

열무 재배를 위한 시설하우스 폐양액의 비료 효과

홍영신¹ · 문종필² · 박민정² · 손진관¹ · 윤성욱^{2*}

¹국립농업과학원 농업공학부 박사후연구원, ²국립농업과학원 농업공학부 농업연구사

Fertilizer Effect of Waste Nutrient Solution in Greenhouses for Young Radish Cultivation

Youngsin Hong¹, Jongpil Moon², Minjung Park², Jinkwan Son¹, and Sungwook Yun^{2*}

¹Postdoctoral Researcher, Division of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju 54875, Korea

²Research Officer, Division of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju 54875, Korea

Abstract. The purpose of this study is to enhance utilization of the waste nutrient solution (WNS) disposed at the hydroponic greenhouse. Several sets of testing were conducted to examine the effects of WNS: (a) a fertilizer effect, (b) soil column leaching, and (c) crop cultivation. The fertilizer effect test was applied in young radish cultivation by examining the growth characteristics of young radish and soil based on inorganic nitrogen according to the soil treatment of the nitrogen fertilizer (NF) and the WNS. The fertilizer effects and crop cultivation test were conducted with five treatments (A-E): A, non-treatment (water); B, 100% of NF; C, 70% of NF + 30% of WNS; D, 50% of NF + 50% of WNS; and E, 30% of NF + 70% of WNS. The soil column leaching test was conducted with three treatments: non-treatment (water), 100% of NF, 50% of WNS + 50% of NF. As a result, the chemical properties of the WNS were pH 6.0, EC 2.4dS·m⁻¹, total phosphorus (T-P) 28mg·L⁻¹, ammonium nitrogen (NH₄-N) 5.0mg·L⁻¹, and nitrate nitrogen (NO₃-N) 301mg·L⁻¹. The chemical properties of the soil were pH 5.51, EC 0.31dS/m, organic matter 2.08g·kg⁻¹, NO₃-N 9.64mg·kg⁻¹, and NH₄-N 3.20mg·kg⁻¹. The results of fertilizer effects showed that the ratio of 50% or less of NF and 50% or more of WNS was high in young radish growth. There was no statistically significant difference between the soil chemistry in the C-E treatments where WNS was mixed with NF and the B treatment where only NF was applied. As a result of the soil column leaching test, there was no significant difference in the concentrations of NO₃ and NH₄ in the treatment of 100% of NF and 50% of NF + 50% of WNS. The study indicates, if the mixed fertilizer of WNS and NF is applied in the soil cultivation of young radish, it will reduce the use of NF and environmental pollution. This also helps reduce production costs on farmers and increase the yield of young radish.

Additional key words: fertilizer, greenhouse, reuse, soil, waste nutrient solution

서 론

양액재배는 토양 대신 암면, 코이어, 피트모스, 펄라이트 등의 고품배지에 작물을 고정하고, 작물생육에 필요한 다양한 원소를 함유한 양액을 적정 농도로 희석하여 일정하게 공급하는 재배 방법이다(Lee와 Rho, 1998; Lim 등, 2019). 양액재배는 토경재배에 비하여 안정적 영양공급, 적합한 재배환경, 토양의 연작 피해 감소, 작물 생산량 및 품질 향상 등 다양한 이점이 있다(Sonneveld와 Voogt, 2009; Lee 등, 2019; Lee와 Kim, 2019). 또한, 미래농업으로 주목하는 스마트 온실과 식

물공장에서 양액재배는 작물 재배시스템의 중요 부분으로 1990년대 이후 정부의 시설원예 사업에 대한 집중 지원과 작물 생산성과 상품성 향상에 대한 농가의 요구로 앞으로도 지속해서 확대될 것이다(Horticulture, 2020, 2021). 국내 양액재배 면적은 지속해서 증가했으며, 1993년에는 23ha였으나 2019년에는 시설채소 재배면적 55,407ha의 6.3% 정도인 3,489ha로 증가하였다(Park 등, 2005; MAFRA, 2019; Horticulture, 2020).

양액재배는 폐양액의 처리방식에 따라 순환식과 비순환식으로 나누었는데, 순환식 양액재배는 사용한 폐양액을 회수해 살균 정화 처리 후 작물재배에 원수로 재사용하는 방식이며, 비순환식은 폐양액을 재사용하지 않고 버리는 방식이다. 양액재배 도입 초기부터 비순환식 양액재배 시 작물에 공급

*Corresponding author: wookwooks@korea.kr

Received September 27, 2022; Revised October 21, 2022;

