



## 상추재배를 위한 시설하우스 배액의 비효평가 - 무기태 질소를 중심으로 -

Analysis of the Fertilizing Effects of Hydroponic Waste Solution on  
Lettuce (*Lactuca sativa var. capitata*) Cultivation  
- Based on Inorganic Nitrogen Content -

윤성욱<sup>a,†</sup> · 임주미<sup>b,†</sup> · 문종필<sup>a</sup> · 장재경<sup>a</sup> · 박민정<sup>a</sup> · 손진관<sup>c</sup> · 이현호<sup>d</sup> · 서효민<sup>a</sup> · 최덕규<sup>e,‡</sup>

Yun, Sung-Wook · Lim, Ju-Mi · Moon, Jongpil · Jang, Jaekyoung · Park, Minjung · Son, Jinkwan · Lee, Hyun-Ho · Seo, Hyomin · Choi, Duk-Kyu

### ABSTRACT

The feasibility of HWS for agricultural use was analyzed through a crop cultivation test to utilize the hydroponic waste solution (HWS) generated from the nutriculture greenhouse. The fertilizing effect of HWS was assessed on the basis of the inorganic nitrogen (N) mostly existed in HWSs, and nitrogen (urea) fertilizer. Lettuce was selected as the target crop influenced by the soil treatment and also for the crop cultivation test. Thus, the change in growth characteristics of lettuce and that in chemical characteristics of the soil were investigated. In terms of the growth of lettuce, the C control group with 70% nitrogen (urea) fertilizer and 30% HWS and the D control group with 50% nitrogen (urea) fertilizer and 50% HWS were more effective than the practice control group (B) with 100% nitrogen (urea) fertilizer. The results of this study confirmed the combined applicability of the chemical fertilizer and HWS for crop cultivation. Because NO<sub>3</sub>-N present in HWS has a high possibility of leaching into the soil, its applicability as a fertilizer has been considered to be relatively low in Korea. However, if an appropriate mixing ratio of urea fertilizer and HWS could be applied, the problems associated with leaching of nitrate nitrogen could be reduced with beneficial effects on crop cultivation. Thus, future studies are required on the treatment effect of HWS with repeated cultivation, impact assessment on the surrounding environment, and appropriate fertilization methods using nitrogen (urea) fertilizer and HWS. These studies would facilitate the sustainable recycling of HWS.

Keywords: Hydroponic waste solution; greenhouse; soil; fertilizer; reuse

### 1. 서론

양액 (수경)재배는 전통적 영농방식인 토양을 이용하지 않고 무토양 조건에서 작물을 여러 방법 (고형배지경, 수기경 방식 등)으로 고정시킨 후, 작물생육에 필요한 다양한 원소들

을 적절한 농도로 용해시켜 조제한 액상 형태의 양액비료를 이용하여 작물을 재배하는 방법이다. 양액재배는 균형 시비, 토양 전염성 병원균의 회피, 위생적 재배환경, 토양의 연작 장애 감소, 안정적 주년 생산 및 고품질 과채류 생산 등 재배적 측면에서 토경재배보다 많은 장점이 있다 (Sonneveld and Voogt, 2009; Lee et al., 2019; Lee and Kim, 2019). 국내 양액재배는 1992년 시작된 시설원예 산업에 대한 정부의 집중적인 지원과 함께 생산성 및 품질 향상에 대한 농가의 요구가 증대되면서 보급되기 시작하였다 (Horticulture, 2020). 2019년 기준 국내 양액재배 면적은 약 3,489 ha로 과거 1993년에는 23 ha에 불과하였으나 이후 매우 빠르게 증가하여 현재는 시설채소 재배면적 (약 55,407 ha)의 약 6.3% 정도를 차지하고 있다 (Park et al., 2005; MAFRA, 2019; Horticulture, 2020). 이러한 양액재배는 미래형 농업으로서 매우 큰 관심을 받고 있는 기술인 스마트 온실과 식물공장 등의 분야에서 작물재배의 기본이기 때문에 향후 그 면적은 지속적으로 확대될 것으로 예상된다 (Horticulture, 2021).

양액재배는 사용된 양액의 처리방식에 따라 비순환식 및 순환식 양액재배로 나눌 수 있는데 순환식 양액재배는 사용

<sup>a</sup> Agricultural Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences

<sup>b</sup> M.S. Course Student, Department of Life Science and Environmental Biochemistry, Pusan National University

<sup>c</sup> Postdoctoral Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences

<sup>d</sup> Ph.D. Candidate, Department of Life Science and Environmental Biochemistry, Pusan National University

<sup>e</sup> Agricultural Senior Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences

<sup>†</sup> These authors contributed equally to this work.

<sup>‡</sup> Corresponding author

Tel.: +82-63-238-4042, Fax: +82-63-238-4249

E-mail: [chdukk@korea.kr](mailto:chdukk@korea.kr)

Received: May 14, 2021

Revised: June 07, 2021

Accepted: June 07, 2021

한 양액을 회수해 정화처리 (살균 등) 후 작물재배에 재사용하는 방식이며, 비순환식은 양액을 재사용하지 않는 방식이다. 비순환식의 경우 재배과정 중 양액의 1회 급액 후 발생하는 배액 (폐양액)은 주변 환경 (토양 및 하천 등)으로 그대로 배출되어 지하수 및 하천 오염의 원인이 될 수 있다는 우려는 양액 재배의 도입 및 보급 초기부터 꾸준히 제기되어 왔다 (Uronen, 1995; Rho et al., 1997; Roh, 2003; Park et al., 2005; Kumar and Cho, 2014; Lee and Kim, 2019). 특히 비순환식 양액재배에서 작물의 주요 비료성분인 질소의 경우 공급 양액 중 57~67% 정도만 작물이 이용하고 나머지는 그대로 배출되는 것으로 알려져 있다 (Uronen, 1995; Hong et al., 2009). 온실의 배액은 수질환경보전법 상 산업체 폐수로 분류될 수 있으며, 수질오염물질의 배출허용기준 (청정지역 제외)에서 총 질소 및 총 인은 각각 60, 8 mg/L 이하로 규제된다 (KMoE, 2020). 그러나 현재까지 관련 연구들을 통해 보고된 바에 의하면 양액재배 온실로부터 배출되는 배액 내 총 질소 및 총 인의 평균농도는 해당 배출허용기준을 초과하는 것으로 나타났으며 (Lee et al., 2007; Hong et al., 2009; Son et al., 2019), 특히 Son et al. (2019)에 의하면 연구대상지역 양액재배 온실의 배액 내 총 질소 및 총 인의 평균농도는 각각 333 mg/L 및 60.5 mg/L로 해당 오염기준을 크게 초과하는 것으로 나타났다.

