡광도를 측정하도록 하였다. CMOS 모듈을 농도측정 모듈에 장착하고 CMOS Photodetector board의 증폭비를 1로 고정하였으며 LED board로 12~25 mA의 전류를 보내 측정모듈이 작동하도록 하였다.

**Multi-Sampler 설계 및 제작**

1대의 측정장치로 다수의 시료를 측정하고 무기성분 농도의 실시간 분석을 위하여 농도측정장치 내부에 Multi-sampler를 채용하였다(Fig. 2). Multi-Sampler는 Multi-sampler tank 하부로 시료가 유입되어 Overflow 되어 배출되는 저류조로, 실시간으로 Multi-sampler tank 하단부에서 시료를 튜빙하여 장치로 유입되면 자동으로 시료의 농도를 측정할 수 있다.

**측정 정확도 및 재현율 산출**

이들 장치 부착 유·무에 따른 적용성 평가를 위하여 시료농도 0.01, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 25 및 50 mg/L 수준에서 정확도와 재현성 오차 측정은 모듈을 활용하여 10회 반복 측정하였다. 또한 장치의 정확도 확인을 위하여 표준시약 이외에 수경재배에 범용되고 있는 Yamazaki 잎상추액을 공시하여 EC 0.5, 1.5 및 2.5 dS/m의 3수준에서 정확도와 오차율을 산출하였다. 측정 정확도는 가식을 이용하여 산출하였는데, 가식에서  $X$ 는 정확도(분석오차)를,  $A$ 는 표준용액의 농도(mg/L)를,  $B$ 는 장치를 활용한 실제 측정값(mg/L)을 의미한다. 측정모듈을 충분히 안정시킨 후 제로/스팬용액(표준용액 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 mg/L)을 주입하여 측정값을 기

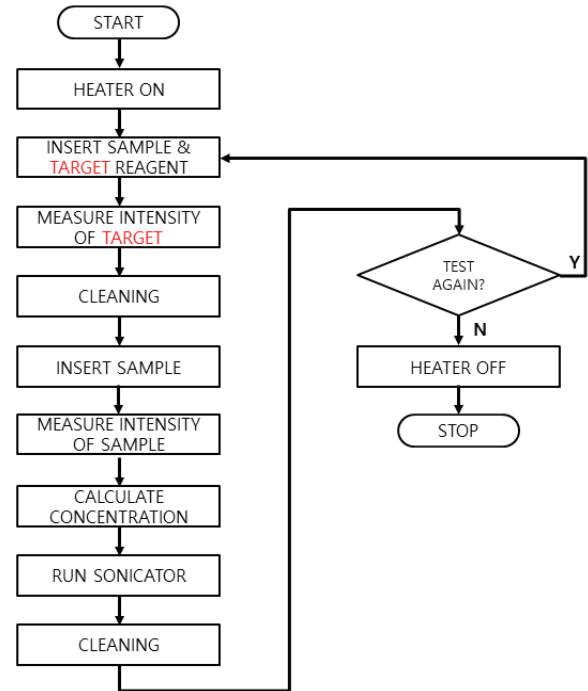


Fig. 2. Process diagram for the inorganic nutrient concentration measurement.

록하며 이 과정을 5회 이상 반복하여 측정값의 평균 및 표준편차를 기반으로 하여 나식과 같이 장치의 측정 재현성을 산출하였다.

$$\text{식(가). } X(\%) = 100 - \left( \frac{|A-B|}{B} \times 100 \right)$$

$$\text{식(나). 재현율}(\%) = \frac{\text{측정값의 표준편차}}{\text{측정값의 평균값}} \times 100$$

**결과 및 고찰**

발색시약에 의한 흡광도법을 기반으로 하는 측정모듈을 설계하고 측정대상으로 하는 무기성분 시료와 발색시약을 혼합하고 Fig. 1과 같은 프로그램에 의하여 농도를 산출할 수 있었다. CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 측정모듈은 LED Lighting PCB와 광강도를 측정하는 CMOS Photodetector PCB로 구성하여 흡광도를 측정하도록 하였다(Fig. 3). 이로써 전원이 연결되면 노이즈 필터를 통과한 전류가 증폭되어 LED에 전기를 공급하고 ON/OFF 신호를 인지할 수 있다.

