

수경재배 유출 배액(폐양액)의 비료 손실량 평가 연구

손진관*·윤성욱*·권진경*·신지훈**·강동현***·박민정*·임류갑****†

*농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 에너지환경공학과
단국대학교 환경원에·조경학부, *한국농수산대학교 교양공통학과, ****한국농업기술진흥원 디지털농업본부

A Study on the Evaluation of Fertilizer Loss in the Drainage(Waste) Water of Hydroponic Cultivation, Korea

Jinkwan Son *·Sungwook Yun *·Jinkyung Kwon *·Jihoon Shin ** ·
Donghyeon Kang ***·Minjung Park *·Ryugap Lim ****†

*Dept. of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA

**Dept. of Environmental Horticulture and Landscape Architecture, Dankook Univ.

***Dept. of General Education, Korea National University of Agricultural & Fisheries

****Department of Digital Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency

(Received : 1 February 2023, Revised : 9 February 2023, Accepted : 13 February 2023)

요약

한국 시설원에 농업과 수경(양액)재배 방식은 증가하는 추세로 발생하는 배액(폐양액)의 관리 필요성이 확대되고 있다. 본 연구에서는 배출되는 폐양액의 비료 성분 양을 가격으로 평가하여 수처리비용 절감과 비료성분 재활용이라는 두가지 측면에서 기술개발과 활용 가능성을 알아보았다. 연구는 배출 배액의 수질환경 특성을 분석한 선행연구에서 제시한 분석결과를 바탕으로 비료성분의 유실 경제성을 평가하는 것으로 배출되는 배액의 총 배출량은 연간 259.7L·m²·⁻¹을 적용하여 분석에 사용하였다. 토마토, 파프리카, 오이, 딸기 등 작물별 배액(폐양액)의 주요 수질 분석 결과를 바탕으로 평가하였으며, 인(P) 성분의 경우 인산(P₂O₅)의 양으로 환산하여 분석되었다. 질소(N)의 양은 토마토 1145.90kg·ha⁻¹, 파프리카 920.43kg·ha⁻¹, 오이 804.16kg·ha⁻¹, 딸기가 405.83kg·ha⁻¹로 평가되고 P₂O₅의 비료성분은 파프리카 830.65kg·ha⁻¹, 토마토 622.32kg·ha⁻¹, 오이 477.67kg·ha⁻¹, 딸기 240.9·ha⁻¹의 양만큼 배출하는 것으로 계산할 수 있다. 이 외에도 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg)을 비롯해 철(Fe), 망간(Mn) 등 미량원소도 배출되는 것으로 분석되었다. 시중판매 비료가격을 기준으로 평균하여 계산한 항목별 kg당 가격은 질소(N) 860.7원, 인(P) 2,378.2원, 칼륨(K) 2,121.7원, 칼슘(Ca) 981.2원, 마그네슘(Mg) 1,036.3원, 철(Fe) 126,076.9원, 망간(Mn) 6,232.1원, 아연(Zn) 15,825.0원, 구리(Cu) 31,362.0원, 붕소(B) 4,238.0원, 몰리브덴(Mo) 149,041.7원으로 평가할 수 있다. 시중판매 비료가격을 기준으로 평균하여 계산한 항목별 kg당 가격과 앞서 분석한 작물별 폐양액의 농도, 수경재배의 평균적인 연간배출량 등을 종합적으로 고려하여 연간 유실되는 작물별 비료 유실액을 산출하였다. 분석결과 토마토의 경우 6,995,622.3원, 파프리카는 7,384,923.8원, 오이는 5,091,607.9원의, 딸기는 2,429,290.6원으로 평가되어 수경재배 4가지 작물 평균은 1ha 재배면적 기준 5,475,361.1원의 비료성분 유실이 확인되었다. 수경재배 배액을 하천으로 유출시켜 오염원으로 처리하는것 보다 배출 전 자체 처리 또는 타작물 활용을 통해 관리한다면 수처리 비용 절감과 더불어 가치있는 재이용 가능한 비료성분이 될 수 있다고 기대하였다.

핵심용어 : 스마트팜, 시설원에, 생태계서비스, 온실, 재이용, 재활용

† To whom correspondence should be addressed.

Department of Digital Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency
E-mail: limso@koat.or.kr

- **Son Jinkwan** Dept. of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Post-Doc. (son007005@korea.kr)
- **Yun Sungwook** Dept. of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Researcher (wooks@korea.kr)
- **Kwon Jinkyung** Dept. of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Researcher (cen55@korea.kr)
- **Shin Jihoon** Dept. of Environmental Horticulture and Landscape Architecture, Dankook Univ. / Professor (sjihoon@dankook.ac.kr)
- **Kang Donghyeon** Dept. of General Education, Korea National University of Agricultural & Fisheries / Professor (kang6906@korea.kr)
- **Park Minjung** Dept. of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Researcher (mjpark0107@korea.kr)
- **Lim Ryugap** Department of Digital Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency / Researcher (limso@koat.or.kr)

Abstract

Korean facility horticulture and hydroponic cultivation methods increase, requiring the management of waste water generated. In this study, the amount of fertilizer contained in the discharged waste liquid was determined. By evaluating this as a price, it was suggested to reduce water treatment costs and recycle fertilizer components. It was evaluated based on the results of major water quality analysis of waste liquid by crop, such as tomatoes, paprika, cucumbers, and strawberries, and in the case of P component, it was analyzed by converting it to the amount of phosphoric acid (P_2O_5). The amount of nitrogen (N) can be calculated by discharging $1,145.90\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of tomatoes, $920.43\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of paprika, $804.16\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of cucumbers, $405.83\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of strawberries, and the fertilizer content of P_2O_5 is $830.65\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of paprika, $622.32\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of tomatoes, $477.67\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of cucumbers. In addition, trace elements such as potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), iron (Fe), and manganese (Mn) were also analyzed to be emitted. The price per kg of each item calculated by averaging the price of fertilizer sold on the market can be evaluated as KRW, N 860.7, P 2,378.2, K 2,121.7, Ca 981.2, Mg 1,036.3, Fe 126,076.9, Mn 62,322.1, Zn 15,825.0, Cu 31,362.0, B 4,238.0, Mo 149,041.7. The annual fertilizer loss amount for each crop was calculated by comprehensively considering the price per kg calculated based on the market price of fertilizer, the concentration of waste by crop analyzed earlier, and the average annual emission of hydroponic cultivation. As a result of the analysis, the average of the four hydroponic crops was 5,475,361.1 won in fertilizer ingredients, with tomatoes valued at 6,995,622.3 won, paprika valued at 7,384,923.8 won, cucumbers valued at 5,091,607.9 won, and strawberries valued at 2,429,290.6 won. It was expected that if hydroponic drainage is managed through self-treatment or threshing before discharge rather than by leaking it into a river and treating it as a pollutant, it can be a valuable reusable fertilizer ingredient along with reducing water treatment costs.

Key words : Smart Farm, Facility Horticulture, Ecosystem Services, Greenhouse, Reuse, Recycle

1. 서 론

한국의 시설원예 농업은 연중생산, 자동화, 단시간 생산, 노동력 절감, 고속득 창출 등 여러 장점으로 인해 면적이 계속해서 증가하는 추세로(Jeoung and Park, 2003; MAFRA 2013; 2014a; 2015; 2017a; 2019), 시설원예 면적은 2020년 기준 52,444 ha로 통계되어 있다(MAFRA 2012 1). 그중 최근 시설원예에서 많이 사용되는 양액재배 방법은 수경(양액)재배로 일컫고 2004년 609 ha, 2011년 3,009 ha 2020년 약 3,949 ha로 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(MAFRA 2021). 이러한 수경식 양액재배 방법은 토경에 비해 식물에 양분을 직접적으로 투입하는 쉬운 영양 공급 방법이다. 양액(수경)재배는 전통적 영농방식인 토양을 이용하지 않고 무토양 조건에서 작물을 여러 방법 배지를 고정시킨 후, 작물생육에 필요한 다양한 원소들을 적절한 농도로 용해시킨 액상 형태의 양액 비료를 투입하여 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 Vogt, 2009; Lee et al., 2019; Lee and Kim, 2019). 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).