양액재배 온실로부터 발생하는 배액으로 인한 주변 환경부하를 최대한 저감시키기 위해서는 친환경적 순환식 양액재배 시스템의 도입 및 적용이 가장 적절한 방안이다 (Hong et al., 2009). 그러나 국내의 경우 순환식 양액재배 시스템의 도입은 고가의 비용이 들며 (Park et al., 2005; Lee and Kim, 2019), 이를 이용한 재배방법 또한 확립이 되어 있지 않아 영세한 규모로 운영되는 양액재배 농가의 대부분은 별도의 처리 없이 배액을 하천으로 방류하는 비순환식 양액재배 형태로 작물을 재배하고 있다. 최종적으로는 제도적인 개선과 함께 순환식 양액재배 시스템의 보급 및 확대가 이루어져야 하지만 현재 순환식 양액재배 시스템의 보급률이 5% 미만으로 매우

낮고 (Lee and Kim, 2019), 국내 순환식 양액재배 시스템 관련 연구 및 개발 상황을 고려해 볼 때, 관련 시스템의 보급 및 확대가 이루어지기까지는 상당히 많은 시간이 필요할 것으로 판단된다.

따라서 순환식 양액재배 시스템의 보급 확대가 이루어지기 까지 배액의 처리방안 중 하나로 배액 내 많이 함유하고 있는 질소 성분에 대하여 농업적 재이용을 고려해 볼 필요가 있다. 과거 배액의 재이용에 관한 연구는 대부분 배액의 재처리 후 양액으로 재활용하는 것이며, 토경재배용 비료로서 활용성은 Park et al. (2005)와 Hong et al. (2009)에서 각각 고추와 배추를 재배하여 보고한 내용이 거의 전부이다. 그러나 이 연구들은 대상작물의 생육특성에 집중되어 있고 배액을 처리하여 작물을 재배한 후 토양 화학성에 대한 변화는 연구의 범위에서 고려되지 않았다. 본 연구에서는 배액의 토경재배에 대한 활용성을 검토하기 위해 배액의 비효평가를 수행하여 배액의 토양처리에 따른 대상작물의 생육특성과 토양 화학성 변화를 조사하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 온실 배액의 비효평가

#### 가. 온실 배액 및 대상토양

본 연구에서 사용한 온실 배액은 전라북도 전주시 덕진구 농생명로에 소재하는 국립농업과학원 농업공학부의 토마토 양액재배 온실에서 사용된 배액을 채취하여 비효평가에 이용하였으며, 대상 배액의 화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. 그리고 대상토양은 국립농업과학원 농업공학부의 발토양 (35°49'42.39"N 127°3'39.03"E)에서 채취한 토양을 선정하여 작물재배시험에 사용하였다. 작물재배시험을 위해 해당 발토양에서 일반 철삽을 이용하여 적절한 양의 토양을 채취하였으며, 채취한 토양에 대해서는 일정한 두께로 pan에 고르게

**Table 1** Chemical properties of the hydroponic waste solution used in the study

pH	EC	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	T-P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	B	Cu
	dS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
6.0	2.4	301	5.0	28	335	21.0	200	45	0.92	0.90	0.10	0.76	0.03

**Table 2** Physico-chemical characteristics of the studied soil

pH	EC	OM	T-N	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Exchangeable cation			
							K	Ca	Mg	Na
	dS/m	g/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	cmol <sub>c</sub> /kg	cmol <sub>c</sub> /kg	cmol <sub>c</sub> /kg	cmol <sub>c</sub> /kg
5.51	0.31	2.08	0.10	9.64	3.20	16.38	0.01	2.42	1.09	0.04

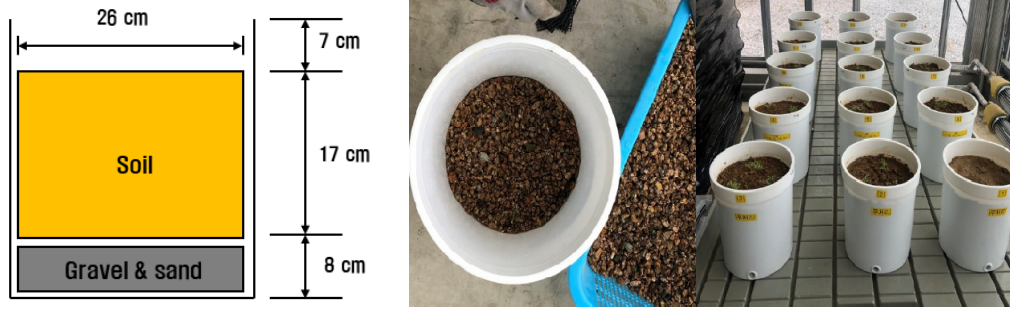


Fig. 1 The schematic diagram and view of soil filled pot

퍼서 14일간 음건시킨 다음 9.54 mm 체에 통과시킨 후 작물 재배시험에 사용하였다. 작물재배시험 전 대상토양의 이화학적 특성은 Table 2에 나타내었다.

#### 나. 배액의 처리 및 작물재배시험

작물재배시험은 온실 배액을 이용하여 2020년 6월 25일부터 8월 29일까지 56일 동안 국립농업과학원 농업공학부 부속 유리온실에서 대상작물인 아바타상추 (*Lactuca sativa* var. *capitata*)를 재배하는 방식으로 수행되었다. 대상작물은 직경 26 cm, 높이 32 cm의 와그너 포트 (1/2,000)에서 재배되었다. 와그너 포트에 토양의 충전방법은 Fig. 1과 같이 포트 맨 하부에 8 cm 두께로 자갈 및 모래 (표준사)를 채워 여과층을 형성시킨 후, 그 상부에 대상토양을 17 cm 높이로 작토층을 형성시키는 방식으로 각 포트 당 12 kg의 대상토양이 채워졌다. 이때 와그너 포트 내 토양은 3층으로 나누어 각 층마다 모종삽을 이용하여 일정하게 혼합 및 다짐을 하며 채워넣었다 (Fig. 1).