Accepted October 24, 2022

후 발생하는 폐양액은 주변 토양이나 하천 등으로 유입되어 지하수나 하천의 부영양화 우려가 있다(Uronen, 1995; Rho 등, 1997; Roh, 2003; Park 등, 2005; Kumar와 Cho, 2014; Lee와 Kim, 2019). Uronen(1995)와 Hong 등(2009)은 공급 양액의 주요 영양성분 중 질소의 57-67% 정도만 작물에 흡수되고 나머지는 그대로 배출된다고 하였다. 비순환식 폐양액은 수질환경보전법 상 폐수로 분류될 수 있으며, 청정지역을 제외하고 수질오염물질의 배출허용기준은 총 질소 60mg·L⁻¹와 인 8mg·L⁻¹ 이하로 규제하고(KMoE, 2020) 있으나, 비순환식 폐양액 내 총 질소와 인의 평균농도는 해당 배출허용기준을 초과하는 것으로 나타났다(Lee 등, 2006; Hong 등, 2009; Son 등, 2019). 또한, Son 등(2019)은 비순환식 폐양액 내 질소의 평균농도가 333mg·L⁻¹와 인의 평균농도가 60.5mg·L⁻¹로 오염기준을 크게 초과하는 것으로 보고하였다. Hong 등(2009)은 비순환식 양액재배 온실의 폐양액으로 발생하는 주변 환경오염과 부화를 저감시키기 위해서는 순환식 양액재배 시스템의 도입과 적용이 적절한 방안이라고 제시하였다. 그러나, 순환식 양액재배 시스템의 도입은 고비용으로 인한 농가 설치의 어려움(Park 등, 2005; Lee와 Kim, 2019), 의무사항이 아니라는 제도적 허점으로 인하여 순환식 양액재배 시스템의 보급률 5% 미만으로 낮은 수준이다(Lee와 Kim, 2019). 또한, 소규모로 운영되는 양액재배 농가의 대부분은 비순환식 양액재배 형태로 작물을 재배하고 있다.

국내 순환식 양액재배 시스템 관련 연구와 관련 시스템의 보급 및 확대는 많은 시간이 필요하고, 이를 이용한 재배 방법에 관한 연구가 필요하다. 또한, 순환식 양액재배 시스템의 보급이 많아질 때까지 폐양액의 처리 방법의 하나로 폐양액 내 함유량이 많으나 버려지는 질소 성분의 재활용이 필요하다(Yun 등, 2021). 이와 관련된 연구들은 대부분 폐양액의 재처리 후 원수로 재활용하는 것이며, 토경재배용 비료로 활용한 연구는 고추, 배추, 상추를 재배하였다(Park 등, 2005; Hong 등, 2009; Yun 등, 2021). 이 연구들은 폐양액을 토양에 처리하여 작물을 재배한 후 작물의 생육특성과 토양 화학성 변화에 대한 검토만 이루어졌으며, 폐양액 처리에 따른 환경적 영향은 고려되지 않았다.

토양 내에서 암모늄태 질소의 주요 생성과 소모 반응은 일반적으로 암모니아화 작용(ammonification)으로, 식물의 질소 흡수와 질산화 과정을 거치면서 작물이 흡수할 수 있는 형태인 암모늄태(NH₄-N)와 질산태(NO₃-N) 질소로 전환되는데 질소비료는 초기에 빠르게 분해되면서 많은 암모늄태 질소를 생성하게 된다(Kim 등, 2020). 그러나 질산화과정에서 NH₄-N는 NO₃-N로 전환되기 때문에 초기 생성된 NH₄-N의 함량은 시간에 따라 감소하고, 반면에 NO₃-N는 증가하게 된다. 폐양

액 내 질소는 대부분 작물이 가장 흡수하기 쉬운 NO₃-N 형태로 암모니아화나 질산화 과정을 거치지 않아도 된다. 또한, NO₃-N은 토양 내에서 이동성이 상당히 높아(Johnson과 Cole, 1980), 토양에 남아있는 NO₃-N의 양은 미량일 수 있다.

본 연구에서는 토마토 폐양액을 재배기간이 짧은 열무에 살포하여 재배효과를 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 폐양액 및 토양

본 연구에서 사용한 온실 폐양액은 국립농업과학원 농업공학부 토마토 양액재배 온실에서 폐양액을 채취하여 작물 재배 시험에 이용하였다. 채취한 폐양액에 대한 pH, EC, 미량원소 등 화학적 특성을 알아보기 위하여 각 관련 공정시험법에 따라 분석을 하였다(Allison, 1965; Bremner, 1965; Searle, 1984; RDA, 2000). 작물 재배시험에 사용한 토양은 국립농업과학원 농업공학부 시험포장 농경지에서 채취 후 일정한 두께로 pan에 고르게 퍼서 14일간 그늘에 말리고, 9.54mm 체에 걸러서 작물 재배시험과 토양컬럼 시험에 사용하였다.

2. 비료효과를 위한 작물 재배시험

작물 재배시험은 국립농업과학원 농업공학부에 있는 유리온실에서 ‘참맛치마’ 열무(*Raphanus sativus* L. ‘Chammatchima’)를 재배하는 방식으로 수행하였다. 열무는 직경 26cm, 높이 32cm의 와그너 포트(1/2,000a)에서 재배되었으며, 와그너 포트에 토양 충전방법은 맨 아랫층에 8cm 두께로 자갈 및 모래(표준사)를 채워서 여과층을 만들고, 그 위부분에 토양을 17cm 높이로 채워서 작토층을 만드는 방식으로 포트당 12kg의 토양을 채웠다(Fig. 1).