하지만 양액 재배에 있어 비료를 넘쳐흐르게 하는 시비량 결정은 농업 경영자의 경험에 의한 것으로(Naamane et al., 2020), 염류집적 방지를 위해 최대 30% 정도까지 배액

(폐양액)이 발생시키고 있다. 이 버려지는 양액에는 다량의 영양물질이 포함되어 있으며(MAFRA, 2017b; Jin et al., 2021; Son et al., 2022), 작물생산에 있어 필수적인 성분인 질소(N)와 인(P)은 지류 및 하천으로 유출되어 부영양화를 일으키는 비점오염 물질이 될 수 있다(Hu et al., 2020; Lee et al., 2020). 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 양액재배의 도입 및 보급 초기부터 꾸준히 제기되어 왔다(Uronen, 1995; Rho et al., 1997; Roh, 2003; Park et al., 2005; Rajesh Kumar and Young Cho, 2014; Lee and Kim, 2019).

비점오염원은 배출 특성이 불규칙하며, 넓은 지역에서 발생되어 발생량을 추정할 수 없어 관리가 어려운 오염원으로 국내외적으로 물관리에 있어 매우 중요한 관리분야이다(Shin, 2004; 2010). 한국의 통계에서는 하천, 호소 등에 유입되는 오염원 중 68% 이상이 비점오염원이며(Lee and Kim, 2014; MAFRA, 2012a; 2014b), 주요 강의 수질 개선을 위해 국가, 지자체, 유역단위 등에서 많은 저감사업을 시행 중에 있다. 이러한 비점오염원의 관리는 국민 식수원과 연결되어 있어 매우 중요하게 평가된다(Lee et al., 2018; Kang et al., 2011). 비점오염의 대표적 원인은 농업과 축산업을 들 수 있고 오염원 관리를 위해 농촌의 하수시설 보급 및 오염물질 배출 관리를 지속적으로 추진하고 있다(Lee et al., 2002; Kim, 2014; MOE, 2016; MOE, 2018; Yang, 2017).

최근 신규로 건설되는 온실을 중심으로 배액 재사용을 위한 순환식 양액 재처리 시설을 갖추고 있는 추세이며

(Chungho, 2016; ShinHAN, 2016), 이 외에도 인공습지, 토양처리 자연정화공법 등을 통해 배출 배액을 저감하기 위한 연구가 진행되었다(Park et al., 2009; Park et al., 2011). 하지만 전체 시설면적 대비 양액의 재사용량이나 배출량은 정확히 집계되지 않고 있으며, 배출 배액이 국토 환경에 미치는 영향 또한 분석되지 못하고 있는 실정이다. 네덜란드 등 유럽 선진국에서는 95%, 일본에서는 45% 이상이 양액을 재사용하는 순환식 수경재배 방식을 도입했다(Lee and Kim, 2019). 특히 네덜란드는 온실로부터 배출되는 폐양액의 배출을 금지하여 100% 순환식 전환으로 법제화 하고 있지만(Lee and Kim, 2019), 세계적으로 농업토지 이용에서 화학비료 사용량을 계속 증가하고 있는 것이 현실이다(Abebe et al., 2022; Aryal et al., 2021; Liu et al., 2021). 우리나라도 물환경에 대한 인식이 점차 증대되고 있고 비점오염을 관리하기 위해 수질오염총량제를 핵심 정책으로 하천오염의 70%에 달하는 비점오염원을 국가차원에서 관리한다는 목표를 세우고 있다(Son et al., 2018; MOE, 2012a; 2012b; 2014; 2016; 2018). 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.

따라서 본 연구에서는 시설원예단지 조성으로 배출되는 영양물질의 비료 성분의 양을 판단하여 비료가격으로 평가하였다. 유실되는 폐양액에 대한 경제적 산출 평가는 비료로서 충분히 활용 가능한 폐양액의 활용적 측면에서 경영비 산출의 근거가 될 수 있으며, 환경보전을 위한 수처리시설 도입 등 기술개발 필요성에도 적용 가능하다. 본 연구를 통해 지속가능한 농업을 위한 시설원예의 개선점과 향후 친환경적 시설원예단지 조성 시 수질정화 시설의 투입 필요성과 당위성, 경제적 산출 근거의 기초자료로 활용할 수 있다고 판단하였다.

2. 조사 및 분석방법

본 연구는 수경재배로 운영되는 시설원예 단지에서 배출되는 배액의 수질환경 특성을 분석한 Jin et al.(2021)과 연계된 결과로 선행연구에서 제시한 수질분석 자료를 바탕으로 비료성분의 유실 경제성을 평가하는 것으로 구성되어 있다.

2.1 연구대상 작물별 배액 성분 분석

연구 대상 작물은 시설채소 생산 통계(MAFRA 2019; 2020; 2021)에 근거 시설원예 중 수경재배 비율이 높은 주요 작물인 토마토(Tomato), 파프리카(Paprika), 오이(Cucumber) 및 딸기(Strawberry)를 선정하여 진행하였다. 연구대상지는 작물별

주산단지를 중심으로 조사하였으며, Table 1과 같이 수경재배로 운영되는 시설원예 농가에서 채취하였다. 세부적인 시료는 토마토, 파프리카, 오이, 딸기 배액 시료 각 20점씩 총 80개 샘플을 채취하고 배액(폐양액)을 분석한 선행연구인 Jin et al.(2021)의 결과를 활용하였다. 본 연구에서 활용한 Jin et al.(2021) 선행 연구에서는 작물별 배출 배액의 농도 특성을 주로 분석하였으며, 본 연구에서는 해당 결과를 활용하여 비료성분의 연간 유출량과 경제적 평가를 실시하였다.

선행연구에서 분석한 주요 항목은 산도(pH), 전기전도도(EC), 인산염인(PO₄-P), 질산태질소(NO₃-N), 염소(Cl⁻), 중탄산(HCO₃⁻), 황화(S²⁻), 암모늄태질소(NH₄⁺-N), 칼륨(K⁺), 칼슘(Ca²⁺), 마그네슘(Mg²⁺), 규소(Si⁴⁺), 나트륨(Na⁺), 철(Fe), 망간(Mn), 구리(Cu), 아연(Zn), 몰리브덴(Mo), 붕소(B) 등 19항목을 분석한 바 있다. 분석결과를 활용하여 수경재배로 운영되는 원예시설의 작물별 배출 부하는 질소(N)와 인(P), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg)과 더불어 미량원소 등 양액조성 시 투입되는 항목을 중심으로 연 단위로 평가하였다. 배출 부하는 연간 배출되는 배액의 총량에 1L당 포함된 성분 분석 결과값을 대입하여 평가하였다. 인의 경우 분석된 PO₄-P 값을 비료 성분의 기준인 P₂O₅로 환산하여 평가하였다. 시설원예단지 1m²에서 배출되는 배액의 양은 선행연구(Son et al., 2019)에 근거하여 연간 총 배출량은 259.7L·m²·⁻¹으로 나타났다. 이것을 1ha의 면적에서 배출되는 배액에 포함된 원소의 양(kg)으로 환산하였다.