온실 배액에 대한 비효평가는 배액에 함유된 질소함량 (301 mg/L)을 기준으로 수행되었다 (Table 1). 대상토양에 대한 배액의 처리는 A) 무처리, B) 질소 (요소) 비료 100%, C)

질소비료 70% + 배액 30%, D) 질소비료 50% + 배액 50% 및 E) 질소비료 30% + 배액 70% 등 총 5개 처리구로 구분하여 각각 3 반복으로 Fig. 1과 같이 처리하여 비효평가를 수행하였다. 이후의 기술부터는 별도의 처리구별 배액처리 내용을 일일이 언급하지 않고 앞에서 제시된 각 배액의 처리 내용에 해당하는 알파벳 문자를 사용하여 기술한다. 토양에 처리한 화학비료는 4요소로 질소 (N)는 분자식  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  성분 46% 요소, 인산 (P)은 구용성 인산 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 17%의 용과린, 칼륨 (K)은 분자식  $\text{K}_2\text{O}$  성분 60%의 염화加里 그리고 칼슘 (Ca)은 분자식  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 소석회를 이용하였다. 그리고 대상토양에 대한 비료 4요소의 처리량은 국립농업과학원의 작물별 시비처방 기준 (NAAS, 2010)에 준하여 밀거름 (기비)과 웃거름 (추비)을 시비하였다. 대상작물은 각 포트 내 토양에 밀거름을 처리하고 일주일간 경과한 후에 파종하였으며, 이후 웃거름은 3주 후에 처리하였다. 각 처리구 내 토양의 수분은 최적함수량으로 접근하였는데 포트 내 토양의 함수율이 공극율의 45% (약 1.9 L) 정도로 유지될 수 있도록 대상작물의 재배기간 동안 4일 간격으로 무게를 측정하여 유실된 수분의 양을 공급하였다.

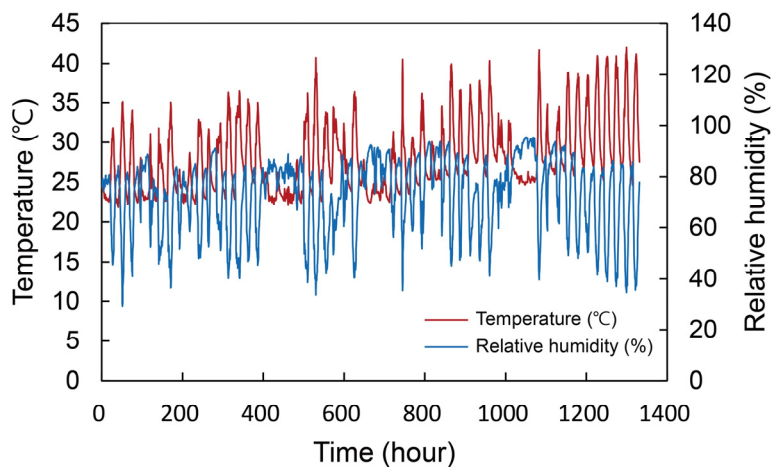


Fig. 2 Variation of temperature and relative humidity in the used glass greenhouse

Fig. 2는 작물재배시험이 수행된 유리온실의 온도 및 습도 환경을 나타낸 것이다. 작물재배시험이 수행되는 동안 유리온실의 온도는 21.8~42.0°C 범위로 평균 28.0±4.4°C, 상대습도는 29.3~95.3% 범위로 평균 72.8±14.5% 정도로 나타났다.

## 2. 화학적 특성 및 작물생육조사

### 가. 대상작물 (상추)의 생육조사

대상작물의 생육조사는 기비처리 후 일주일 후인 파종일 (2020.06.25.)로부터 56일 후 (2020.08.19.), 각 처리구별로 재배된 대상작물에 대하여 실시되었다. 각 처리구에서 대상작물을 수확한 다음 3개체씩 무작위로 선택하여 생체중, 엽수, 초장, 엽장, 엽폭, 근장 및 근주 등을 측정하고 그 평균값을 대상작물의 생육특성 비교에 이용하였다.

### 나. 토양의 화학적 특성

대상토양 및 작물재배시험 후 각 처리구별 토양에 대한 이화학적 분석방법은 다음과 같은 방법으로 수행되었다. 토양 pH 및 EC는 토양과 증류수 비율을 1:5로 추출하여 pH & EC meter (Orion 550A, Thermo)를 이용하여 측정하였다 (RDA, 2003). 유기물 함량은 Walkley-Black법 (Allison, 1965), 총질소 (T-N) 함량은 Kjeldahl법 (Bremner, 1965), 유효인산의 함량은 Lancaster법 (RDA, 2003) 그리고 치환성 양이온  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ 는 1 N  $NH_4$ -acetate (pH 7) 침출법으로 추출하여 ICP-OES (Perkin elmer model DV 4300, Shelton, CT, USA)로 분석하였다 (RDA, 2003). 토성은 ASTM 표준체와 비중계법 (hydrometer method)을 통하여 미국농무성 (USDA)에 의한 입도분류를 실시하였다.

### 다. 토양 내 무기태 질소 함량

토양 내 무기태 질소의 함량은 다음과 같은 방법으로 분석되었다. 토양 건조시료 5 g에 25 mL의 2 M KCl 용액을 가하여 30분 동안 진탕한 후 Whatman No. 2로 여과하여 그 침출액을 무기태 질소 분석에 이용하였다. 암모늄태 질소 ( $NH_4$ -N)는 Indophenol-Blue 비색법으로 측정하였다 (Searle, 1984). 침출액 2 mL에 EDTA 용액 0.5 mL, Salicylate 용액 2 mL, Hypochlorite 용액 1 mL 및 증류수 7 mL을 넣고 혼합한 후, 37°C에서 30분간 중탕시킨 후 UV/VIS Spectrophotometer (Optizen 3220UV, Mecasy Co.Ltd, Korea)를 이용하여 667 nm의 파장에서  $NH_4$ -N를 측정하였다. 그리고 질산태 질소 ( $NO_3$ -N)는 brucine법 (Wolf, 1944)으로 측정하였다. 침출액 5 mL에 30% NaCl 1 mL와 5 mL  $H_2SO_4$  (4:1  $H_2SO_4$ : $H_2O$ )을 넣고 혼합한 후 10분간 수냉한 다음 brucinesulfonic acid 0.25 mL

를 가하여 90°C에 20분간 중탕시킨 후, 수냉으로 충분히 식힌 다음 UV/VIS Spectrophotometer를 이용하여 410 nm의 파장에서  $NO_3$ -N를 측정하였다.