Prototype 자동측정장치는 측정조건 제어부, 측정 모듈 및 펌핑부로 구성하였으며 측정모듈에서는 측정대상 시료와 반응시약을 혼합하고 혼합물이 발색된 후 흡광도를 측정한다(Fig. 4). 측정반복수, 세척회수, 측정대상 시료 설정 등은 터치패널의 제어부에서 수행하는데, 1회 측정에 필요한 시료와 반응시약의 양은 10 mL로, 모듈 하부에는 경사를 주어 측정이 종료된 혼합물의 배출이 용이하도록 하였다. 또한 흡광도

측정시 외부의 빛이나 이물질이 유입되지 않도록 모듈 상부에는 뚜껑을 설치하였다. 장치 내부에는 PC 및 메인보드와 혼합물 반응조인 내경 16 mm × 높이 9 mm, 용량 13 mL인 수조와 반응시약이 거치할 수 있도록 설계하였으며 특히 펌프 장착 부분에는 격벽을 설치, 공간을 분리하여 시료나 이물질 등에 의한 장치의 오작동을 방지하였다.

모듈에 부착한 가열·향온장치가 작동하고 모듈내 온도가 일정하게 유지되면, 시료와 반응시약이 자동으로 주입되고 모듈 내부에서 혼합물이 발생된 후 흡광도를 측정하게 된다. 서로 다른 종류 또는 동일한 종류의 시료를 연속으로 측정할 경우를 대비하여 제어부에서 시료 측정후 증류수로 측정모듈

내부를 세척할 수 있도록 세척 회수를 임의로 설정하여 시료간 섞임현상에 의한 정확도 저하를 방지하였다. 측정이 끝난 후에는 자동 펌핑에 의해 증류수가 모듈내로 유입, 모듈 내부를 세척한 후 Blank 측정을 위한 시료가 유입된다. 시료의 흡광도가 측정되고 농도값이 산출된 후에는 Sonicator가 작동한다. 모듈 세척 과정을 거친 후 상기의 측정과정이 반복되며 측정성분별로 성분농도가 높은 질소성분의 경우 1개 시료당 세척시간 포함 30분이 소요되며 기타 미량성분의 경우 2분 이내 측정할 수 있으며 세척회수를 포함한 측정성분 종류와 주기는 24시간 범위내에서 제어패널을 조작하여 임의로 설정이 가능하도록 하였다.

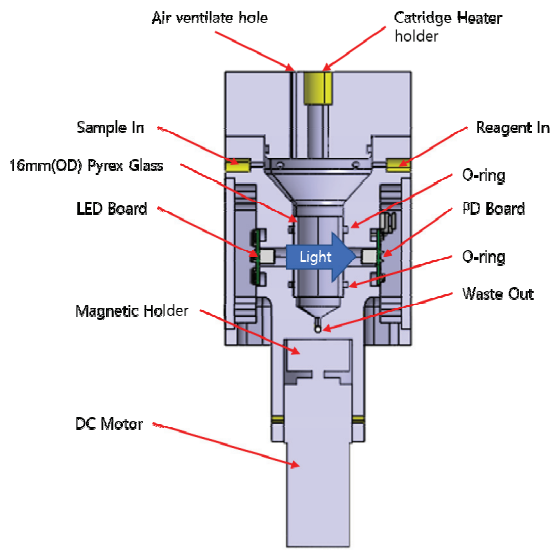


Fig. 3. Schematic diagram and view of the module developed for concentration measurement of the inorganic nutrients.