온실 폐양액에 대한 비료 효과시험은 폐양액에 함유된 질소 함량 300mg/L을 기준으로 수행되었다. 토양에 대한 폐양액의 처리는 무처리(물, A), 질소비료 100%(B), 질소비료 70% + 폐양액 30%(C), 질소비료 50% + 폐양액 50%(D), 질소비료 30% + 폐양액 70%(E) 처리구로 구분하여 각 처리구별 3반복으로 총 15개 와그너 포트에 난괴법으로 작물 재배시험을 실시하였다. 토양에 처리한 비료의 구성은 질소(N)는 46%, 인산(P)은 용과린(P₂O₅ 17%), 칼륨(K)은 염화加里(K₂O 60%) 그리고 칼슘(Ca)은 소석회를 이용하였다. 토양에 대한 비료의 처리량은 국립농업과학원의 작물별 시비처방 기준(NAAS, 2010)에 따라 밀거름과 웃거름을 시비하였다.

열무는 각 포트 내 토양에 밀거름을 처리하고 일주일 후에 파종하였으며, 웃거름은 3주 후에 처리하였다. 그리고 각 처리구 토양의 수분은 와그너 포트 내 토양의 함수율을 공극물의 45%



Fig. 1. Diagram for the soil layers in the wagner pot.

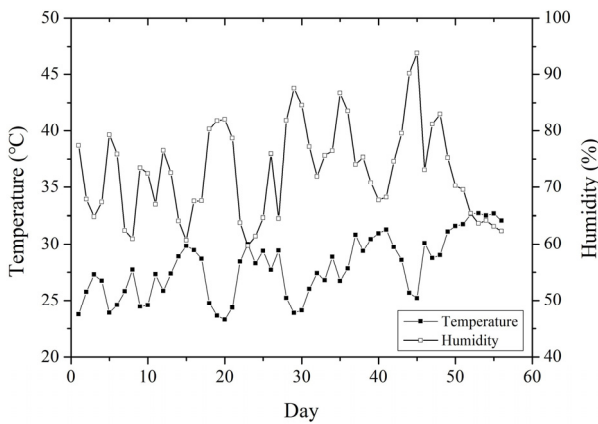


Fig. 2. Changes in average temperature and relative humidity during cultivation period in a glass type greenhouse.

로 유지될 수 있도록 재배기간 동안 4일 간격으로 처리구별 와그너 포트의 무게를 측정하여 유실된 수분의 양을 공급하였다.

Fig. 2는 작물 재배시험 실시한 유리온실의 온도 및 습도 환경을 나타낸 것이다. 작물 재배시험을 실시한 기간 동안 유리온실의 평균온도는 23.3 – 32.7°C, 상대습도는 59.7 – 93.9%로 나타났다.

3. 작물의 생육조사

열무의 생육조사는 밀거름 처리 후 7일에 파종, 후 58일에 처리구별로 조사하였다. 각 처리구에서 열무를 수확한 다음 3주씩 무작위로 선택하여 생체중, 엽수, 엽장, 엽폭, 근장, 근주(뿌리둘레)를 측정한 후, 처리구별 평균값으로 열무의 생육 특성을 비교하였다.

4. 토양 및 수질의 화학성 분석

토양에 대한 이화학성은 다음과 같은 방법으로 분석하였다. 토양 pH와 EC는 토양과 증류수 비율을 1:5로 추출하여 pH &

EC meter(Orion 550A, Thermo Electron Corp., Beverly, MA, USA)를 이용하여 측정하였다(RDA, 2000). 유기물 함량은 Walkley-Black법(Allison, 1965), 총질소(T-N) 함량은 Kjeldahl법(Bremner, 1965), 유효인산의 함량은 Lancaster법(RDA, 2000), 그리고 치환성 양이온(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+)은 1N NH_4 -acetate(pH 7) 침출법으로 추출하여 ICP-OES(Perkin Elmer model DV 4300, Shelton, CT, USA)로 분석하였다(RDA, 2000). NH_4 -N와 NO_3 -N의 함량은 토양시료 5g에 25mL의 2M KCl 용액을 가하여 30분 동안 진탕한 후 여과지(Whatman No. 2)로 여과하여 그 침출액을 NH_4 -N와 NO_3 -N분석에 이용하였다. NH_4 -N는 Indophenol-Blue 비색법을 이용하였으며(Searle, 1984), 침출액 2mL에 EDTA 용액 0.5mL, salicylate 용액 2mL, hypochlorite 용액 1mL와 증류수 7mL을 넣어 혼합하고, 37°C에서 30분간 중탕시키고, UV/VIS spectrophotometer(Optizen 3220UV, Mecasy Co., Ltd., Korea)를 이용하여 667nm의 파장에서 NH_4 -N를 측정하였다. NO_3 -N는 brucine법(Wolf, 1944)으로 측정하였으며, 침출액 5mL, 30% NaCl 1mL, 5mL H_2SO_4 (4:1 H_2SO_4 : H_2O)를 넣고 혼합한 후 10분간 물로 식힌 다음 brucinesulfanilic acid 0.25mL를 가하여 90°C에 20분간 중탕시킨 후, 물로 충분히 식혀서 UV/VIS spectrophotometer를 이용하여 410nm의 파장에서 NO_3 -N를 측정하였다.

폐양액과 침출수의 화학성은 진공펌프를 이용하여 채취한 시료를 수질 분석용 여과지(Whatman GF/C)로 여과시켜서, 관련수질오염 공정시험법(KMoE, 2020)과 표준시험법(Allison, 1965; Bremner, 1965; Searle, 1984; RDA, 2000)에 따라 pH, EC, NH_4 -N, NO_3 -N, 미량원소 등을 분석하였다.