2.2 유출부하에 근거한 유실 비료량 경제성 평가

앞서 분석한 수질환경 결과에 시설원예 배출 배액(폐양액) 양에 대입하면 배출되는 질소와 인의 비롯해 다량원소와 미량원소의 양을 판단할 수 있다. 이렇게 평가된 각 성분의 양을 기준으로 유실되는 비료의 경제적 가치를 평가하였다. 배출 폐양액의 비료성분 평가는 질소(N)와 인(P)을 비롯해 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 철(Fe), 망간(Mn), 아연(Zn), 구리(Cu), 붕소(B), 몰리브덴(Mo)를 기준으로 분석하였다. 분석은 배출량과 성분결과를 반영하여 1ha에서 배출되는 원소의 양을 기준으로 판단하였으며, 대표적인 수용성 비료 가격을 분석하여 대입하고 가치를 판단하였다. 수용성 비료는 2022년 기준 Y사, S사에서 취급하는 해당 성분이 포함된 비료를 4개 판매처 이상에서 가격정보를 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시설원예 작물별 배출 배액 특성 분석

토마토, 파프리카, 오이, 딸기 등 작물별 배액(폐양액)의 주요 항목 분석 결과는 Table 1에 제시한 바와 같다. pH는 작물별 평균 6.15~6.39로 분석되었다. EC(전기전도도)는 수경재배 양액조성 정도와 밀접하게 관련되어, 농가에서 영양물질의 농도와 비료투입 정도를 유추하는데 사용된다(Son et al., 2019; Hwang et al., 2007). 토마토 배액 20점의 평균 EC농도는 4.43dS·m⁻¹으로 4작물 중에 가장 높고 파프리카는 3.85dS·

Table 1. The analysis result of hydroponics waste water by crop type*

Item	Tomato (N=20)	Paprika (N=20)	Cucumber (N=20)	Strawberry (N=20)
pH	6.31	6.15	6.38	6.39
EC	4.43	3.85	3.32	1.50
Unit (mg·L ⁻¹)				
N**	441.24	354.42	309.65	156.27
P***	52.31	69.82	40.15	20.25
P ₂ O ₅	239.63	319.85	183.93	92.77
K ⁺	520.76	501.01	333.78	148.16
Na ⁺	89.15	107.76	98.07	31.54
Mg ²⁺	133.38	114.96	108.17	32.00
Ca ²⁺	341.10	446.56	213.79	125.56
Unit (mmol·L ⁻¹)				
Fe	1.10	1.02	1.58	0.70
Mn	0.15	0.11	0.41	0.19
Zn	0.32	0.26	0.45	0.36
Cu	0.07	0.05	0.08	0.11
B	0.76	0.61	0.89	0.27
Mo	0.03	0.01	0.04	0.03

* Jin et al.(2021) analysis result,
 ** Sum of NO₃-N and NH₄⁺-N, *** P₂O₅

m⁻¹, 오이는 3.32dS·m⁻¹, 딸기는 1.50dS·m⁻¹으로 분석되었다. EC농도는 작물 재배 시 사용되는 비료성분 양과 관련되고 본 연구에서 배출되는 배액의 EC농도 평균은 하천과 지하수 분석한 결과 대비 높은 수치에 해당하는 것을 알 수 있다(Sanchez et al., 2011, Choi et al., 1997).

질소(N)는 작물생육에 필수적인 성분으로 작물별 평균 농도는 토마토 441.24mg·L⁻¹, 파프리카 354.42mg·L⁻¹, 오이 309.65mg·L⁻¹, 딸기 156.27mg·L⁻¹로 EC와 밀접하게 상관하는 것으로 분석된다. 인(P)은 시료 20점의 평균이 토마토 52.31mg·L⁻¹, 파프리카 69.82mg·L⁻¹, 오이 40.15mg·L⁻¹, 딸기 20.25mg·L⁻¹로 분석되었다. 해당 분석 결과는 배출 배액의 농도를 평가한 것으로 PO₄-P 형태의 농도를 나타낸다. 하지만 비료 성분인 인산(P₂O₅)의 양을 해석하기 위해서는 분석된 인 농도에서 인산(P₂O₅)의 양을 해석해야 투입되는 인 성분의 농도를 추정할 수 있다. 인산으로 환산하여 분석한 작물별 평균 농도는 토마토 239.63mg·L⁻¹, 파프리카 319.85mg·L⁻¹, 오이 183.93mg·L⁻¹, 딸기 92.77mg·L⁻¹로 분석되었다. 추후 연구에서 사용할 투입 비료량은 해당 수치를 사용하여 분석하고자 하였다. 칼륨(K⁺)는 작물 중 토마토가 520.76mg·L⁻¹로 가장 높았으며, 딸기가 148.16mg·L⁻¹로 가장 낮은 값으로 나타났다. 마그네슘(Mg²⁺)은 토마토가 133.38mg·L⁻¹, 파프리카 114.96mg·

Table 2. The chemical items analysis result of hydroponics waste water

Site	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Drainage Mount (L·m ² · ⁻¹)													
12 Sites Mean	18.4	18.9	22.4	25.0	27.6	21.5	15.3	16.7	23.5	25.1	21.7	23.6	259.7
Nitrogen (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	81.19	83.39	98.84	110.31	121.78	94.87	67.51	73.69	103.69	110.75	95.75	104.13	1145.90
Paprika	65.21	66.99	79.39	88.61	97.82	76.20	54.23	59.19	83.29	88.96	76.91	83.64	920.43
Cucumber	56.98	58.52	69.36	77.41	85.46	66.58	47.38	51.71	72.77	77.72	67.19	73.08	804.16
Strawberry	28.75	29.54	35.00	39.07	43.13	33.60	23.91	26.10	36.72	39.22	33.91	36.88	405.83
Phosphorus (kg·ha ⁻¹) - P ₂ O ₅ 기준													
Tomato	44.09	45.29	53.68	59.91	66.14	51.52	36.66	40.02	56.31	60.15	52.00	56.55	622.32
Paprika	58.85	60.45	71.65	79.96	88.28	68.77	48.94	53.41	75.16	80.28	69.41	75.48	830.65
Cucumber	33.84	34.76	41.20	45.98	50.76	39.54	28.14	30.72	43.22	46.17	39.91	43.41	477.67
Strawberry	17.07	17.53	20.78	23.19	25.60	19.95	14.19	15.49	21.80	23.29	20.13	21.89	240.92
K (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	95.82	98.42	116.65	130.19	143.73	111.96	79.68	86.97	122.38	130.71	113.00	122.90	1352.41
Paprika	92.19	94.69	112.23	125.25	138.28	107.72	76.65	83.67	117.74	125.75	108.72	118.24	1301.12
Cucumber	61.42	63.08	74.77	83.45	92.12	71.76	51.07	55.74	78.44	83.78	72.43	78.77	866.83
Strawberry	27.26	28.00	33.19	37.04	40.89	31.85	22.67	24.74	34.82	37.19	32.15	34.97	384.77
Ca (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	62.76	64.47	76.41	85.28	94.14	73.34	52.19	56.96	80.16	85.62	74.02	80.50	885.84
Paprika	82.17	84.40	100.03	111.64	123.25	96.01	68.32	74.58	104.94	112.09	96.90	105.39	1159.72
Cucumber	39.34	40.41	47.89	53.45	59.01	45.96	32.71	35.70	50.24	53.66	46.39	50.45	555.21
Strawberry	23.10	23.73	28.13	31.39	34.65	27.00	19.21	20.97	29.51	31.52	27.25	29.63	326.08
Mg (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	24.54	25.21	29.88	33.35	36.81	28.68	20.41	22.27	31.34	33.48	28.94	31.48	346.39
Paprika	21.15	21.73	25.75	28.74	31.73	24.72	17.59	19.20	27.02	28.85	24.95	27.13	298.55
Cucumber	19.90	20.44	24.23	27.04	29.85	23.26	16.55	18.06	25.42	27.15	23.47	25.53	280.92
Strawberry	5.89	6.05	7.17	8.00	8.83	6.88	4.90	5.34	7.52	8.03	6.94	7.55	83.10

L⁻¹ 정도였으며, Ca²⁺는 파프리카 446.56mg·L⁻¹가 가장 높게 분석되었다. 미량성분인 철(Fe), 망간(Mn), 아연(Zn), 구리(Cu), 붕소(B), 몰리브덴(Mo) 등도 생물 생육에 영향을 미치는 필수 인자로 수경재배에서 투입되고 있고 배액에서도 검출되는 것으로 분석되었다.

