Journal of Bio-Environment Control, Vol. 32, No. 4:492-500, October (2023)
DOI https://doi.org/10.12791/KSBEC.2023.32.4.492
pISSN 1229-4675
eISSN 2765-3641

순환식 수경재배 멜론의 수량과 품질, 관개수 및 양분 이용 효율성 평가

신민주[1,4] · 윤승리[2] · 김진현[1] · 정호정[3] · 김성겸[5*]

[1]국립원예특작과학원 시설원예연구소 농업연구사 및 경북대학교 원예과학과, [2]국립원예특작과학원 시설원예연구소 전문연구원, [3]국립원예특작과학원 시설원예연구소 농업연구관, [4]경북대학교 대학원 원예과학과 대학원생, [5]경북대학교 원예과학과 교수

Evaluation of Fruit Yield and Quality of Netted Melon, Water and Nutrient Use Efficiency in a Closed Hydroponic System

Minju Shin[1,4], Seungri Yoon[2], Jin Hyun Kim[1], Ho Jeong Jeong[3], and Sung Kyeom Kim[5]*

[1]Researcher, Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Haman 52054, Korea

[2]RDA Researcher Associate, Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Haman 52054, Korea

[3]Senior researcher, Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Haman 52054, Korea

[4]Graduate Student, Department of Horticultural Science, College of Agricultural and Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

[5]Professor, Department of Horticultural Science, College of Agricultural and Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Abstract. The spectrum of this study was research on the closed hydroponic cultivation of netted melons (*Cucumis melo* L.) using coir substrate, analyzing the impact of this cultivation method on melon yield, fruit quality, and the efficiency of water and nutrient usage. The experimental results showed that the average fruit weight of the melons grown in a closed system was 71.4 g higher than that of the open system, and the fruit width was on average 0.2 cm larger, showing a statistically significant difference. However, there was no difference in the average sugar content of the fruit flesh and height. Although there is no substantial commercial difference, it is conjectured that the change in the macronutrients ratio in the irrigation has played a role in the statistically significant increase in fruit weight, which is attributed to changes in the crops' nutrient uptake concentrations. This necessitates further research for a more comprehensive understanding. In terms of the productivity of irrigation required to produce the fruit, applying the closed system resulted in an increase of 7.6 kg/ton compared to the open system, saving 31.6% of water resources. Additionally, in terms of nutrients, cultivating in a closed system allowed for savings of approximately 59, 25, 55, 83, 76, and 87% of N, P, K, Ca, Mg, and S, respectively, throughout the entire cultivation period. As the drainage was reused, the ratios of NO_3^- and Ca^{2+} increased up to a maximum of 9.6 and 9.1%, respectively, while the ratios of other ions gradually decreased. In summary, these results suggest that closed hydroponic cultivation can effectively optimize the use of water and fertilizer while maintaining excellent fruit quality in melon cultivation.

Additional key words: *Cucumis melo* L., ion uptake, nutrient solutions, Recirculating hydroponic system

서 론

멜론(*Cucumis melo* L.)은 박과(Cucurbitaceae)에 속하는 1년생 초본으로 아프리카 지역이 원산지이며 주로 고온 건조한 지역에서 재배되어 왔다(RDA, 2018b). 우리나라 멜론 재배 면적은 2021년 기준으로 1,518ha이며, 생산량으로 연간 약 4.1만톤, 생산금액은 약 천2백억원 내외이다(MAFRA, 2022b). 멜론은 특유의 향과 단맛으로 국내의 다양한 소비층을 확보하고 있으며, 딸기에 이은 시설 과채류 수출단가(4.49달러/kg) 2위 품목으로 수출 또한 유망한 작물이다(MAFRA, 2022a).

작물을 배지에 정식하여 양액으로 양분을 공급하는 방법인 수경재배는 양·수분의 정밀한 관리를 통해 집약적이고 효과적으로 작물을 관리할 수 있으며, 품질 향상과 수량 증대 및 생력화를 이룰 수 있다(Domis 등, 2002; Savvas 등, 2013a). 수

*Corresponding author: skkim76@knu.ac.kr
Received October 10, 2023; Revised October 30, 2023; Accepted October 30, 2023

경재배는 작물 재배 시 배출되는 배액의 재활용 여부에 따라 비순환식과 순환식 수경재배로 구분되는데(Roh 등, 2009), 순환식 수경재배는 물과 비료를 절약하고 환경에 부정적 영향을 줄일 수 있으므로 농업계에서 그 역할이 점점 더 중요해지고 있다(Savvas와 Manos, 1999).