5. 폐양액의 토양처리에 따른 환경적 영향 검토 (토양컬럼 시험)

폐양액에 대한 비료효과와 함께 폐양액과 질소비료를 적용

한 토양의 환경적 영향을 검토하기 위하여 토양컬럼 시험을 하였다. 모형 컬럼은 직경 6cm, 높이 63cm 및 두께 0.5cm의 아크릴로 제작되었다. 각 컬럼 내 토양의 처리방법은 45cm 높이까지 컬럼에 토양을 채워 넣었으며(Fig. 3), 이때 토양은 5층으로 나누어 각 층마다 2.38kg의 rammer를 이용하여 약 9cm 두께가 되도록 15회씩 타격을 가하는 다짐 방식으로 수행되었다. 컬럼 내 토양의 단위중량은 1.3g/cm³이다. 토양 충전시 각 컬럼 내 토양이 최대한 일정한 간극비를 갖도록 하여 토양공극의 크기로 인한 침출수 내 미량원소들의 농도나 그 밖에 이화학적 특성 등의 차이가 없도록 하였다.

컬럼 내 토양에 대한 폐양액의 처리방법은 작물 재배시험과 동일하게 폐양액에 함유된 질소함량(300mg·L⁻¹)을 기준으로 수행하였다. 토양에 대한 폐양액의 처리는 (1) 무처리, (2) 질소비료 100%, (3) 폐양액 50%+ 질소비료 50% 총 3개 처리구로 구분하였고, 각 3 반복 토양컬럼 처리구로 구성하여, 처리구별로 총 9개의 토양컬럼 시험을 하였다. 이때 질소비료의 처리량은 열무의 시비처방 기준(NAAS, 2010)에 따라 밀거름 2.6kg/10a와 웃거름 4.9kg/10a를 적용하였으며, 컬럼면적 28.26cm²를 기준으로 밀거름+웃거름(7.5kg/10a)를 함께 처리하는 형태로 처리구별로 폐양액과 질소비료를 적용하였다. 질소비료는 요소를 사용하였으며, 질소함량 46%를 고려하여 계산하였다. 토양컬럼 내 전체 공극(1 pore)은 약 648mL이며, 1 pore 간격으로 채취하였다.

각 토양컬럼에 대하여 무처리, 질소비료 100%, 질소비료 50%+폐양액 50%를 처리하고, 1주일 후에 류류수를 1mL·min⁻¹ 유속으로 흘려주는 방식으로 토양컬럼 시험을 하였다. 이때 작물의 연속재배를 고려하여 각 처리구마다 3컬럼씩 처리하여, 1주일 후에 다시 동일한 방식으로 컬럼시험을 수행하였으며, 총 3차례에 걸쳐 총 9 pore volume의 침출수를 채취하였다. 1 pore 간격으로 채취한 침출수에 대해서는 NO₃, NH₄ 등 폐양액에 많이 함유된 성분을 분석하였다.

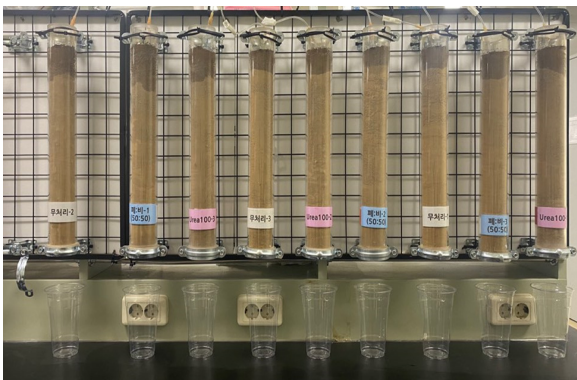


Fig. 3. The lab-column test.

6. 통계분석

본 연구에서 통계분석은 SPSS 20.0(IBM, USA)를 이용하였다. 각 처리구의 평균간 유의성 검정은 분산분석(Analysis of variance, ANOVA)을 실시한 뒤, 사후 검정방법으로 최소 유의차(Least Significant Difference, LSD)와 Duncan의 다중범위검정(Duncan's multiple range test, DMRT)을 적용하여 5% 수준에서 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 폐양액 및 토양의 화학적 특성

폐양액과 토양의 화학성 분석 결과는 Table 1과 2와 같다. 폐양액의 경우 pH 6.0, EC 2.4dS·m⁻¹, 총 인(T-P) 28mg·L⁻¹, 암모늄태 질소(NH₄-N) 5.0mg·L⁻¹, 질산태 질소(NO₃-N) 301mg·L⁻¹로 나타났다(Table 1). Park 등(2008)과 Hong 등(2009)이 비순환식 폐양액에 질소는 대부분 질산태라고 보고한 것과 같았으며, 폐양액의 인과 질소함량은 오염 기준값을 넘어서는 것으로 나타났다(KMoE, 2020). 토양의 경우는 pH 5.51, EC 0.31dS·m⁻¹, 유기물 2.08g·kg⁻¹, NO₃-N 9.64mg·kg⁻¹, NH₄-N 3.20mg·kg⁻¹으로 나타났다(Table 2).