3.2 배액 분석 결과 반영 유출 부하량 평가

시설원예단지 1m²에서 배출되는 배액의 양은 선행연구(Son et al., 2019)에 근거하여 Table 2에 제시하였으며, 연간 배출되는 배액의 양을 월별로 살펴본 결과 1m² 면적에서 적게는 15.3L, 많게는 27.6L를 사용하는 것으로 분석되었고, 총 배출량은 259.7L·m²·⁻¹으로 나타났다. 이것을 1ha의 면적에서 배출되는 배액에 포함된 원소의 양(kg)으로 환산해 보았다.

본 연구에서는 비료의 유실량을 평가하는 것이 주요 목적이지만

만 수경재배에서 배출되는 폐양액은 물을 포함하고 있기 때문에 세계적인 물부족 현상이 대두되고 있는 현실점에서 수자원의 보전을 위해 배액 재이용에 대한 연구는 필요하다고 판단된다 (Marouki et al., 2012; Rachid et al., 2021; Kettani et al., 2022; Freitas Souza et al., 2021; Karkanis et al., 2021).

분석 결과 N농도의 경우 토마토가 총 1145.90kg·ha⁻¹로 가장 많은 양을 배출하는 것을 알 수 있으며, 파프리카 920.43kg·ha⁻¹, 오이 804.16kg·ha⁻¹, 딸기가 405.83kg·ha⁻¹로 가장 단위면적당 가장 적은 양의 N을 배출하는 것으로 나타났다. 양액 재배의 주요 성분인 질소는 공급 양액 중 57~67% 정도만 작물이 이용하고 나머지는 외부로 배출되는 것으로 보고되고 있어 질소성분의 유실량은 크다고 할 수 있다(Uronen, 1995; Hong et al., 2009). 따라서 이 양을 회수하여 재이용하거나 타 작물에 이용할 수 있는 양이 얼마인지 파악하고 활용한다면 환경오염물

Table 3. The trace elements items analysis result of hydroponics waste water

Site	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Drainage Mount (L·m ² · ⁻¹)													
12 Sites Mean	18.4	18.9	22.4	25.0	27.6	21.5	15.3	16.7	23.5	25.1	21.7	23.6	259.7
Fe (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	0.20	0.21	0.25	0.28	0.30	0.24	0.17	0.18	0.26	0.28	0.24	0.26	2.86
Paprika	0.19	0.19	0.23	0.26	0.28	0.22	0.16	0.17	0.24	0.26	0.22	0.24	2.65
Cucumber	0.29	0.30	0.35	0.40	0.44	0.34	0.24	0.26	0.37	0.40	0.34	0.37	4.10
Strawberry	0.13	0.13	0.16	0.18	0.19	0.15	0.11	0.12	0.16	0.18	0.15	0.17	1.82
Mn (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.39
Paprika	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.29
Cucumber	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.09	0.06	0.07	0.10	0.10	0.09	0.10	1.06
Strawberry	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.49
Zn (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.07	0.05	0.05	0.08	0.08	0.07	0.08	0.83
Paprika	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.06	0.04	0.04	0.06	0.07	0.06	0.06	0.68
Cucumber	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.10	0.07	0.08	0.11	0.11	0.10	0.11	1.17
Strawberry	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.08	0.06	0.06	0.08	0.09	0.08	0.08	0.93
Cu (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.18
Paprika	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13
Cucumber	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.21
Strawberry	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.29
B (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	0.14	0.14	0.17	0.19	0.21	0.16	0.12	0.13	0.18	0.19	0.16	0.18	1.97
Paprika	0.11	0.12	0.14	0.15	0.17	0.13	0.09	0.10	0.14	0.15	0.13	0.14	1.58
Cucumber	0.16	0.17	0.20	0.22	0.25	0.19	0.14	0.15	0.21	0.22	0.19	0.21	2.31
Strawberry	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.06	0.04	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.70
Mo (kg·ha ⁻¹)													
Tomato	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08
Paprika	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Cucumber	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10
Strawberry	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08

질 저감과 더불어 화학비료 사용 절감에도 도움이 될 수 있다.

P농도는 파프리카가 $181.32\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 로 가장 많은 양의 농도를 배출하며, 토마토 $135.85\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 오이 $104.27\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 딸기 $52.59\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 의 농도로 배출하는 것으로 분석되었다. 이 농도의 배출량이 분석되기 위해서는 P_2O_5 의 비료성분을 파프리카 $830.65\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 토마토 $622.32\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 오이 $477.67\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 딸기 $240.92\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 의 양만큼 배출하는 것으로 계산할 수 있다. 본 연구결과와 같은 높은 인 함량은 타작물에 이용 시 적절한 희석이 필요할 만큼 작물요구도에 비해 높은 농도로, 벼 재배에 있어 웃자람이 나타나는 영향이 있으므로 신중을 기해 처리 및 활용해야 한다(Yeop et al., 2021). K 배출 농도의 경우 연간 토마토 $1352.41\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 파프리카 $1301.12\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 오이 $866.83\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 딸기가 $384.77\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 로 계산되었으며, Ca는 토마토 $885.84\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 파프리카 $1159.72\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 오이 $555.21\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 딸기가 $326.08\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 가 배출되는 것으로 평가되었다. Mg의 경우 토마토 $346.39\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 파프리카 $298.55\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 오이 $280.92\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 딸기가 $83.10\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 가 배출되는 것으로 계산할 수 있다.

미량원소의 경우 적은 용량이 투입되고 있지만 수경재배에서 결핍 시 작물 생육에 영향을 주게 되어 필수적으로 주입하는 것을 알 수 있다. 배액 성분 분석결과에 대비해 배출량에 대입한 연간 배출량은 Fe $1.82\sim 4.10\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, Mn $0.29\sim 1.06\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, Zn $0.68\sim 1.17\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, Cu $0.13\sim 0.29\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, B $0.70\sim 2.31\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, Mo $0.03\sim 0.10\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 로 계산된다. 이러한 미량원소의 경우 많은 양은 아니지만 국민의 식수원으로 지속적으로 유입 시 중금속 등의 문제로 관리가 필요한 물질이며, 특히 하천 퇴적토 등에 축적되어 오염을 유발하는 물질로 회수하여 재이용하거나 처리가 필요하다고 할 수 있다(Admiraal et al., 1997; Huang et al., 2013).

이상의 작물별 시설온실에서 배출되는 배액에 포함된 질소와 인의 양을 평가한 결과는 비료의 경제성 평가와 같은 경제성 분석에 이용될 수 있으며, 수처리 시설 도입 시 반영해야 할 처리 용량 산정에도 활용 가능하다고 판단된다. 처리가 필요한 물질로서 시설원에 배액을 관리 시에도 작물별 차이가 확인된 본 연구 결과를 활용하여 주산단지의 면적을 고려하여 적절한 처리장 도입 및 설계가 이루어지도록 할 필요가 있다고 판단한다.

3.3 수용성 비료 판매가격에 근거한 항목별 가격 추정

연구를 통해 살펴본 작물별 시설온실 배출 배액(폐양액)에 포함된 질소와 인의 양을 바탕으로 실제 비료성분의 유실량을 경제적으로 평가하였다. 분석을 위해 대표적인 수용성 비료 가격을 분석하여 대입하고 가치를 판단하였다. 각 성분에 대한 가격을 별도로 환산한 자료가 없어 시중에서 판매되는 비료를 기준으로 하여 구성비에 따라 항목별로 구분하고 평균으로 산출하였다.