네덜란드는 환경오염을 막기 위해 1994년부터 순환식 수경재배로의 전환을 법제화(The Waste Water Disposal Decree)하여 현재 순환식 수경재배 보급률이 95% 이상이며, 일본 또한 수경재배 농가 중 약 15%가 순환식으로 재배하고 있다고 알려져 있다. 그에 반해 국내의 순환식 수경재배 비율은 5% 미만으로 정착되지 않은 실정이다(RDA, 2018a; Lim 등, 2022). 우리나라는 아직 배액 배출 및 처리에 대한 세부 기준이 마련되지 않은 상황이며, 수질환경보전법으로 산업체 폐수로 분류하여 배출허용기준을 총 질소 60mg·L^{-1}, 총 인 8mg·L^{-1} 이하로 규제하고 있다(Kumar와 Cho, 2014; ME, 2018).

현재까지 멜론, 오이 등을 포함한 박과 채소의 순환식 수경재배에 관련한 연구는 주로 배액을 재사용하면서 축적되는 NaCl에 따라 나타나는 현상에 집중되었다. 멜론은 NaCl의 농도 수준에 따른 양분 흡수 패턴과 근권 환경의 이온 조성 변화, 식물 생리학적 반응에 대하여 분석된 바 있으며, 순환식 수경재배 배양액의 다량원소 양이온의 농도를 결정하기 위한 연구가 수행되었다(Neocleous와 Savvas, 2015, 2016; Neocleous 등, 2017). 오이의 경우 양액 내 NaCl 또는 Mn, Zn 등 이온의 축적에 따른 작물 양분 흡수 농도 변화 및 식물 생리학적 영향 등이 연구되었고(Savvas 등, 2005a, 2005b; Tzerakis 등, 2012, 2013), 경제적, 환경적 측면에서 순환식 수경재배 시스템을 평가하였다(Grewal 등, 2011; Ding 등, 2022).

본 연구에서는 멜론 수경재배 시 배액을 재활용하였을 때 과실 품질 및 수량에 미치는 영향과 양액의 화학적 변화를 분석하고, 연구결과를 순환식 수경재배 양분 관리 최적화를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 식물재료 및 재배관리

실험 재료로 네트 멜론(*Cucumis melo* L.)의 '히어로' 품종(Hero, Farm Hannong Co., Ltd., Korea)을 이용하였다. 본 시험은 경상남도 함안군 함안면 소재 국립원예특작과학원 시설원예연구소(35.2N, 128.4E) 내의 벤로형 유리온실(폭 24m, 길이 28m)에서 수행되었다. 2023년 3월 27일에 상토(Tosilee, Shinan Growth Co., Ltd., Korea)를 충진한 40구 플러그트레이에 파종하였다. 본엽이 3매 발생한 4월 27일에 지표수(EC 0.3dS·m^{-1}, pH 6.72)로 포수한 100×20×10cm(20L) 규격의 코이어배지(chip:dust=5:5, Daeyoung GS, Daegu, Korea)에 재식거리 1.52주·m^{-2}로 정식하였다. 정식 후 25일부터 뒤영벌을 이용하여 11－13마디에 발생한 측지에 착과시키고 23마디를 남긴 후 적심 하였으며, 정식 후 75일째인 7월 10일에 과실을 수확한 후 과실의 크기 및 당도 등 과실의 특성을 조사하였다.

양액은 네덜란드 온실작물연구소에서 개발한 멜론 유기배지 전용 PBG(Proefstaion voor Bloemisterij en Gasgroente) 배양액을 공급하였다(Table 1). 급액 EC 농도는 정식 초기부터 수확기까지 1.7－2.1dS·m^{-1}로 생육단계에 따라 점차 농도를 높여가며 관수하였다. 급액은 일일 누적일사량(60－100 J·cm^{-2})과 생육단계에 따라 조정하였으며, 배액률이 30－40% 선을 유지하도록 설정하였고, 정식 후 69일부터는 과실 당도 증진을 위해 배액률을 0－10% 수준으로 관리하였다(Fig. 1). 온실 내 온도, 상대습도(111N&222N, Jaunterting Int., Taiwan)는 환경계측기 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific Inc., UT, USA)를 사용하여 10분 간격으로 측정하여 온실 재배 환경 데이터를 수집하였다(Fig. 2).