2. 폐양액 처리에 따른 열무의 생육특성

비료와 폐양액을 처리하지 않은 A 처리구는 B-E 처리구들과 비교해 가시적으로 쉽게 확인이 가능할 정도로 열무의 생육이 매우 저조하였다(Fig. 4). 즉, 열무의 생육에는 원수를 그대로 사용하는 것보다 질소비료와 폐양액을 혼합하여 사용하

Table 1. Chemical properties of the waste nutrient solution used in the study.

Item	Concentration
pH	6.0
EC (dS·m ⁻¹)	2.4
NO ₃ -N (mg·L ⁻¹)	301
NH ₄ -N	5.0
T-P	28
K	335
Na	21.0
Ca	200
Mg	45.0
Fe	0.92
Mn	0.90
Zn	0.10
B	0.76
Cu	0.03

는 것이 효과적이었다. A 처리구의 생체중 2.87g에 비교해서 B-E 처리구는 23.1 - 31.7g로 나타났고, D와 E 처리구는 30g 이상 많은 것으로 나타났다(Table 3). 엽장과 엽폭도 A 처리구 7.61cm와 2.20cm에 비교하여 B-E 처리구 23.2 - 26.3cm와 5.87 - 6.74cm로 많이 큰 것으로 나타났다(Table 3). 엽수에서도 A 처리구 4.87개보다 B-E 처리구 9.22 - 10.6개로 많았다(Table 3). B와 C 처리구의 생체중, 엽장, 엽폭, 엽수, 뿌리 길이, 뿌리둘레가 D와 E 처리구보다 많거나 크게 나타난 것은 질소비료와 폐양액의 혼합비율에 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 질소비료 50% 이하와 폐양액 50% 이상의 비율이 열무 생육에 효과가 높은 것으로 판단된다. 또한, 농가에서 매년 사용하던 질소비료의 사용량 중 폐양액을 50% 이상 사용하면, 열무의 생산성 향상과 생산비 절감 효과를 기대할 수 있다.

3. 폐양액 처리에 대한 토양의 화학성 변화

열무를 재배한 토양의 이화학적 분석 결과는 Table 4와 같다. 토양 pH는 각 처리구별로 6.10 - 8.34로 나타났으며

(Table 4), 열무재배 토양의 적정 pH는 5.5 - 6.8이며 배수가 잘되고 충분한 수분을 함유한 토양에서 잘 자란다고 하였다 (NAAS, 2010). 토양 EC는 처리구별로 채소류 적정 EC 2.0dS·m⁻¹ 이하(NAAS, 2010)를 유지한 0.24 - 0.58dS·m⁻¹로 나타났다 (Table 4). 폐양액을 질소비료와 함께 혼합하여 적용한 C-E 처리구에서 토양의 이화학적 성은 질소비료만을 적용한 B 처리구와 통계적으로 유의한 차이가 없거나 비슷하게 나타났다. 각 처리구별 토양 내 무기태 질소(NH₄⁺, NO₃⁻)의 함량은 주로 무기화 반응, 작물의 질소 흡수와 질산화 과정을 통한 질소의

Table 2. Physico-chemical characteristics of the soil used in the study.

Item	Concentration
pH (1:5 with H ₂ O)	5.51
EC (dS·m ⁻¹)	0.31
Organic matter (g·kg ⁻¹)	2.08
Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	0.10
NO ₃ -N (mg·kg ⁻¹)	9.64
NH ₄ -N (mg·kg ⁻¹)	3.20
Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	16.38
Exchangeable cation (cmol _c ·kg ⁻¹)	
K	0.01
Ca	2.42
Mg	1.09
Na	0.04

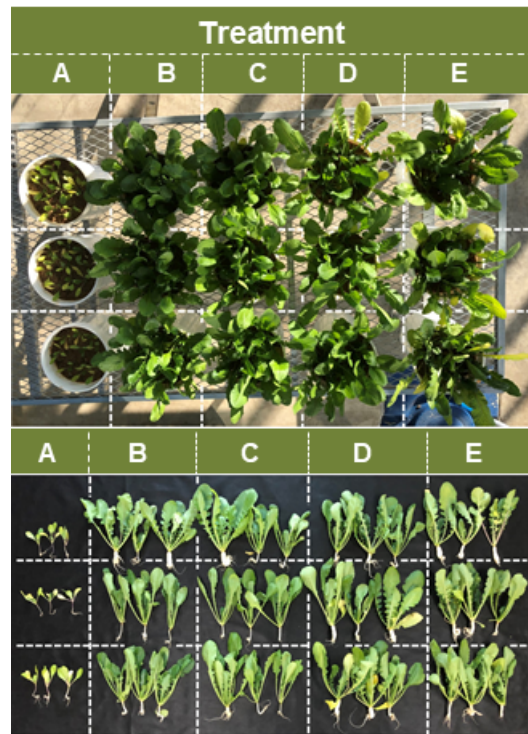


Fig. 4. Growth characteristics of young radish (*Raphanus sativus* L.) depending on nitrogen fertilizer (NF) and waste nutrient solution (WNS) application rates in the wagner pot. A: non-treatment; B: NF 100%; C: NF 70% + WNS 30%; D: NF 50% + WNS 50%; E: NF 30% + WNS 70%.