## 3. 통계분석

본 연구에서 기술통계를 포함한 통계분석은 SPSS 20.0 (IBM, USA)을 이용하였다. 작물재배시험 결과에서 배액처리에 따른 처리구 평균간 유의성 검정은 분산분석 (ANOVA)을 실시한 뒤, 사후검정방법으로 최소유의차 (Least Significant Difference, LSD)와 Duncan의 다중범위검정 (Duncan's Multiple Range Test, DMRT)을 적용하여 5% 수준에서 실시하였다.

## III. 결과 및 고찰

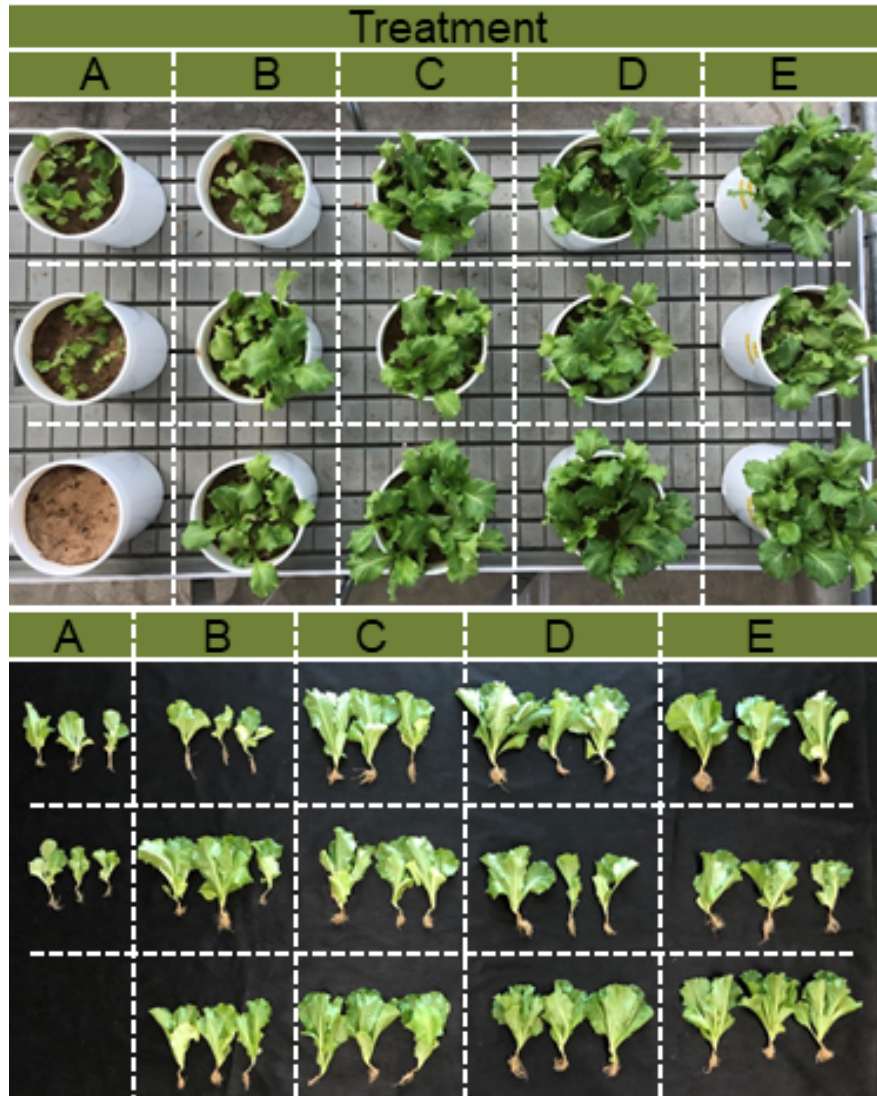
### 1. 대상 온실배액의 화학적 특성

본 연구에서 사용한 온실배액의 화학적 특성 분석결과는 Table 1에 제시하였다. 온실배액은 pH 6.0, EC 2.4 dS/m로 나타났다 (Table 1). 그리고 온실배액은 총인 (T-P) 28 mg/L와 함께 암모늄태 질소 ( $NH_4$ -N) 5.0 mg/L, 질산태 질소 ( $NO_3$ -N) 301 mg/L를 함유하였으며, 이는 온실배액 내 질소는 대부분 질산태 질소로 존재한다는 선행연구들의 보고내용들과 일치하는 결과이다 (Park et al., 2008; Hong et al., 2009). 수질오염물질의 배출허용기준 (청정지역 제외)이 총인 및 총질소가 각각 8, 60 mg/L 이하인 것을 고려해 본다면 (KMoe, 2020), 대상 온실배액 내 인과 질소 성분은 해당 오염기준을 초과하는 매우 높은 농도로 함유되어있는 것을 알 수 있다.

### 2. 대상작물의 생육특성

Fig. 3은 작물재배시험에서 수확 당일 포트 내 대상작물의 전경 그리고 수확 후 생육조사 전경을 배액의 처리구별로 구분하여 나타낸 것이다. 여기서 비료처리를 하지 않은 무처리구 (A)는 육안으로도 쉽게 확인이 가능할 정도로 다른 처리구들에 비해 대상작물의 생육이 매우 불량하였는데 3 반복 처리구들 중 1개의 처리구에서는 대상작물의 생육이 거의 이루어지지 않았다 (Fig. 3).