2. 배액 재사용

재사용이 가능할 정도인 200톤 가량의 충분한 배액을 확보하기 위해 정식 후 25일간은 비순환 방식으로 운영되었으며, 5월 22일부터 7월 9일까지 순환식으로 전환하여 급액 되었다. 급액 제조 시에는 전체 제조량의 30%를 배액으로 재사용하고 70%는 원수와 농축 양액을 사용하였다.

3. 급·배액의 용량 및 화학성 분석

급액량을 측정하기 위하여 관수관에 급액 수집용 점적핀을 추가로 설치하고 하루 급액을 비커에 받아 그 용량을 기록하였다. 배액량을 측정하기 위하여 각 행잉거터에 배액 집수 배관을 설치하였으며, 일일 배액량을 기록하고 식물 개체수로

Table 1. Composition of the Proefstaion voor Bloemisterij en Gasgroente (PBG) nutrient solutions used in the experiment.

Macroelement (mmol·L^{-1})	NO_3-N	NH_4-N	PO_4-P	K	Ca	Mg	SO_4-S
	16.25	1.00	1.25	7.50	4.75	1.25	1.50
Microelement (μmol·L^{-1})	Fe	B	Mn	Zn	Cu	Mo	
	15.00	25.00	10.00	5.00	0.75	0.50	

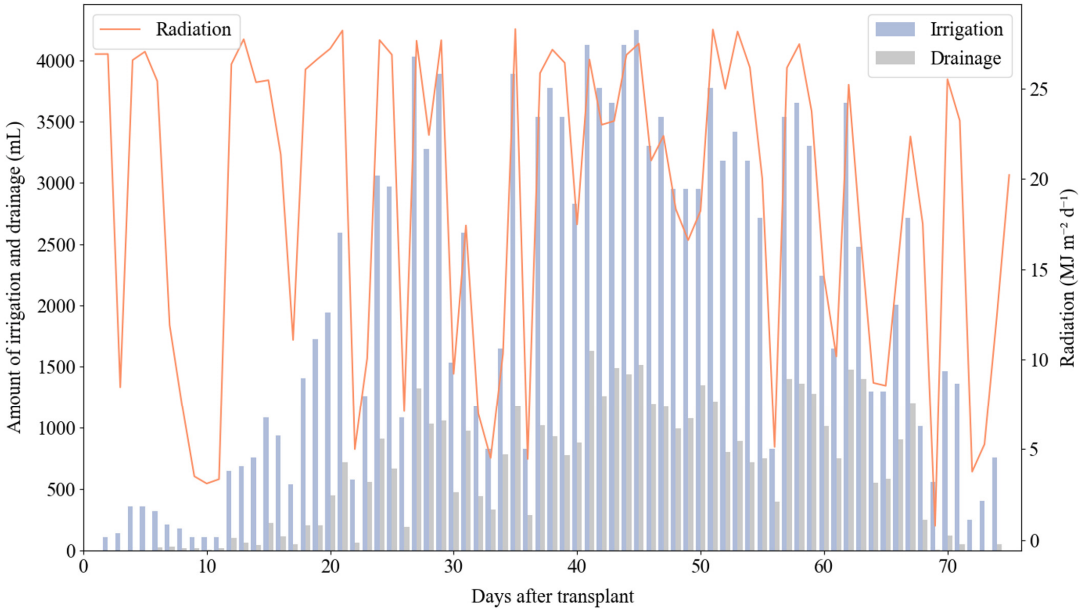

Fig. 1. Daily radiation in the greenhouse, and irrigation and drainage amount for hydroponically grown melon during the cultivation period.