Table 3. Growth characteristics of young radish on nitrogen fertilizer (NF) and waste nutrient solution (WNS) application rates in the wagner pot.

Treatments	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves (/plant)	Fresh weight (g)	Root length (cm)	Root circumference (cm)
A	7.61 a ^z	2.20 a	4.87 a	2.87 a	11.3 a	1.17 a
B	23.2 b	5.87 b	9.22 b	23.1 b	14.1 ab	2.88 b
C	24.9 bc	6.26 bc	9.22 b	26.7 b	14.2 ab	2.74 b
D	26.3 c	6.74 c	10.6 b	32.9 b	15.7 c	3.68 b
E	26.2 c	6.41 bc	9.56 b	31.7 b	16.5 c	3.67 b

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

A: non-treatment; B: NF 100%; C: NF 70% + WNS 30%; D: NF 50% + WNS 50%; E: NF 30% + WNS 70%.

생성과 소모 반응의 결과이다. 질소비료는 토양에서 무기화 반응과 질산화 과정을 거치면서 무기태 질소(NH₄⁺, NO₃⁻)가 만들어지는데, 온실 폐양액은 대부분 질산태 질소로 있어서 무기화 반응과 질산화 과정이 필요하지 않다. 따라서, 각 처리구별로 질소비료와 폐양액의 혼합비율에 따라 무기화와 질산화 속도가 다르게 나타난 것이고, 이로 인하여 식물의 질소 흡수량과 토양 내 질산태 질소의 잔여량 차이가 나타난 것이다.

열무는 처리구별 토양 내 질산태 질소의 함량이 A 처리구를 제외한 B, C, D, E 처리구들 중 질소비료만을 적용한 B 처리구에서 농도가 가장 높았으며 4.37mg·kg⁻¹(Table 4)이었다. 이것은 B 처리구가 C-E 처리구에 비교하여 질소 무기화 속도가 느려지면서 NO₃-N로 전환되는 속도도 느려지는 완효적 특성을 보인 것으로 판단된다. Table 4에서 C-E 처리구가 B 처리구보다 토양 내 NO₃-N의 함량이 유의하게 낮게 나타났고, C-E 처리구에서 열무의 생육이 더 양호하였다(Table 3). Park 등(2005)이 폐양액을 재활용한 시험에서 무기화와 질산화가 빠르게 진행되고 작물의 질소 흡수량도 비교적 높다는

결과와 같다. NH₄-N은 4.56 – 6.24mg·kg⁻¹으로 전체적으로 통계적 유의성은 없었다(Table 4). P₂O₅는 21.9 – 30.9mg·kg⁻¹으로 전체 처리구에서 통계적 유의성은 없었다(Table 4). OM은 2.29 – 2.76g·kg⁻¹으로 처리구들 간의 통계적 유의성은 없었다(Table 4). 종합해보면 폐양액과 질소비료 비율에 따른 토양의 화학성 변화에는 약간의 차이는 있지만 많은 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

4. 폐양액 토양컬럼시험에 대한 토양의 환경적 영향

폐양액의 토양처리에 따른 NO₃와 NH₄의 이동, 거동, 환경적 영향을 검토하기 위한 처리구별 토양컬럼에서 채취한 침출수에 대한 NO₃와 NH₄의 농도를 Table 5와 6에 나타냈다. Table 5에서 NO₃ 농도의 경우 무처리는 14.03 – 0.04mg·L⁻¹, 질산비료 100%는 15.7 – 0.05mg·L⁻¹, 폐양액 50%+질산비료 50%는 14.15 – 0.04mg·L⁻¹로 나타났다. 모든 처리구에서 NO₃의 농도는 시험 초기에 가장 높게, 이후 급격하게 감소하였으며, 횟수가 증가하면서 매우 낮은 농도로 유지되는 경향

Table 4. Chemical properties of the soil as affected by nitrogen fertilizer (NF) and waste nutrient solution (WNS) application rates in the wagner pot for the young radish growth.

Treatments	pH (1:5)	EC (dS·m ⁻¹)	T-N (g·kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ -N (mg·kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg·kg ⁻¹)	OM (g·kg ⁻¹)	EX.cation (cmolc·kg ⁻¹)			
								K	Ca	Mg	Na
A	6.10 a ^z	0.24 a	0.08 a	1.12 a	4.63 a	21.9 a	2.64 a	0.08 c	1.14 a	0.46 b	0.05 b
B	7.75 b	0.50 b	0.11 b	4.37 b	5.19 a	22.9 ab	2.76 a	0.04 a	1.66 b	0.40 a	0.03 a
C	7.79 b	0.50 b	0.12 b	4.00 b	4.56 a	23.03 b	2.51 a	0.05 ab	1.66 b	0.39 a	0.03 a
D	8.06 b	0.58 b	0.08 a	2.20 a	4.70 a	28.1 ab	2.50 a	0.05 ab	1.92 b	0.43 a	0.04 a
E	8.34 b	0.57 b	0.11 b	2.32 a	6.24 a	30.9 ab	2.29 a	0.06 bc	1.96 b	0.43 a	0.04 a

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at *p* < 0.05.