Table 3은 화학비료 및 배액처리에 따른 대상작물의 생육특성 지표값들을 나타낸 것이다. 대상작물에 대한 모든 생육특성 지표값들은 비료를 적용하지 않은 무처리구 (A)보다 화학비료 및 배액을 적용한 처리구들이 통계적으로 유의하게 높게 나타났다. 따라서 이후의 기술부터는 무처리구 (A)에 대한 설명은 대부분 생략하고 일반 화학비료만을 적용한 관행 처리구 (B)와 화학비료 및 배액을 적용한 처리구들 (C, D, E)



**Fig. 3** Growth characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata*) depending on nitrogen fertilizer (NF) and hydroponic waste solution (HWS) application rates in the Wagner pot experiment. A: non-treatment; B: NF 100%; C: NF 70% + HWS 30%; D: NF 50% + HWS 50%; E: NF 30% + HWS 70%

**Table 3** Growth parameters of lettuce depending on nitrogen fertilizer (NF) and hydroponic waste solution (HWS) application rates in the Wagner pot experiment

Treatment	Fresh weight (g)	No. of leaves (/plant)	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Root length (cm)
A	1.98 ± 0.76 a*	5.50 ± 1.22 a	11.0 ± 1.64 a	10.3 ± 1.33 a	4.52 ± 0.67 a	5.75 ± 0.53 a
B	7.80 ± 6.30 b	7.56 ± 2.30 b	13.8 ± 3.19 b	13.3 ± 3.01 b	7.22 ± 1.91 b	8.10 ± 1.66 b
C	13.5 ± 4.00 bc	9.11 ± 1.05 b	18.0 ± 1.55 c	16.8 ± 1.22 c	8.72 ± 0.90 b	8.97 ± 1.18 b
D	16.3 ± 10.1 c	9.22 ± 2.73 b	16.7 ± 1.82 c	15.1 ± 1.34 bc	8.86 ± 2.07 b	9.48 ± 1.36 b
E	14.6 ± 5.88 bc	8.89 ± 1.76 b	15.9 ± 1.92 c	14.9 ± 1.75 bc	8.81 ± 1.32 b	9.06 ± 1.92 b

\*Mean ± SD (n=9) separation within cloumns by Duncan's multiple range test at  $p=0.05$ , SD: standard deviation, A: non-treatment; B: NF 100%; C: NF 70% + HWS 30%; D: NF 50% + HWS 50%; E: NF 30% + HWS 70%.

을 중점적으로 비교하여 배액의 비효평가에 대한 결과들을 설명하고자 한다.

대상작물의 생체중의 경우 화학비료 및 배액을 함께 적용한 C, D, E 처리구들이 관행처리구 (B)보다 모두 높게 나타났다 (Table 3). 그리고 이 처리구들 (C, D, E) 중에서 D 처리구는 생체중이 가장 높았으며, 또한 유일하게 관행처리구보다 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다 ( $p < 0.05$ ) (Table 3). 이밖에 엽수, 초장, 엽장, 엽폭 및 근주 등 생육특성 지표값들도 모두 공통적으로 C, D, E 처리구들이 관행처리구 (B)보다 모두 높게 나타났다. 그러나 생육특성 지표값들에 따라 처리구들 간에 통계적 유의성은 차이가 있었다. 먼저 엽수의 경우 관행처리구 (B)와 C, D, E 처리구들 간에는 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Table 3). 초장의 경우는 C, D, E 처리구들이 관행처리구 (B)보다 모두 통계적으로 유의하게 높게 나타났으며 ( $p < 0.05$ ) (Table 3), 그 중 C 처리구에서 초장은 배액 처리구들 (C, D, E) 간에 통계적으로 유의한 차이는 없었지만 가장 높게 나타났다 (Table 3). 엽장의 경우 C 처리구가 가장 높았으며, 배액 처리구들 (C, D, E) 중 유일하게 관행처리구 (B)와 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ( $p < 0.05$ ). 그리고 엽폭 및 근주의 경우 배액 처리구들 (C, D, E) 간에는 모두 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Table 3). 이상과 같이 대상작물인 상추의 생육은 질소 (요소) 비료만을 처리한 관행처리구 (B)와 비교해 볼 때 C 및 D 처리구가 생육특성 지표값이 차이가 없고 오히려 몇몇 항목에서는 높아 생육이 매우 양호한 것으로 나타났다.

### 3. 토양의 화학성 변화

Table 4는 작물재배시험에서 대상작물을 수확한 후, 각 처리구 내 토양에 대하여 화학적 특성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 대부분의 분석항목들은 비료를 전혀 적용하지 않은 무처리구 (A)보다 화학비료 및 배액을 적용한 처리구들 (B~E)이 통계적으로 유의하게 높게 나타났다. 이후의 기술부터는 앞에서 먼저 기술한 대상작물의 생육특성 지표값들을 설명한 방식과 유사하게 무처리구는 생략하고 관행처리구 (B)를 포함한 다른 처리구들의 결과에 대해서 대부분 설명하고자 한다.

토양 pH는 각 처리구별로 5.64~6.15 정도로 나타났으며 (Table 4), 상추재배 토양의 적정 pH 범위는 5.8~6.6 정도이다 (NASS, 2010). 배액 처리구들 (C, D, E)은 관행처리구 (B)보다 다소 높은 pH 값을 보였으며, 이 중에서 C 처리구가 가장 높은 pH를 보였으나 배액처리구들 간에는 통계적인 유의한 차이는 나타나지 않았다 (Table 4). EC는 각 처리구별로 0.26~1.42 dS/m 정도로 모든 처리구는 상추재배 적정 EC값 범위 ( $< 2$  dS/m)를 유지하였다 (NAAS, 2010). 관행처리구 및 배액 처리구들 (B~E)은 무처리구와 비교하여 상대적으로 모두 EC가 크게 높았으며, E 처리구를 제외하면 대부분의 처리구에서 유의한 차이가 나타났다 ( $p < 0.05$ ) (Table 4). 이는 앞서 기술한 토양 pH 결과와 함께 설명이 가능하며, 화학비료 및 배액처리로 인해 무기염류가 토양에 흡착 또는 집적되어 염농도가 증가하였기 때문인 것으로 판단되었다 (Miller and Donahue, 1990; Brady and Weil, 1999; Park et al., 2005). 그리고 관행처리구 (B)를 기준으로 화학비료 70% 및 배액 30%를