질산칼륨(Potassium Nitrate, KNO_3)의 경우 질소(N) 13%와 칼륨(K) 46%로 구성된 제품을 기준으로 계산한 결과 kg당 질소의 경우 $661.0\sim 792.3$ 원, 칼륨이 $2,339.0\sim 2,803.7$ 원으로 구분되었다. 질소와 칼륨으로 구성된 질산칼슘(Calcium Nitrate, $5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot\text{NH}_4\text{NO}_3\cdot 10\text{H}_2\text{O}$)의 경우 구성비가 질소 15.5%,

칼슘 26.5% 함유로 시중판매가 $34,000\sim 45,000$ 원에 대입하여 계산해 보면, kg당 가격은 질소 $501.9\sim 664.3$ 원, 칼슘 $858.1\sim 1,135.7$ 원으로 평가할 수 있다. 인산칼륨(Mono Potassium Phosphate, KH_2PO_4)은 인산 52%, 칼륨 34%로 구성된 제품으로 시중가격이 $7,740\sim 89,600$ 원으로 형성되어있어 구성비에 따른 kg당 가격은 인산이 $2,340.0\sim 2,708.8$ 원, 칼륨이 $1530.0\sim 1771.2$ 원으로 계산할 수 있다. 제1인산암모늄(Mono Ammonium Phosphate, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)의 경우 질산과 인산으로 구성되어 있으며, 각각 12%과 61%의 비율로 시중가격은 $85000\sim 99000$ 원으로 판매되고 있다. 이 가격과 구성비로 kg당 가격을 평가해 보면, 질소가 $1,299.0\sim 1,461.4$ 원, 인이 $2,569.8\sim 2,993.0$ 원으로 계산된다. 인산칼슘(Mono Calcium Phosphate, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)은 인산 22%, 칼슘 12%로 구성된 25kg 제품으로 시중에서 $64600\sim 76900$ 원에 판매되고 있어 kg당 가격을 인산 $1,672.0\sim 1,990.4$ 원, 칼슘 $912.0\sim 1,085.6$ 원으로 계산할 수 있다. 질산마그네슘(Magnesium Nitrate, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)의 경우 질소 10.5~11.0%, 마그네슘 14%로 구성되어 kg당 가격을 질소 $631.8\sim 1,178.6$ 원, 마그네슘 $784.0\sim 1,571.4$ 원으로 평가하였다.

미량원소의 경우 동일 함량 제품에 따라 판매가격의 차이로 평가될 수 있는데 철(EDTA FeNa , $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_8\text{NaFe}$)은 1, 5, 25kg 제품에 따라 $12,100\sim 330,000$ 원까지 다양하게 형성되어 있지만 함유량은 13%로 동일하게 구성되어 있어 kg당 가격은 $84,615.4\sim 225,076.9$ 원으로 평가할 수 있다. 망간(Manganese Sulfate, $\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$)은 31.8% 함량 제품이 25kg 기준 $45,980\sim 55,600$ 원으로 kg당 $5,783.6\sim 6,993.7$ 원으로 계산할 수 있으며, 동일한 방법으로 20.0%가 함유된 5kg 아연(Zinc Sulfate, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$)의 경우 $13,200\sim 20,000$ 원까지 판매되어 kg당 $13,200.0\sim 20,000.0$ 원으로 계산할 수 있다. 같은 방법으로 계산한 구리(Copper Sulfate, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$)는 kg당 $26,400.0\sim 39,368.0$ 원, 붕소(Boric Acid, H_3BO_3) $3,760.0\sim 4,472.0$ 원, 몰리브덴(Sodium Molybdate, Na_2MoO_4) $137,500.0\sim 158,305.6$ 원으로 평가되었다.

이상의 시중판매 비료가격을 기준으로 평균하여 계산한 항목별 kg당 가격은 질소(N) 860.7원, 인(P) 2,378.2원, 칼륨(K) 2,121.7원, 칼슘(Ca) 981.2원, 마그네슘(Mg) 1,036.3원, 철(Fe) 126,076.9원, 망간(Mn) 6,232.1원, 아연(Zn) 15,825.0원, 구리(Cu) 31,362.0원, 붕소(B) 4,238.0원, 몰리브덴(Mo) 149,041.7원으로 평가할 수 있다.

3.4 배액 유출 부하량과 수용성비료 가격에 근거한 비료 유실액 평가

이상의 시중판매 비료가격을 기준으로 평균하여 계산한 항목별 kg당 가격과 앞서 분석한 작물별 폐양액의 농도, 수경재배의 평균적인 연간배출량 등을 종합적으로 고려하여 연간 유실되는 작물별 비료 유실액을 산출해 보았다.

분석결과 토마토의 경우 약 칼륨 287만원, 인 148만원, 질소 98만원, 칼슘 92만원 정도의 유실이 확인되어 총 $6,995,622.3$ 원의 유실량이 확인되었다. 파프리카는 질소 79만원, 인 197만원, 칼륨 276만원, 칼슘 120만원, 마그네슘 29만원 정도의 유실이

Table 4. Composition ratio, selling price, and price per kg of hydroponic fertilizer

Product		Containing Ratio (%)										Price (Korea won)													
Name(formula)	kg	Price(₩rw)	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	
Potassium Nitrate [KNO ₃]	25	84,000	13		46									740.3		2619.7									
	25	75,000	13		46									661.0		2339.0									
	25	82,000	13		46									722.7		2557.3									
	25	89,900	13		46									792.3		2803.7									
Calcium Nitrate [5Ca(NO ₃) ₂ ·NH ₄ NO ₃ ·10H ₂ O]	25	45,000	15.5			26.5								664.3			1135.7								
	25	34,000	15.5			26.5								501.9			858.1								
Mono Potassium Phosphate [KH ₂ PO ₄]	25	40,000	15.5			26.5								590.5			1009.5								
	25	34,000	15.5			26.5								501.9			858.1								
	20	77,400		52	34										2340.0	1530.0									
	20	81,400		52	34										2460.9	1609.1									
Mono Ammonium Phosphate [NH ₄ H ₂ PO ₄]	20	88,200		52	34										2666.5	1743.5									
	20	89,600		52	34										2708.8	1771.2									
	25	99,000	12	61										1461.4	2993.0										
	25	88,000	12	61										1299.0	2660.5										
Mono Calcium Phosphate [Ca(H ₂ PO ₄) ₂]	25	85,000	12	61										1254.8	2569.8										
	25	93,500	12	61										1380.2	2826.7										
	25	64,600		22		12									1672.0	912.0									
	25	76,900		22		12									1990.4	1085.6									
Magnesium Nitrate [Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O]	25	65,000		22		12									1682.4	917.6									
	25	76,000		22		12									1967.1	1072.9									
	25	35,900	11				14							631.8				804.2							
	25	44,000	11				14							774.4				985.6							
	25	35,000	11				14							616.0				784.0							
	10	27,500	10.5				14							1178.6				1571.4							

Table 5. Evaluation of fertilizer loss based on drainage runoff load and selling prices

Classification		Tomato	Paprika	Cucumber	Strawberry	Average
Item	Price (krw·kg ⁻¹)					
N	860.7	986276.1	792214.1	692140.5	349297.9	704982.2
P	2378.2	1480001.4	1975451.8	1135994.8	572955.9	1291101.0
K	2121.7	2869408.3	2760586.3	1839153.2	816366.5	2071378.6
Ca	981.2	917996.0	1201817.8	575364.1	337916.7	758273.7
Mg	1036.3	339877.9	292937.3	275638.7	81537.7	247497.9
Fe	126076.9	360579.9	334103.8	516915.3	229460.0	360264.7
Mn	6232.1	2430.5	1807.3	6606.0	3053.7	3474.4
Zn	15825.0	13134.8	10761.0	18515.3	14717.3	14282.1
Cu	31362.0	5645.2	4077.1	6586.0	9095.0	6350.8
B	4238.0	8348.9	6696.0	9789.8	2966.6	6950.3
Mo	149041.7	11923.3	4471.3	14904.2	11923.3	10805.5
Total		6995622.3	7384923.8	5091607.9	2429290.6	5475361.1