A: non-treatment; B: NF 100%; C: NF 70% + WNS 30%; D: NF 50% + WNS 50%; E: NF 30% + WNS 70%

Table 5. Concentration of NO₃ affected to the drain solution in the lab-column soil test.

Experiment	Repetitive	NO ₃ (mg·L ⁻¹)		
		Non-treatment	NF100%	NF50% + WNS50%
1	1	14.03 ± 0.72	15.78 ± 0.10	14.15 ± 0.13
	2	0.09 ± 0.02	0.58 ± 0.44	0.09 ± 0.06
	3	0.09 ± 0.07	0.10 ± 0.01	0.08 ± 0.06
	4	0.07 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.12 ± 0.11
2	5	0.04 ± 0.00	0.07 ± 0.03	0.04 ± 0.02
	6	0.08 ± 0.00	0.08 ± 0.05	0.08 ± 0.05
	7	0.11 ± 0.04	0.05 ± 0.04	0.18 ± 0.04
3	8	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.04	0.41 ± 0.33
	9	0.07 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.09 ± 0.02

Non-treatment: water, NF: nitrogen fertilizer, WNS: hydroponic waste solution.

Table 6. Concentration of NH_4^+ affected to the drain solution in the lab-column soil test.

Experiment	Repetitive	NH_4^+ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
		Non-treatment	NF100%	NF50% + WNS50%
1	1	10.3 ± 0.7	12.6 ± 1.1	11.9 ± 1.8
	2	11.4 ± 2.6	11.8 ± 1.4	13.6 ± 4.0
	3	11.0 ± 2.9	15.3 ± 4.4	10.9 ± 3.0
	4	12.2 ± 3.1	13.6 ± 0.5	16.5 ± 1.8
2	5	13.8 ± 3.5	12.4 ± 0.6	14.3 ± 1.1
	6	13.8 ± 1.6	9.8 ± 0.6	16.7 ± 4.7
	7	13.4 ± 2.6	13.2 ± 3.5	11.9 ± 3.9
3	8	11.0 ± 3.1	15.4 ± 2.9	15.0 ± 2.6
	9	10.6 ± 1.8	19.3 ± 0.4	14.8 ± 2.0

Non-treatment: water, NF: nitrogen fertilizer, WNS: waste nutrient solution.

이 나타났다. Yang 등(2005)이 토양에서 NO_3 의 농도 감소는 관주 횟수에 영향을 많이 받는다는 결과와 같다. 침출수의 NO_3 에 대한 평균 농도는 무처리, 질산비료 100%, 폐양액 50%+질산비료 50%가 1.62, 1.87, 1.69 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 처리구들 간에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Table 6에서 NH_4 농도의 경우, 무처리는 13.8-11.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 질산비료 100%는 19.3-9.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 폐양액 50%+질산비료 50%는 16.7-10.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 나타났다. 모든 처리구에서 NH_4 의 농도는 큰 변화 없이 일정한 농도로 용출되는 경향이 나타났다. 각 처리구에서 채취된 침출수의 NH_4 에 대한 평균농도는 무처리, 질산비료 100%, 폐양액 50%+질산비료 50% 처리구가 11.95, 13.69, 13.95 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 처리구들 간에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 6). 질소비료의 시비처방 기준으로 적용한 질소비료 100%와 폐양액 50%+질산비료 50% 처리구의 NO_3 및 NH_4 의 농도는 시험 기간 동안 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 폐양액을 화학비료의 표준시비량을 기준으로 토양에 처리하면 토양 내 질소 성분의 이동과 주변의 영향은 일반 화학비료와 유사하게 나타났음을 시사한다. 또한, 농가에서 사용하던 질소비료의 50%를 폐양액으로 대체하게 되면 토양의 질소 축적을 줄이고 열무의 생산비 절감 효과와 생산량 증가에 도움이 될 것으로 생각된다.

적 요

본 연구에서는 양액재배 시 발생하는 폐양액의 적절한 농업적 이용방안을 강구하기 위해 폐양액의 비료 효과시험, 토양 컬럼 시험, 그리고 작물 재배시험을 수행하였다. 폐양액의 비료 효과시험은 무기질소를 기준으로 질소비료와 폐양액의 토양 처리에 따른 열무의 생육특성과 토양의 화학적 특성을 조사하였다. 폐양액 비료 효과시험과 작물 재배시험을 위한 토