**Table 4** Chemical properties of the soil as affected by nitrogen fertilizer (NF) and hydroponic waste solution (HWS) application rates in the Wagner pot experiment after lettuce growth

Treatments	pH (1:5)	EC (dS/m)	NO <sub>3</sub> -N (mg/kg)	NH <sub>4</sub> -N (mg/kg)	AV. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	OM (g/kg)	Ex.cation (cmol <sub>c</sub> /kg)			
							K	Ca	Mg	Na
A	5.64±0.23 a	0.26±0.08 a	2.11±0.81 a	2.89±0.36 a	10.8±0.53 a	3.64±0.25 a	0.01±0.01 a	2.59±0.07 a	1.11±0.05 a	0.09±0.01 b
	5.65±0.24 ab	1.12±0.29 bc	92.1±6.04 d	3.11±0.52 a	16.4±2.6 ab	3.69±0.98 a	0.05±0.05 a	2.77±0.14 a	1.44±0.05 b	0.07±0.01 ab
B	6.15±0.39 b	1.42±0.28 c	77.8±4.65 c	3.09±0.52 a	28.8±12.9 b	3.14±0.99 a	0.03±0.01 a	3.11±0.22 b	1.66±0.16 c	0.10±0.02 b
	6.10±0.22 ab	1.02±0.44 bc	66.5±10.9 c	2.72±0.45 a	19.2±3.8 ab	3.17±0.44 a	0.06±0.03 a	2.79±0.20 a	1.43±0.16 b	0.07±0.04 ab
C	5.86±0.17 ab	0.72±0.09 ab	31.9±9.51 b	2.72±0.28 a	22.1±4.7 ab	3.22±0.54 a	0.06±0.04 a	2.59±0.11 a	1.28±0.07 ab	0.04±0.01 a

\*Mean ± SD (n=9) separation within cloumns by Duncan's multiple range test at  $p=0.05$ . SD: standard deviation. OM: organic matter. A: non-treatment; B: NF 100%; C: NF 70% + HWS 30%; D: NF 50% + HWS 50%; E: NF 30% + HWS 70%.

적용한 처리구 (C)가 다른 처리구들에 비해 pH뿐만 아니라 EC 값의 증가폭도 가장 높게 나타났다. Park et al. (2005)은 배액 및 질소 (요소) 비료를 본 연구와 대부분 유사한 혼합비율로 토양에 처리하여 고추에 대한 비효를 평가하였다.

암모늄태 질소 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )는 각 처리구별로 2.89~3.11 mg/kg 정도로 농도 값의 차이는 매우 미미하였으며 (Table 4), 또한 무처리 (A)를 포함한 모든 처리구들 간의 통계적 유의한 차이는 없었다. 토양 내에서 암모늄태 질소의 주요 생성 및 소모 반응은 일반적으로 암모니아화 작용 (ammonification), 식물의 질소 흡수 그리고 질산화 과정 등이 있다. 요소는 토양 내에서 암모니아화 및 질산화 과정을 거쳐 작물이 이용할 수 있는 무기물 형태인 암모늄태 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 및 질산태 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 질소로 전환되는데 요소는 초기에 빠르게 가수분해되어 많은 암모늄태 질소를 생성하게 된다 (Kim et al., 2020). 그러나 질산화 과정 ( $2\text{NH}_4^+ + 4\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+ + \text{Energy}$ )을 통해 암모늄태 질소는 질산태 질소로 전환되기 때문에 초기 생성된 암모늄태 질소의 함량은 시간에 따라 감소할 것이며, 반면에 질산태 질소는 이 과정에서 증가하게 될 것이다. Table 4에서 화학비료 및 배액 처리구들 (B, C, D, E)이 무처리구 (A)와 비교하여 암모늄태 질소의 함량 차이가 미미하다는 것은 작물재배시험 중 토양 내 요소의 무기화로 생성된 암모늄태 질소가 질산태 질소로 산화 그리고 대상 작물의 질소 흡수로 인하여 무처리구 (A)와 비슷한 수준으로 감소되었음을 시사할 수 있다.

질산태 질소 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 각 처리구별로 2.11~92.1 mg/kg 정도로 처리구들 간에 농도 값의 차이가 상대적으로 매우 컸으며 (Table 4), 또한 처리구들 간에 통계적으로 유의한 차이를 많이 나타내었다. 이러한 질산태 질소의 각 처리구별 분포 경향은 앞서 설명했던 암모늄태 질소와는 크게 구별되었다. 질산태 질소의 농도 값은 처리구들 중 B 처리구가 유의하게 가장 높았으며, E 처리구가 가장 낮게 나타났다 ( $p < 0.05$ ) (Table 4). 그리고 C 및 D 처리구간에는 유의한 차이를 보이지 않았다. 처리구별 토양 내 질산태 질소의 분포 경향은 B (92.1 mg/kg) > C (77.8 mg/kg) > D (66.5 mg/kg) > E (31.9 mg/kg) 처리구 순으로 배액의 처리량이 적을수록 높은 질산태 질소의 농도 값을 보였다. 요소는 암모니아화 작용 및 질산화 과정을 통해 암모늄태 질소를 거쳐 질산태 질소로 전환된다. 따라서 요소의 처리량이 많을수록 최종적으로 전환되는 질산태 질소의 함량이 높을 수 있다. 그러나 요소의 처리량이 많을수록 무기화 속도가 상대적으로 더 느리고 그 결과 질산태 질소로 전환되는 속도가 느려 토양에 더 잔류할 수 있을 것이다. 반면에 배액은 그 처리량이 많을수록 Table 1에 제시된 바와 같이 대상 온실배액 내 질소는 작물이 가장 이용하기 쉬운 형태인 질산태 질소로 대부분 존재하기 때문에 암모니아화

작용 및 질산화 과정을 거칠 필요가 없고, 게다가 질산태 질소는 토양 내에서 이동성이 매우 크기 때문에 (Johnson and Cole, 1980), 최종적으로 토양에 잔류하는 양은 더 적을 수 있을 것이다. 따라서 Table 4에 나타난 각 처리구별 토양 내 질소태 질소의 분포 경향은 이상과 같이 기술된 바에 의해 설명될 수 있을 것으로 판단된다.