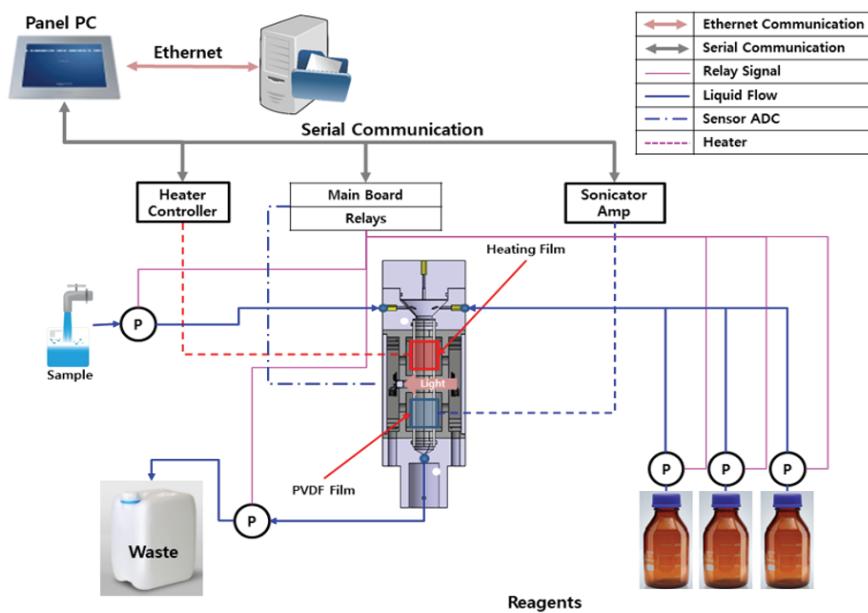


Fig. 4. Schematic diagram of the nutrient concentration measurement equipment.

측정모듈에 초음파 발생장치와 히터를 부착하지 않은 상태에서  $\text{PO}_4^{3-}$  성분의 측정 정확도와 재현성을 측정한 결과, 저농도에서 평균 표준편차는 0.016, 평균 정확도는 93.7%, 평균 재현성 오차는 10.6%로 나타났다(Table 1).  $\text{PO}_4^{3-}$  농도가 0.5 mg/L 이상에서는 정확도가 98% 이상이고, 재현성 오차도 2.9% 이하로 우수하였으나, 농도 0.1 mg/L에서는 오차가 9.3%로 높았으며 0.01 mg/L에서는 정확도 76.9%, 오차 37.2%로 나타났다. 한편, 고농도의  $\text{PO}_4^{3-}$  측정 정확도와 재현성을 조사한 결과, 평균 표준편차는 0.208, 평균 정확도는

98.2%, 평균 재현성 오차는 2.0%로 나타났다.

초음파 발생장치 및 히터를 부착하여 저농도  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도를 측정한 결과, 평균 표준편차는 0.013, 평균 정확도는 95.4%, 평균 재현성 오차는 9.9%로 나타났다(Table 2).  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 0.5 mg/L 이상에서는 정확도가 98% 이상이고, 재현성 오차도 2.7% 이하로 우수하게 나타났다. 그러나, 농도 0.1 mg/L에서는 오차가 9.2%로 높게 측정되었고, 0.01 mg/L에서는 정확도가 83.3%, 오차가 35.1%로 측정되었다. 이상으로 실험장치를 부착하지 않고 측정한 결과와 비교할 때 시료의 측정 정

Table 1. Accuracy and reproducibility (%) of  $\text{PO}_4^{3-}$  concentration measurement by using the measurement module without ultrasonic generator and heater

Standard solution (mg/L)	Average measurement value (mg/L)	Standard Deviation	Accuracy (%)	Reproducibility (%)
Lower conc. (5 levels)				
0.01	0.013	0.005	76.9	37.2
0.1	0.014	0.01	96.2	9.3
0.5	0.507	0.015	98.6	2.9
1	1.016	0.025	98.4	2.4
2	2.03	0.026	98.5	1.3
Average value		0.016	93.7	10.6
Higher conc. (5 levels)				
2	2.1	0.085	97.6	4.1
5	5.1	0.135	97.3	2.6
10	10.2	0.132	97.8	1.3
25	25.3	0.317	99.0	1.3
50	50.4	0.373	99.2	0.7
Average value		0.208	98.2	2.0

Table 2. Accuracy and reproducibility (%) of  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration measurement by using the measurement module with ultrasonic generator and heater

Standard solution (mg/L)	Average measurement value (mg/L)	Standard Deviation	Accuracy (%)	Reproducibility (%)
Lower conc. (5 levels)				
0.01	0.012	0.004	83.3	35.1
0.1	0.103	0.009	97.1	9.2
0.5	0.506	0.013	98.8	2.7
1	1.012	0.018	98.8	1.8
2	2.023	0.019	98.9	0.9
Average value		0.013	95.4	9.9
Higher conc. (5 levels)				
2	2.0	0.070	98.0	3.4
5	5.1	0.095	98.6	1.9
10	10.1	0.129	99.1	1.3
25	25.1	0.231	99.5	0.9
50	50.2	0.292	99.6	0.6
Average value		0.163	99.0	1.6