양에 대한 폐양액의 처리는 무처리, A, 질소비료 100%; B, 질소비료 70%+폐양액 30%; C, 질소비료 50%+폐양액 50%; D, 질소비료 30%+폐양액 70%; E 총 5개 처리구로 하였다. 토양컬럼 시험을 위한 토양에 대한 폐양액의 처리는 무처리, 질소비료 100%, 폐양액 50%+질소비료 50% 3개 처리구로 하였다. 폐양액의 화학성은 pH 6.0, EC 2.4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 총인(T-P) 28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 암모늄태 질소($\text{NH}_4\text{-N}$) 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 질산태 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 301 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 나타났다. 토양의 화학성은 pH 5.51, EC 0.31 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 유기물 2.08 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 질산태 질소 9.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 암모늄태 질소 3.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 나타났다. 질소비료 50% 이하와 폐양액 50% 이상의 비율이 열무 생육에 효과가 높은 것으로 나타났다. 폐양액을 질소비료와 함께 혼합하여 적용한 C-E 처리구에서 토양의 이화학성은 질소비료만을 적용한 B 처리구와 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 토양컬럼 시험 결과 질소비료 100%와 폐양액 50%+질산비료 50% 처리구의 NO_3 와 NH_4 의 농도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 폐양액을 화학비료의 표준시비량을 기준으로 이용하여 토양에 처리하면 토양 내 질소 성분의 이동과 주변의 영향은 일반 화학비료와 유사하게 나타나는 것으로 판단된다. 열무 토경재배에 폐양액과 질소비료를 혼합하여 사용하면 폐양액의 재이용으로 환경적 부담도 줄일 수 있고, 질소비료의 사용량도 줄일 수 있어 농가에 경제적 부담 감소와 열무 생산량 증대 효과도 기대할 수 있다.

추가 주제어: 온실, 재이용, 토양, 폐양액

사 사

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

Literature Cited

- Allison L. 1965, Organic carbon. In AG Norman, ed., Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties 9. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp 1367-1378.
- Bremner J.M. 1965, Total nitrogen. In AG Norman, ed., Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties 9. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. pp 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 J Environ Agric* 28:171-178. (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. *Environ Int* 3:79-90. doi:10.1016/0160-412(80)90040-9
- 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 J Soil Sci Fertil* 53:13-21. (in Korean) doi:10.7745/KJSSF.2020.53.1.103
- Korea Ministry of Environment (KMoE) 2020, Water Quality Conservation Act. KMoE, Sejong, Korea.
- Kumar R.R., and J.Y. Cho 2014, Reuse of hydroponic waste solution. *Environ Sci Pollut Res Int* 21:9569-9577. doi:10.1007/s11356-014-3024-3
- 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 Hort Plant Fac* 28:38-45. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2019.28.1.38
- Lee S., and Y.C. Kim 2019, Water treatment for closed hydroponic systems. *J Korean Soc Environ Eng* 41:501-513. (in Korean) doi:10.4491/KSEE.2019.41.9.501
- Lee Y.B., and M.Y. Rho 1998, Nutriculture-techniques of recycling nutriculture of on fruit vegetables. *Prot Hortic* 11:29-43. (in Korean)
- Lee Y.J., and J.B. Chung 2006, Comparison of nitrate accumulation in lettuce grown under chemical fertilizer or compost applications. *Korean J of Environ Agric* 25:339-345. (in Korean) doi:10.5338/KJEA.2006.25.4.339
- Lim J.H., C.S. Shin, and Y.Y. Cho 2019, Environmental impact analysis of strawberry hydroponic culture for proper nutrient water supply. *J Inf Technol Appl Eng* 9:41-47. (in Korean) doi:10.227333/JITAE.2019.09.02.005
- Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2019, Greenhouse status and vegetable production of facilities in 2019. MAFRA, Sejong, Korea. (in Korean)
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences) 2010, Fertilizer recommendation standard for various crop. NAAS, RDA, Jeonju, Korea. (in Korean)
- 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 annum* L.) growth. *Korean J Environ Agric* 24:24-28. (in Korean) doi:10.5338/KJEA.2005.24.1.024
- 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 J Environ Agric* 27:217-224. (in Korean) doi:10.5338/KJEA.2008.27.3.217
- RDA (Rural Development Administration) 2000, Methods of soil chemical analysis. RDA, Suwon, Korea. (in Korean)
- Rho 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. *J Bio Fac Env* 6:1-14. (in Korean)
- Roh M.Y. 2003, Nutrient solution recycling in closed hydroponics. *Protected Hort Plant Fac* 16:35-42. (in Korean)
- 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
- Son J., D. Choi, M. Kong, S. Yun, M. Park, and D. Kang 2019, The water quality and purification load assessment of drain water of facility horticulture areas. *J Environ Sci Int* 28: 1199-1208. (in Korean) doi:10.5322/JESI.2019.28.12.1199
- Sonneveld C., and W. Voogt 2009, Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, New York, USA, pp 83-102.
- Uronen K.R., 1995, Leaching of nutrients and yield of tomato in peat and rockwool with open and closed system. *Acta Hortic* 401:443-449. doi:10.17660/ActaHortic.1995.401.54
- Wolf B. 1994, Determination of nitrate, nitrite, and ammonium nitrogen rapid photometric determination in soil and plant extracts. *Ind Eng Chem Anal Ed* 16:446-447. doi:10.1021/i560131a013
- Yang J.E., C.J. Park, Y.S. Ok, K.Y. Yoo, and K.H. Kim 2005, Fate of nitrogen and phosphorous in hydroponic waste solution applied to the upland soils. *Korean J Environ Agric* 24:132-138. (in Korean) doi:10.5338/KJEA.2005.24.2.132
- Yun S.W., J.M. Lim, J.P. Moon, J.K. Jang, M.J. Park, J.K. Son, H.H. Lee, H.M. Seo, and D.K. Choi 2021, Analysis of the fertilizing effects of hydroponic waste solution on lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata*) cultivation: Based on inorganic nitrogen content. *J Korean Soc Agric Eng* 63:13-21. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2021.63.4.013