유효인산 (AV.  $\text{P}_2\text{O}_5$ )은 각 처리구별로 10.8~28.8 mg/kg 정도로 무처리 (A)를 제외한 모든 처리구들 간에 유의한 차이를 보이지 않았다 (Table 4). 마지막으로 유기물 (OM)은 각 처리구별로 3.14~3.69 g/kg 정도로 농도 값의 차이는 매우 미미하였으며, 또한 무처리 (A)를 포함한 모든 처리구들 간의 통계적 유의한 차이는 없었다 (Table 4).

본 연구의 범위에서는 각 처리구별 토양 내 질산태 질소의 잔류농도의 차이에 대한 주요 원인이 작물의 질소 흡수 또는 용탈 인지에 대해서 직접적으로 확인 및 판단하기는 어렵다. 다만 본 연구 및 관련 선행연구의 결과를 토대로 다음과 같은 추론이 가능할 것으로 판단된다.

작물재배시험에서 상추의 생육은 관행처리구 (B)와 비교해 볼 때 C 및 D 처리구가 생육특성 지표값이 대부분 높아 생육이 양호한 것으로 나타났다 (Table 3). C 및 D 처리구는 각각 질소 (요소) 비료 70% + 배액 30% 및 질소 (요소) 비료 50% + 배액 50%를 토양에 처리한 것이며, 이는 Park et al. (2005)이 보고한 내용과 유사한 결과이다. Park et al. (2005)은 해당 동일한 질소비료 및 배액의 혼합비율로 토양에 적용한 처리구들에서 재배된 대상작물인 고추의 생육이 가장 양호하다고 보고하였으며 (특히 C 처리구), 이러한 원인은 해당 처리구들에서 대상작물 (고추)의 질소 흡수량이 상대적으로 높았기 때문임을 확인하였다. 따라서 본 연구의 C 및 D 처리구 (특히 C 처리구)에서 상추가 상대적으로 양호한 생육을 나타낸 것은 해당 처리구들에서 상추의 질소 흡수량이 상대적으로 높았기 때문으로 예상된다.

이상의 각 처리구별 대상작물의 생육특성과 함께 Table 4에 제시된 토양 화학성 분석결과에서 각 처리구별 토양 내 무기태 질소 ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ )의 함량은 주로 암모니아화 작용, 작물의 질소 흡수 및 질산화 과정을 통한 질소의 생성 및 소모 반응의 결과일 것이다. 앞에서 먼저 설명했듯이 요소비료는 토양 내에서 무기화 반응 및 질산화 과정을 거쳐야만 무기태 질소가 생성되고, 반면 온실 배액은 질산태 질소로 대부분 존재하기 때문에 무기화 반응 및 질산화 과정이 필요 없다. 따라서 각 처리구별로 해당 질소 (요소) 비료 및 배액의 혼합비율에 따라 무기화 및 질산화 속도가 다를 것이며, 이로 인하여 식물의 질소 흡수량 그리고 토양 내 질산태 질소의 잔류량의 차이가 날 것이다. Table 4에서 각 처리구별 토양 내 질산태 질소의 함량

은 무처리구 (A)를 제외한 B, C, D, E 처리구가 각각 92.1, 77.8, 66.5, 31.9 mg/kg으로 나타났다. 요소비료만을 적용한 관행처리구 (B)의 토양에서 가장 높은 질산태 질소의 농도를 나타내었는데 이는 B 처리구가 다른 처리구에 비해 상대적으로 질소 무기화 속도가 느리고 그 결과 질산태 질소로 전환되는 속도도 느리게 되는 완효적인 특성을 보인 것으로 판단된다. C 및 D 처리구는 B 처리구보다 토양 내 축적된 질산태 질소의 함량이 유의하게 낮게 나타났는데 이는 해당 두 처리구에서 상추의 생육이 가장 양호하였고 (Table 3), 관련 선행연구의 결과를 고려해 볼 때 (Park et al., 2005), C 및 D 처리구가 상대적으로 B 처리구보다 암모니아화 작용 및 질산화 속도가 빠르고 작물의 질소 흡수량도 상대적으로 높았기 때문인 것으로 예상된다. 반면 처리구들 중 배액의 처리량이 가장 높은 E 처리구에서는 토양 내 질산태 질소의 함량이 가장 낮았으며, 다른 처리구들과 뚜렷한 차이를 보였다 (Table 4). 이는 토양 내에서 더 잔류할 수 있는 요소비료의 처리량이 가장 낮고 이동성이 높아 용탈 가능성이 높은 질산태 질소로 대부분 존재하는 배액의 처리량이 가장 높았기 때문으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 양액재배 온실로부터 발생되는 배액 (폐액)에 대한 처리방안으로서 농업적 이용을 위한 배액의 비효평가를 작물재배시험을 통해 수행하였다. 배액의 비효평가는 배액 내 가장 많이 함유되어있는 무기질소를 기준으로 수행되었으며, 질소 (요소) 비료와 함께 배액의 토양 처리에 따른 대상작물인 상추의 생육 특성과 토양의 화학적 특성 변화를 조사하였다.

작물재배시험에서 대상작물인 상추의 생육은 질소 (요소) 비료 70% 및 배액 30%를 적용한 C 처리구와 질소 (요소) 비료 50% 및 배액 50%를 적용한 D 처리구가 질소 (요소) 비료 100%를 적용한 관행처리구 (B)와 비교하여 대상작물의 생육이 가장 양호하였으며, 이는 고추를 재배한 선행연구와 유사한 결과로 본 연구에서는 해당 질소 (요소) 비료와 배액의 혼합비율에서 작물의 생육이 질소 (요소) 비료만을 적용한 관행 처리구보다 더 양호하다는 것을 상추를 재배하여 다시 한 번 확인을 하였다.

토양 화학성의 경우 토양 내 질산태 질소의 잔류함량에 대하여 각 처리구들 간에 서로 뚜렷한 차이를 보였는데 이는 암모니아화 작용, 질산화 과정, 작물의 질소 흡수 및 질산태 질소의 용탈 등과 같은 질소의 생성 및 소모 반응의 결과이며, 각 처리구별 질소비료 및 배액의 혼합비에 따라 질소의 생성 및 소모 반응의 차이에 의하여 토양 내 질산태의 질소의 잔류함

량은 뚜렷하게 차이를 보이는 것으로 판단된다.