확도와 재현성이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 표준 시료가 고농도일 경우, 평균 표준편차는 0.163, 평균 정확도는 99.0%, 평균 재현성 오차는 1.6%였다. 인산염과 마찬가지로 sonicator와 heater를 부착하지 않은 결과와 비교할 때 부착하였을 때 측정의 정확도와 재현성이 향상되었다. 이는 장치의 부착이 모듈 벽 오염을 방지하고 시료의 수온 변화가 완화에 따라 기포 발생이 억제되는 등의 효과에 의해 정확도와 재현성이 향상된 것으로 판단된다.

NO<sub>3</sub>-N에서와 마찬가지로 NH<sub>3</sub>-N 정확도를 확인하기 위하여 저농도 5수준의 표준용액을 활용하여 측정한 결과, 표준용액의 농도가 0.01 mg/L에서 2 mg/L로 높아질수록 정확

도가 증가하여 94%±0.014로 나타났다(Table 3). 표준용액 0.01 농도에서 장치의 재현성 오차는 37.2%였으나 농도가 2 mg/L까지 높아짐에 따라 오차가 9.9%로 낮아지는 경향을 보였다. 또한 2 mg/L에서 50 mg/L까지 비교적 고농도의 표준용액으로 측정한 결과 2 mg/L 이하의 저농도에서 보다 측정치의 정확도가 98.9%±0.16까지 높아졌으며 재현성 오차는 1.5%로 증가하는 경향을 나타내었다.

초음파 발생장치 및 가열·향온 장치를 부착한 모듈로 저농도의 K<sup>+</sup> 성분을 측정한 결과, 평균 표준편차는 0.007, 평균 정확도는 95.7%, 평균 재현성 오차는 8.3%로 나타났다(Table 4). K<sup>+</sup> 농도가 0.1 mg/L 이상에서는 정확도가 98%

Table 3. Accuracy and reproducibility (%) of NH<sub>4</sub>-N concentration measurement by using the developed equipment

Standard solution (mg/L)	Average measurement value (mg/L)	Standard Deviation	Accuracy (%)	Reproducibility (%)
Lower conc. (5 levels)				
0.01	0.013	0.005	76.9	37.2
0.1	0.104	0.007	96.2	6.7
0.5	0.508	0.011	98.4	2.2
1	1.013	0.021	98.7	2.1
2	2.026	0.027	98.7	1.3
Average value		0.014	94.0	9.9
Higher conc. (5 levels)				
2	2.0	0.070	98.0	3.4
5	5.1	0.082	98.6	1.6
10	10.1	0.115	99.0	1.1
25	25.2	0.250	99.3	1.0
50	50.3	0.272	99.5	0.5
Average value		0.158	98.9	1.5

Table 4. Accuracy and reproducibility (%) of K concentration measurement by using the developed equipment

Standard solution (mg/L)	Average measurement value (mg/L)	Standard Deviation	Accuracy (%)	Reproducibility (%)
Lower conc. (5 levels)				
0.01	0.012	0.004	83.3	35.1
0.1	0.102	0.004	98.0	4.1
0.5	0.505	0.005	99.0	1.0
1	1.010	0.008	99.0	0.8
2	2.019	0.011	99.1	0.5
Average value		0.007	95.7	8.3
Higher conc. (5 levels)				
2	2.0	0.067	98.5	3.3
5	5.1	0.070	98.8	1.4
10	10.1	0.088	99.1	0.9
25	25.1	0.117	99.4	0.5
50	50.2	0.189	99.7	0.4
Average value		0.106	99.1	1.3

이상이었고 오차도 4.1% 이하로 우수하였다. 그러나, 농도 0.01 mg/L에서는 정확도가 83.3%, 재현성 오차는 35.1%로 낮게 나타났다. NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N 및 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 경우와 마찬가지로 측정모듈에 초음파 발생장치와 가열·향온 장치를 장착 하므로써 측정 정확도와 재현성이 향상되었다. 2~50 mg/L의 표준용액을 사용하여 측정한 결과 평균 표준편차는 0.106, 평균 정확도는 99.1%, 평균 재현성 오차는 1.3%로 나타났는데, 표준용액의 농도가 높아질수록 정확도와 재현성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