확인되어 총 7,384,923.8원, 오이는 질소 69만원, 인 113만원, 칼륨 183만원, 칼슘 57만원, 마그네슘 27만원 정도로 총 5,091,607.9원의 유실이 확인되었다. 딸기의 경우 타 작물에 비해 낮은 총 유실액 2,429,290.6원으로 평가되어 수경재배 4가지 작물 평균은 1ha 재배면적 기준 5,475,361.1원의 비료성분 유실이 확인되었다. 다만 본 연구에서는 선행연구에서 제시한 연간 배액 배출량의 평균에 대입한 결과로 오이는 배액율이 다소 높고 딸기는 적은양을 적용하지 못했다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구결과에서 추가분석하여 세밀한 배액량을 특정하여 대입한다면 정확한 유실량을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

미량원소의 경우 아주 적은양이 배출되고 있지만 높은 판매가격으로 인해 연간 유실되는 양도 적지 않게 평가되었다. 하천으로 유출시켜 오염원으로 처리하는 것 보다 배출 전 자체 처리 또는 타작물 활용을 통해 관리한다면 수처리 비용 절감과 더불어 가치있는 재이용 비료성분이 될 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

한국의 시설원에 농업은 계속해서 증가하는 추세이며, 그 중 수경(양액)재배 방식도 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 수경식 양액재배 방법은 비료를 넘쳐흐르게 하는 시비량으로 최대 30% 정도까지 배액(폐양액)이 발생되어 부영양화와 비점오염 물질로 관리 필요성이 확대되고 있다. 이러한 비점오염원의 관리는 국민 식수원과 연결되어 있어 매우 중요하게 관리되며, 네덜란드 등 유럽 선진국에서는 95%, 일본에서는 45% 이상이 양액을 재사용하는 순환식 수경재배 방식을 도입하고 있다. 국내의 경우 순환식 양액재배 시스템의 도입은 고가의 비용이 들며, 이를 이용한 재배방법 또한 확립이 되어 있지 않아 배액을 하천으로 방류하는 비순환식 양액재배 형태로 작물을 재배하고 있다. 따라서 본 연구에서는 수경재배 시 배출되는 폐양액의 비료 성분 양을 판단하여 비료가격으로 평가하였다. 수처리비용 절감과 비료성분 재활용이라는 두가지 측면에서의 평가는 비료로서 충분히 활용 가능한 폐양액의 활용적 측면에 대한 기술개발 필요

성에 적용 가능할 것으로 기대하였다. 연구는 수경재배로 운영되는 시설원에 단지에서 배출되는 배액의 수질환경 특성을 분석한 Jin et al.(2021)과 연계된 결과로 선행연구에서 제시한 분석결과를 바탕으로 비료성분의 유실 경제성을 평가하는 것으로 구성되어 있다.

토마토, 파프리카, 오이, 딸기 등 작물별 배액(폐양액)의 주요 항목 분석 결과 pH는 평균 6.15~6.39, EC(전기전도도)는 토마토 4.43, 파프리카 3.85, 오이 3.32, 딸기 1.50dS·m⁻¹으로 분석되었다. 질소(N) 농도는 토마토 441.24mg·L⁻¹, 파프리카 354.42mg·L⁻¹, 오이 309.65mg·L⁻¹, 딸기 156.27mg·L⁻¹이며, 인(P)은 토마토 52.31mg·L⁻¹, 파프리카 69.82mg·L⁻¹, 오이 40.15mg·L⁻¹, 딸기 20.25mg·L⁻¹로 분석되었다. 비료 성분인 인산(P₂O₅)의 양으로 환산하여 분석한 작물별 평균 농도는 토마토 239.63mg·L⁻¹, 파프리카 319.85mg·L⁻¹, 오이 183.93mg·L⁻¹, 딸기 92.77mg·L⁻¹로 분석되었다. 칼륨(K)는 토마토가 520.76mg·L⁻¹로 가장 높았으며, 딸기가 148.16mg·L⁻¹로 가장 낮았으며, 마그네슘(Mg²⁺)은 토마토가 133.38mg·L⁻¹, 파프리카 114.96mg·L⁻¹로 분석되었다. Ca²⁺는 파프리카 446.56mg·L⁻¹가 가장 높게 분석되었다. 미량성분인 철(Fe), 망간(Mn), 아연(Zn), 구리(Cu), 붕소(B), 몰리브덴(Mo) 등도 생물 생육에 영향을 미치는 필수 인자로 수경재배에서 투입되고 있고 배액에서도 검출되는 것으로 분석되었다.

시설원에단지 1m²에서 배출되는 배액의 양은 선행연구(Son et al., 2019)에 근거하여 총 배출량은 259.7L·m²·⁻¹을 적용하여 분석에 사용하였다. 연간 배출되는 질소(N)의 양은 토마토 1145.90kg·ha⁻¹, 파프리카 920.43kg·ha⁻¹, 오이 804.16kg·ha⁻¹, 딸기가 405.83kg·ha⁻¹로 평가되었다. 질소는 작물 생육의 필수 요소로 이 양을 회수하여 재이용하거나 타 작물에 이용할 수 있는 양이 얼마인지 파악하여 활용한다면 환경오염물질 저감과 더불어 화학비료 사용 절감에도 도움이 될 수 있다. 인(P)의 배출량은 파프리카 181.32kg·ha⁻¹로 가장 많고 토마토 135.85kg·ha⁻¹, 오이 104.27kg·ha⁻¹, 딸기 52.59kg·ha⁻¹의 농도로 배출하는 것으로 분석되었다. 이 농도의 배출량이 분석되기 위해

서는 P2O5의 비료성분을 파프리카 830.65kg·ha⁻¹, 토마토 622.32kg·ha⁻¹, 오이 477.67kg·ha⁻¹, 딸기 240.92·ha⁻¹의 양만큼 배출하는 것으로 계산할 수 있다. 칼륨(K)의 배출량은 토마토 1352.41kg·ha⁻¹, 파프리카 1301.12kg·ha⁻¹, 오이 866.83kg·ha⁻¹, 딸기가 384.77kg·ha⁻¹로 계산되었으며, 칼슘(Ca)은 토마토 885.84kg·ha⁻¹, 파프리카 1159.72kg·ha⁻¹, 오이 555.21kg·ha⁻¹, 딸기가 326.08kg·ha⁻¹, 마그네슘(Mg)의 경우 토마토 346.39kg·ha⁻¹, 파프리카 298.55kg·ha⁻¹, 오이 280.92kg·ha⁻¹, 딸기가 83.10kg·ha⁻¹가 배출되는 것으로 계산할 수 있다. 미량원소의 연간 배출량은 철(Fe) 1.82~4.10kg·ha⁻¹, 망간(Mn) 0.29~1.06kg·ha⁻¹, 아연(Zn) 0.68~1.17kg·ha⁻¹, 구리(Cu) 0.13~0.29kg·ha⁻¹, 붕소(B) 0.70~2.31kg·ha⁻¹, 몰리브덴(Mo) 0.03~0.10kg·ha⁻¹로 계산된다. 이러한 미량원소의 경우 많은 양은 아니지만 국민의 식수원으로 지속적으로 유입 시 중금속 등의 문제로 관리가 필요한 물질로 회수하여 재이용하거나 처리가 필요하다고 할 수 있다. 이상의 작물별 시설온실에서 배출되는 배액에 포함된 질소와 인의 양을 평가한 결과는 비료의 경제성 평가와 같은 경제성 분석에 이용될 수 있으며, 수처리 시설 도입 시 반영해야 할 처리용량 산정에도 활용 가능성을 제시하였다.