이상의 본 연구에서는 작물재배를 위하여 화학비료와 함께 배액의 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 배액 내 대부분 존재하고 있는 질산태 질소는 토양 내 용탈 가능성이 높기 때문에 국내에서는 토경재배용 비료로서 활용성이 상대적으로 떨어지는 것으로 인식되어 있다. 그러나 요소비료와 배액의 적정량을 조합하여 활용한다면 용탈의 문제가 보완되고 작물재배에 있어 유용한 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 향후 연작에 의한 배액의 처리효과, 주변 환경에 대한 영향평가, 질소 (요소) 비료와 배액의 적정 시비방법 등의 연구가 필요하며, 이 연구를 통해 배액의 지속적인 재활용 처리가 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ014190022021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

#### REFERENCES

- Allison, L., 1965. Organic carbon. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*. 9: 1367-1378.
- Brady, N. C., and R. R. Weil, 1999. *The nature and properties of soils*, 12th ed., Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, pp. 347-348.
- Bremner, J. M., 1965. Total nitrogen. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. 9: 1149-1178.
- Hong, K. C., B. Choi, K. J. Lim, J. H. Won, S. J. Jeon, S. O. Hur, S. K. Ha, N. W. Kim, J. E. Yang, and Y. S. Ok, 2009. Effects of reclaimed wastewater and waste nutrient solution irrigation on seedling growth of Chinese cabbage. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 28 (2): 171-178 (in Korean). doi:10.5338/KJEA.2009.28.2.171.
- Horticulture, 2020. <http://www.hortitimes.com/news/articleView.html?idxno=25390>. Accessed 01 July 2020.
- Horticulture, 2021. <http://www.hortitimes.com/news/articleView.html?idxno=20963>. Accessed 01 July 2020.
- Johnson, D. W., and D. W. Cole, 1980. Anion mobility in soils: relevance to nutrient transport from forest ecosystems. *Environment International* 3(1): 79-90. doi:10.1016/0160-4120(80)90040-9.



8. Kim, D. H., Y. J. Kang, J. J. Choi, and S. I. Yun, 2020. Lettuce growth and nitrogen loss in soil treated with corn starch carbamate produced using urea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 53(1): 13-21 (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2020.53.1.013.
9. Korea Ministry of Environment (KMoE), 2020. Water Quality Conservation Act. Sejong, Korea.
10. Lee, E. M., S. K. Park, B. C. Lee, H. C. Lee, H. H. Kim, Y. U. Yun, S. B. Park, S. O. Chung, and J. M. Choi, 2019. Changes in inorganic element concentrations in leaves, supplied and drained nutrient solution according to fruiting node during semi-forcing hydroponic cultivation of 'Bonus' tomato. *Protected Horticulture and Plant Factory* 28(1): 38-45 (in Korean). doi:10.12791/KSBEC. 2019.28.1.38.
11. Lee, S., and Y. C. Kim, 2019. Water treatment for closed hydroponic systems. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 41(9): 501-513 (in Korean). doi: 10.4491/KSEE.2019.41.9.501.
12. Lee, Y. J., and J. B. Chung, 2006. Comparison of nitrate accumulation in lettuce grown under chemical fertilizer or compost applications. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 25(4): 339-345 (in Korean). doi:10.5338/KJEA.2006.25.4.339.
13. Miller, R. W., and R. L. Donahue, 1990. Soils: an introduction to soils and plant growth, 6th ed., Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, pp. 106-110.
14. Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2019. Greenhouse status and vegetable production of facilities in 2019. Sejong, Korea.
15. NAAS (National Institute of Agricultural Sciences), 2010. Fertilizer recommendation standard for various crop. RDA, Jeonju, Korea.
16. Park, C. J., J. E. Yang, K. H. Kim, K. Y. Yoo, and Y. S. Ok, 2005. Recycling of hydroponic waste solution for red pepper (*Capsicum annuum L.*) growth. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 24(1): 24-28 (in Korean). doi:10.5338/KJEA.2005.24.1.024.
17. Park, W. Y., D. C. Seo, J. S. Lim, S. K. Park, J. S. Cho, J. S. Heo, and H. S. Yoon, 2008. Optimum configuration, filter media depth and wastewater load of small-scale constructed wetlands for treating the hydroponic waste solution in greenhouses. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 27(3): 217-224 (in Korean). doi:10.5338/KJEA. 2008.27.3.217.
18. Kumar, R. R., and J. Y. Cho, 2014. Reuse of hydroponic waste solution. *Environmental Science and Pollution Research International* 21(16): 9569-9577. doi:10.1007/s11356-014-3024-3.
19. RDA (Rural Development Administration), 2000. Methods of soil chemical analysis. Suwon, Korea.
20. Roh, M. Y., 2003. Nutrient solution recycling in closed hydroponics. *Protected Horticulture and Plant Factory* 16(2): 35-42 (in Korean).
21. Roh, M. Y., Y. B. Lee, H. S. Kim, K. B. Lee, and J. H. Bae, 1997. Development of nutrient solution suitable for closed system in substrate culture of cucumber. *Protected Horticulture and Plant Factory* 6: 1-14 (in Korean).
22. Searle, P. L., 1984. The berthelot or indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen. *Analyst* 109: 549-568. doi:10.1039/AN9840900549.
23. Son, J., D. Choi, M. Kong, S. Yun, and M. Park, 2019. The water quality and purification load assessment of drain water of facility horticulture areas. *Journal of Environmental Science International* 28(12): 1199-1208 (in Korean). doi:10.5322/JESI.2019.28.12.1199.
24. Sonneveld, C., and W. Voogt, 2009. Plant nutrition of greenhouse crops. pp. 83-102. New York. USA.
25. Uronen, K. R., 1995. Leaching of nutrients and yield of tomato plants grown in closed hydroponic systems development on the EC-level. *Acta Horticulturae* 401: 443-449. doi:10.17660/ActaHortic.1995.401.54.
26. Wolf, B., 1944. Determination of nitrate, nitrite, and ammonium nitrogen rapid photometric determination in soil and plant extracts. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition* 16: 446-447. doi:10.1021/i560131a013.