개발된 측정장치를 활용하여 표준용액이 아닌 인공광 식물공장이나 시설재배지에서 엽채류 재배를 위하여 주로 사용하는 Yamazaki 잎상추액내 포함된 무기성분 중에서 97 mg/L로 농도가 가장 높은 NO<sub>3</sub>-N의 농도를 2시간 간격으로 48시간 동안 측정 간격을 설정하여 정확도를 산출하였다 (결과 미제시). Yamazaki 잎상추액내 총이온농도 지표인 EC를 0.5, 1.5 및 2.5 dS/m 3수준에서 관행의 간이흡광도계 법으로 측정한 결과, 배양액내 EC가 0.5, 1.5 및 2.5 dS/m 일 때 NO<sub>3</sub>-N 농도는 각각 43, 138 및 242 mg/L로 측정되었다. 이에 반해 EC가 0.5, 1.5 및 2.5 dS/m일 때 개발된 측정장치를 이용하여 측정한 결과 각각 42.1, 143.3 및 249.9 mg/L로, 관행방법과 비교하여 EC가 2.5 dS/m 대비 0.5 dS/m일 때 정확도는 96.7과 97.4로, EC가 낮을 때 0.7% 증가하는 것으로 나타났다. 한편 EC가 1.5 및 2.5 dS/m 간에 측정 정확도는 96.2와 96.7로 유사하게 산출되는 등 측정대상 시료의 EC가 높아질수록 정확도 향상을 위하여 시료의 희석 배율을 높여야 하는 번거로움이 있어 희석배율 최소화를 위한 방법이 추가되어야 할 것으로 판단된다. 연구결과 Yamazaki 잎상추액내 포함된 총 12종의 무기성분농도 측정을 위하여 개발된 측정장치를 활용할 경우 정확도는 96% 이상이며 평균 오차율은 5% 이내에서 무기성분 농도를 측정할 수 있었다. 또한 한 종류의 무기성분을 1회 측정하기 위해서 약 30분 정도의 시간이 소요되는 등 반복 측정을 위해 긴 시간이 필요하고 측정작업 효율성이 낮은 간이 흡광도계와 측정항목이 정해져 있는 이온선택성 전극과 달리 24시간 범위에서 측정 반복수를 임의로 제어하면서 다양한 성분을 자동으로 측정할 수 있었다. 특히 이온선택성 센서를 이용하여 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온 등 특정 이온농도를 측정할 경우 전극의 수명이 무기성분의 종류에 따라서 10주~18주 이내로 비교적 짧은 단점이 지적되고 있으나[2-4], 본 장치의 경우에 펌프수명은 2년이며 튜브는 42주 사용후 교체하거나 발색시약 충전 이외에는 반영구적으로 사용이 가능하다. 이밖에 EC미터나 관행 간이흡광도법 대비 시료채취, 시료와 발색시약 혼합반응 시간 등 작업시간 단축, 24시간내 측정시간 제어, 발색시약 사용량 70% 이상 절감할 수 있었다. 또한 장치 영구성 등 작업효율성을 향상시킬 수 있었으며 배양액내 포함된 개별 성분의 농도측정이 가능하여 재배작물의 생육단계별로 효율적인 배양액 관리가 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 실험실 규모에서 시료를 샘플링한 후 농도를 측정하였으나 실제 시설재배 현장 보급을 위한 측정항목 간소화 등 현장 보급형