연구를 통해 살펴본 작물별 시설온실 배출 배액(폐양액)에 포함된 실제 비료성분의 유실량을 경제적으로 평가하였다. 분석을 위해 대표적인 수용성 비료 가격을 분석하여 대입하고 가치를 판단하였다. 각 성분에 대한 가격을 별도로 환산한 자료가 없어 시중에서 판매되는 비료를 기준으로 하여 구성비에 따라 항목별로 구분하고 평균으로 산출하였다. 시중판매 비료가격을 기준으로 평균하여 계산한 항목별 kg당 가격은 질소(N) 860.7원, 인(P) 2378.2원, 칼륨(K) 2121.7원, 칼슘(Ca) 981.2원, 마그네슘(Mg) 1,036.3원, 철(Fe) 126,076.9원, 망간(Mn) 6,232.1원, 아연(Zn) 15,825.0원, 구리(Cu) 31,362.0원, 붕소(B) 4,238.0원, 몰리브덴(Mo) 14,9041.7원으로 평가할 수 있다. 시중판매 비료가격을 기준으로 평균하여 계산한 항목별 kg당 가격과 앞서 분석한 작물별 폐양액의 농도, 수경재배의 평균적인 연간배출량 등을 종합적으로 고려하여 연간 유실되는 작물별 비료 유실액을 산출하였다. 분석결과 토마토의 경우 약 칼륨 287만원, 인 148만원, 질소 98만원, 칼슘 92만원 정도의 유실이 확인되어 총 6,995,622.3원의 유실량이 확인되었다. 파프리카는 질소 79만원, 인 197만원, 칼륨 276만원, 칼슘 120만원, 마그네슘 29만원 정도의 유실이 확인되어 총 7,384,923.8원, 오이는 질소 69만원, 인 113만원, 칼륨 183만원, 칼슘 57만원, 마그네슘 27만원 정도로 총 5,091,607.9원의 유실이 확인되었다. 딸기의 경우 타 작물에 비해 낮은 총 유실액 2,429,290.6원으로 평가되어 수경재배 4가지 작물 평균은 1ha 재배면적 기준 5,475,361.1원의 비료성분 유실이 확인되었다. 이 금액을 전체 공급 양액 대비 유출되는 배액비를 계산한 선행연구 Son et al.(2019)의 평균 27.4(20.7~35.8)%에 적용한다면 공급비료의 약 1/4에 해당하는 양을 버리고 있다고 할 수 있다. 2021년 요소비료 파동과 더불어 국제 및 무역시장의 불안정 등으로 시설원에 비료의 가격은 이미 많은 부분 상승하였고 앞으로도 더 오를 것이라는 전망이기

때문에 유실 배액에 함유된 비료성분을 재이용하는 기술개발은 충분히 가치있는 연구분야로 기대된다.

본 연구에서는 선행연구에서 제시한 연간 배액 배출량의 평균에 대입한 결과로 오이는 배액율이 다소 높고 딸기는 적은양을 적용하지 못했다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구결과를 기반으로 추가분석하여 세밀한 배액량을 특정하여 대입한다면 정확한 유실량을 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 더불어 미량원소의 경우 아주 적은 양이 배출되고 있지만 높은 판매가격으로 인해 연간 유실되는 양도 적지 않게 평가되었다. 시설원에 배출 배액의 비료성분이 다량 확인된 만큼 배출 전 자체 하수처리, 재이용을 통한 시설 내 타작물 재배, 시설 외 비료성분을 요구하는 타작물 공급, 시설원에 단지 단위 처리시설 설치 등을 통해 비점오염물질 배출 저감 및 수처리 비용 절감과 더불어 가치있는 재이용 비료성분으로 활용 가능하다고 판단된다. 본 연구에서 제시한 유실 폐양액의 경제성 평가는 시설원에 배액 재이용 기술개발의 경영비 산출의 근거 및 하수처리시설 도입 등 지속가능한 시설원예를 위한 다양한 정책사업의 기초자료로 활용 가능하다고 판단된다.

사 사

연구는 2023년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(PJ01676103)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Abebe, T. G. et al., 2022. Growing Use and Impacts of Chemical Fertilizers and Assessing Alternative Organic Fertilizer Sources in Ethiopia. *Appl. Environ. Soil Sci.* DOI : <https://10.1155/2022/4738416>.
- Admiraal, A. N., Morris, M. J., Brooks, T. C., Olson, J. W., and Miller, M. V. 1997. *Illinois Wetland Restoration & Creation Guide*, Illinois Natural History Survey.
- Aryal, J. P., Sapkota, T. B., Krupnik, T. J., Rahut, D. B., Jat, M. L. and C. M. Stirling. 2021. Factors affecting farmers' use of organic and inorganic fertilizers in South Asia. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28(37), 51480–51496. DOI : <https://10.1007/s11356-021-13975-7>.
- Chungho CO., LTD, 2016, Recycle supplying systems of nutrient solution of cultivation under structure used ICT. Korea Konzession, Application No. 10-2016-0183339. DOI:<https://patents.google.com/patent/KR101712582B1>.
- Freitas Souza et al., 2021. Can irrigation systems alter the critical period for weed control in onion cropping?. *Crop Prot.*, 147(February). DOI: <https://10.1016/j.cropro.2020.105457>.
- 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).
- Horticulture. 2021. <https://www.hortitimes.com/news/articleView.html?idxno=23148>. Accessed 01 July 2020.
- Hu et al., 2021. Agriculture, Ecosystems and Environment Drip fertigation promotes water and nitrogen use efficiency and yield stability through improved root growth for tomatoes in plastic greenhouse production. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 313(August), 107379. DOI : <https://10.1016/j.agee.2021.107379>.
- Huang, X., Y. Zhu, and H. Ji, 2013. Distribution, speciation, and risk assessment of selected metals in the gold and iron mine soils of the catchment area of Miyun Reservoir, Beijing, China. *Environ. Monit. Assess.* 185, 8525–8545.
- Jeoung, J.H., and S.K. Park., 2003, Calculation of Pumping Rate Considering the Change of Groundwater Level, *KCID Journal*, 10(1), 64–72. DOI : <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200373606655493.page>.
- Jin, Y., Kang T., Lim, R., Kim, H., Kang, D., Park, M. and Son, J. 2021, A study on drainage characteristics and load amount evaluation by crop type in a hydroponic cultivation facility of horticultural complex. *Journal of Wetlands Research*, 23(4), 352–363. DOI : <https://doi.org/10.17663/JWR.2021.23.4.352>.
- Kang, B.H, Kim, N.C, Son, J.K, Kim, M.H, Cho, S.J and Lee, S.Y. 2011. The Study on Ecological Function Assessment at Streams in Rural Area : The Focus of Han–River Basin. *Journal Of The Korean Society Of Rural Planning*. 17(2) : 23–32. (in Korean with English summary) DOI : <https://doi.org/10.7851/ksrp.2011.17.2.023>.
- Karkanis, D. J. Bilalis, A. Efthimiadou, and P. Efthimiadis. 2010. Effects of cultural practices on weed flora in virginia (flue-cured) organic tobacco (*nicotiana tabacum* L.): Green manure and irrigation systems. *Turkish J. Agric. For.*, 34(6), 487–496. DOI : <https://10.3906/tar-0908-299>.
- Kettani, A. Hammani, A. Taky, and M. Kuper. 2022. Challenging ‘one size fits all’: Continued use of sprinkler irrigation in a staled drip irrigation project in Morocco. *Irrig. Drain.*, 4, 619–634. DOI : <https://doi.org/10.1002/ird.2675>.
- Kim, H.J. 2014. Roles and Responsibilities of Landowners or Occupiers to Effectively Manage Non-point Souce Pollution, Korea Environment Institute. (in Korean with English summary) DOI : <https://repository.kei.re.kr/handle/2017.oak/21672>.
- Lee, CK, Kim, JS, Jung, KH, Park, JJ, Kim, JS, Lee, BC, Koo, JH and Lim, BS. 2002. Characteristics and Treatment Efficiency of Rural Sewage Treatment Facilities, *Korean Water and Wastewater Society·Korean Water Environ-ment Society*. pp. 407–411.
- Lee, D.G.; Son, J.K.; Kang, T.G.; Jang, J.K.; Park, M.J.; Lee, T.S.; Lim, R.G. 2020. Identification of major fungi and bacterial species in solid medium drainage for circulating hydroponics system. *J. Environ. Sci. Int.*, 29, 1109–1123. DOI : <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.11.1109>.
- 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).
- Lee, J.H., 2004, The optimum schemes for the removal of Nitrogen and Phosphorus in industrial wastewater, Graduate School of Ajoul University, Master thesis.
- Lee, S.Y., Kim, Y.C. 2019, Water Treatment for Closed Hydroponic Systems, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41(9), 501–513. DOI : <https://doi.org/10.4491/KSEE.2019.41.9.501>.
- Lee, S.J and Kim, Y.I. 2014. Improvement on Management of Non-point Source Pollution for Reasonable Implementation of TMDL : Focusing on Selection of Non-point Source Pollution Management Region and Management of Non-point Source Pollutant, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 36(10), 719–723. DOI : <https://doi.org/10.4491/KSEE.2014.36.10.719>.
- Lee, S.S, Lee, D.S, Park, S.R, Choi, S.M, Kim, H.J, Lee, H.N and Kim, I.S (2010). Field Study for Tributaries of Water Shed in City of Cheongju, *Journal of the Instiute of Construction Technology*. 29(2), pp. 81–86. (in Korean with English summary) DOI : <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=2887861>.
- Liu, Y., Pan, X. and J. Li. 2015. A 1961.2010 record of fertilizer use, pesticide application and cereal yields: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 35(1), 83–93. DOI : <https://10.1007/s13593-014-0259-9>.
- Marouki, W. D., Rafea, L. DADE, L. GARBA, and D. KHIATI. 2012. Programme Appui Au Plan Maroc Vert: Rapport D’Evaluation.
- Ministry of Environment (MOE). 2012a. Nonpoint pollution source management II, 9–16. DOI : https://water.nier.go.kr/mobile/contents/contentView/?pMENU_NO=172.
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2013, 2012 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance. DOI : <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/71/304119/artclView>.
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2014a, 2013 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance. DOI : <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/>