으로 개선할 필요가 있다. 측정 성분의 종류가 정해져 있는 관행의 EC미터나 간이흡광도계, 이온간의 간섭이 발생하는 이온선택성 전극 등 관행 무기성분 농도측정장치에 비해 Mn, K, Cu, NO<sub>3</sub>-N NH<sub>3</sub>-N, Si, Fe 등 수경재배용 배양액에 포함되어 있는 12종의 미량 및 대량성분 농도를 성분 독립적으로 자동측정할 수 있었다[13-15]. 그러나 작물을 재배하고 있는 현장에서 직접 시료를 자동펌핑하여 측정할 경우 측정모듈내 탁도를 높이는 부유물 유입에 의해 측정 정확도와 오차율이 낮아지는 현상이 우려된다. 앞으로는 부유물이나 작물 잔여물 등의 흡입을 억제할 수 있도록 시료 자동채취 튜브 주변에 필터를 장착장착할 예정이다. 또한 수경배양액내 EC가 최대 2.5 dS/m까지는 오차범위 5%이내에서 측정할 수 있어 일반 엽채류 재배시 무기성분 농도측정에 효과적으로 이용될 것으로 기대된다. 실험결과에는 나타나지 않았으나 EC를 2.5 dS/m 이상으로 제어하는 과채류 재배용 배양액을 대상으로 질소농도를 측정하였을 때 오차범위가 7% 수준으로 나타나 고농도의 NO<sub>3</sub>-N 성분 측정 정확도를 높이기 위한 발색시약 개발도 필요할 것으로 판단되었다.

## Note

The authors declare no conflict of interest.

## Acknowledgement

This study was funded by a research program (PJ01256602) of Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea.

## References

1. Albery W, Haggett B, Svanberg L (1985) The development of sensors for hydroponics. *Biosensors*, 1(4), 369-397. [https://doi.org/10.1016/0265-928X\(85\)80006-7](https://doi.org/10.1016/0265-928X(85)80006-7).
2. Bamsey M, Graham T, Thompson C, Berinstain A, Scott A, Dixon M (2012) Ion-specific 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. <https://doi.org/10.3390/s121013349>.
3. Bailey W, Haggett B, Svanberg R (1988) Monitoring nutrient film solutions using ion-selective electrodes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 40(2), 129-142. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(88\)90110-2](https://doi.org/10.1016/0021-8634(88)90110-2).
4. Vardar G, Altikatoglu M, Ortac D, Cemek M, Isildak I (2014) Measuring calcium, potassium, and nitrate in plant nutrient solutions using ion-selective electrodes in hydroponic greenhouse of some vegetables. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 62(5), 663-

668. <https://doi.org/10.1002/bab.1317>.
5. Malone M, Herron M, Morales M (2002) Continuous measurement of macronutrient ions in the transpiration stream of intact plants using the meadow spittlebug coupled with ion chromatography. *Plant Physiology*, 130(3), 1436-1442. <https://doi.org/10.1104/pp.007740>.
  6. Alan R, Zulkadir H, Padem H (1994) The influence of growing media on growth yield, and quality of Tomato grown under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*, 336, 429-436. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.366.53>
  7. Bugbee B (2004) Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Horticulturae*, 648, 99-112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.12>.
  8. Heo J, Park K, Lee J, Hong S, Lee G, Baek J (2018) Design of cloud-based data analysis system for culture medium management in smart greenhouses. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 37, 251-259. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2018.37.4.38>.
  9. Khan K, Yan Z, He D (2018) Impact of light intensity and nitrogen of nutrient solutions on nitrate content in three lettuce cultivars prior to harvest. *Journal of Agricultural Science*, 10(6), 99-109. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p99>.
  10. Kozai T (2013) Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceeding of the Japan Academy Series B*, 89(10), 447-461. <https://doi.org/10.2138/pjab.89.447>.
  11. Kumar RR, Cho JY (2014). Reuse of hydroponic waste solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(16), 9569-9577. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3024-3>.
  12. Haddad M, Mizyed N (2011) Evaluation of various hydroponic techniques as decentralized wastewater treatment and reuse systems. *International Journal of Environmental Studies*, 68(4), 461-476. <https://doi.org/10.1080/00207233.2011.582701>.
  13. Cho W, Kim H, Jung D, Han H, Cho Y (2019) Hybrid signal-processing method based on neural network for predictions of NO<sub>3</sub>, K Ca, and Mg ions in hydroponic solutions using an array of ion-selective electrodes. *Sensors*, 19(24), 5508. <https://doi.org/10.3390/s19245508>.
  14. Jung D, Kim H, Choi G, Ahn T, Son J, Sudduth K (2015) Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes. *Transactions of the ASABE*, 58(5), 1309-1319. <https://doi.org/10.13031/trans.58.11228>.
  15. Bratov A, Abramova N, Ipatov A (2010) A recent trends in potentiometric sensor arrays - a review. *Analytica Chimica Acta*, 678(2), 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.08.035>.