- 71/304119/artclView.
- Ministry of Environment (MOE), 2014b, 2013 Public sewage treatment operation management status analysis result. DOI : https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=900&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=92&orgCd=&condition.orderSeqId=6311&condition.rnSeq=904&condition.deleteYn=N&seq=637.
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2015, 2014 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance. DOI : <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/65/234413/artclView>.
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017a, 2016 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance. DOI : <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/131/276221/artclView>.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017b, The organic law about agriculture, farming village & food industry. DOI : <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=206522#0000>.
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2019, 2018 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance. DOI : <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/131/322442/artclView.do>.
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2021, 2020 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance.
- Ministry of Environment (MOE). 2012a. Nonpoint pollution source management II, 9-16. DOI : https://water.nier.go.kr/mobile/contents/contentView/?pMENU_NO=172.
- Ministry of Environment (MOE), 2012b, Research on appropriate management of rural waste. DOI : <https://me.go.kr/home/web/board/read.do?jsessionid=ZtT-AOBCL4rObmEFMbgYO7k.mehome1?pagerOffset=3550&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=290&orgCd=&boardId=181117&boardMasterId=39&boardCategoryId=52&decorator=>.
- Ministry of Environment (MOE), 2014, 2013 Public sewage treatment operation management status analysis result. https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=900&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=92&orgCd=&condition.orderSeqId=6311&condition.rnSeq=904&condition.deleteYn=N&seq=637.
- Ministry of Environment (MOE), 2016, 2014 Sewage statistics. DOI : https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=6671.
- Ministry of Environment (MOE), 2018, Korea Sewer Information System. DOI : <https://www.hasudoinfo.or.kr>.
- Naamane, Sadiq, A., Belhouari, A., IOUNES, N. and S. EL Amrani. 2020. Enquete sur l'utilisation des engrais et pesticides chez les agriculteurs de la region de Casablanca-Settat. Gest. des dechets au Maroc au Maroc, pp. 1-28.
- Park, C. J., J. E. Yang, K. H. Kim, K. Y. Yoo, Y. S. Ok, 2005. Recycling of Hydroponic Waste Solution for Red pepper (*Capsicum annum* L.) Growth. Korean Journal of Environmental Agriculture 24(1):24-28 (in Korean).
- Park, J.H., Seo, D.C., Kim, A.R., Kim, S.H., Lee, C.H., Lee, S.T., Jeong, T.U., Lee, S.W., Ha, Y.R., Chom J.S. and Heo, J.S. 2011, Treatment efficiencies and Decomposition velocities of pollutants in constructed wetlands for treating hydroponic wastewater, Korean journal of Soil science and Fertilizer, 44(5), 937-943. DOI : <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02038956>.
- Park, S.D., Hwang, U.S., Sung, J.I., Chae, K.S., Kim, C.H., Jun, G.Y., Son, Y.M. and Song, J.D. 2009. A study on the effective agricultural utilization of reclaimed land. ed. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea. p. 1-6. DOI : https://scholar.google.co.kr/scholar?hl=ko&as_sdt=0%2C5&scioq=a+study+on+the+effective+agricultural+utilization+of&q=A+study+on+the+effective+agricultural+utilization+of+reclaimed+land&btnG=.
- Rachid Lahlali, Manal Jaouad, Aliou Moinina, Fouad Mokriani and Zineb Belabess. 2021. Farmers' knowledge, perceptions, and farm-level management practices of citrus pests and diseases in Morocco. J. Plant Dis. Prot., 128(5), 1213-1226. DOI : <https://10.1007/s41348-021-00479-2>.
- Rajesh Kumar, R. and J. Young Cho. 2014. Reuse of hydroponic waste solution. Environmental science and pollution research international 21(16):9569-9577. 45.
- Roh, M. Y. 2003. Nutrient solution recycling in closed hydroponics. Kor. Res. Soc. Protected Hort. 16, 35-42 (in Korean).
- 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. J. Bio. Fac. Env. 6:1-14 (in Korean).
- Shin, MH, Choi, JW, Lee, JJ, Lee, JA, Choi, JD. 2010. Runoff Characteristics of NPS in small watershed, Journal of Hydro Environment Research, 1134-1138. DOI : <https://www.koreascience.or.kr/article/CFKO201030533376073.page>.
- Shin, HJ, Park, GA and Kim, SJ. 2004. Simulation of Hydrological Behavior and Water Quality Using AnnAGNPS in Gyeongan-Cheon Watershed, Korean Society of Civil Engineers Conference., pp. 2209-2213. DOI : <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200473606658822.page>.
- ShinHAN A-TEC Co.Ltd., 2016, Sterilizing method of waste

- nutrient solution using uv lamp., Korea Konzession, Application No. 10-2016-0147011. DOI : <https://sh1000.co.kr/>.
- Son, J.; Kang, T.; Park, M.; Kong, M.; Choi, H.-S. 2022. Variation in Pathogenic Organisms as Affected by Using Hydroponic Nutrient Wastewater in Horticultural Facilities. *Agriculture*, 12, 1340. DOI : <https://doi.org/10.3390/agriculture12091340>.
- Son, JK, Kim, CH, Yun, SW, Kong, MJ, Choi, DK, Kang, DH, Park, MJ and Kand, BH., 2018, A Study on the Emission Characteristic and Improvement Plan of Domestic Sewage(NPS) in Rural Area, *Journal of The Korean Society of Rural Planning*, 24(4), 37-46. DOI : <https://doi.org/10.7851/ksrp.2018.24.4.037>.
- Son, JK, Choi, DK, Kong, MJ, Yun, SW, Park, MJ, and Kang, DH. 2019. The Water Quality and Purification Load Assessment of Drain Water of Facility Horticulture Areas. *Journal of Environmental Science International*, 28(12), 1225-1234. DOI : <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.12.1199>.
- Sonneveld, C. and W. Voogt. 2009. Plant nutrition of greenhouse crops. p. 83-102. New York. USA.
- Uronen, K. R. 1995. Leaching of nutrients and yield of tomato plants grown in closed hydroponic systems development on the EC-level. *Acta Hort.* 401, 443-449.
- Yang, NI., 2017, The Study on Capacity of Small Scale Sewerage Facilities in Korea, Yonsei University Master's Thesis. DOI : <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=DIKO0014595694&dbt=DIKO>.