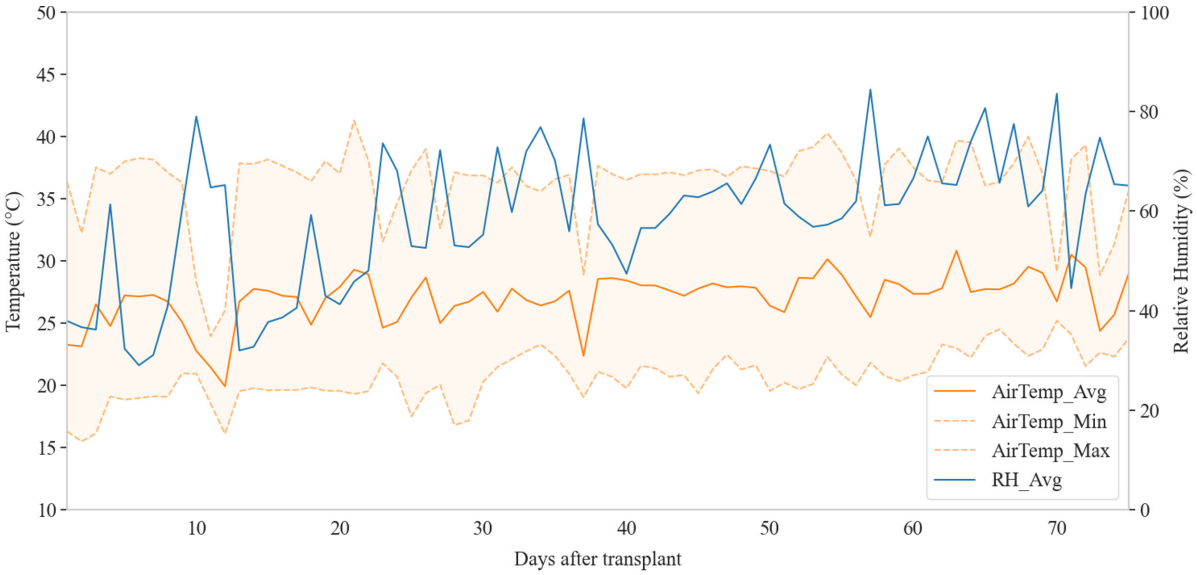

Fig. 2. Daily temperature and relative humidity in the greenhouse of melon during the cultivation period.

나누어 한 개체 당 배수량을 계산하였다.

화학성 분석을 위해 1주 간격으로 동일한 시간대(12 – 14시)에 수집된 급·배액 시료를 채취하여 분석하였다. 종합 수질 측정기(Orion™ Versa Star Pro™ Benchtop pH Meter, Thermo Scientific™, USA)를 사용하여 급·배액의 pH와 EC를 측정하였다. 또한, 급·배액의 NO_3^-와 NH_4^+는 연속 흐름 분석기(SAN^{++} Automated Wet Chemistry Analyzers, Skalar Analytical, The Netherlands)를 사용하여 분석하였으며, 그 외 다량원소(P, K, Ca, Mg, S) 및 미량원소(Fe, Mn, Cu, B)는 유도결합 플라즈마 광방출 분광기(Optima-8300, PerkinElmer SCIEX, USA)를 사용하여 분석하였다.

4. 비료 사용량 및 관개수 생산성

코이어 배지를 이용한 멜론 수경재배 시 소모된 각 이온(I)의 양(NU^I; nutrient usage)은 주간 공급된 급액의 용량(V_{ir})과 급액 내 각 이온의 평균 농도(C_{ir}^I)를 곱한 것과 주간 배출된

배액의 용량(V_{dr})과 배액 내 각 이온의 평균 농도(C_{dr}^{I})를 곱한 것의 차를 합산하여 식 (1)과 같이 계산하였다(Grewal 등, 2011).

$$NU^{I} = \sum \left(V_{ir} C_{ir}^{I} - V_{dr} C_{dr}^{I} \right) \quad (1)$$

* NU^{I}; 각 이온(I)의 소모량, V_{ir}; 급액의 용량, C_{ir}^{I}; 급액 내 각 이온의 평균 농도, V_{dr}; 주간 배출된 배액의 용량, C_{dr}^{I}; 배액 내 각 이온의 평균 농도

관개수 생산성(WP; water productivity)은 비순환식 방법의 경우 식 (2)와 같이 공급된 관수량에 과실 생산량으로 나누어 계산하였고, 순환식 방법은 식 (3)과 같이 급액량과 배액량의 차에 과실 생산량을 나누어 계산하였다(Molden, 1997).

$$WP_{o} = \frac{Y}{V_{ir}} \quad (2)$$

$$WP_{c} = \frac{Y}{V_{ir} - V_{dr}} \quad (3)$$

* WP; 비순환식(O) 또는 순환식(C) 수경재배의 관개수 생산성, V_{ir}; 급액의 용량, V_{dr}; 주간 배출된 배액의 용량, Y; 과실 생산량

5. 생육 및 수량 특성 조사

농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준(RDA, 2012)에 따라 멜론 과실 특성을 조사하였다. 착과 후 50일(7월 10일)에 과실을 수확하여 30개의 과실 생체중, 과고, 과폭 및 당도를 조사하였다. 가용성 고형물 함량(soluble solids content, °Brix)은 과실에서 표피와 종자 및 태좌부를 제거한 중간 과육을 착즙하여 시료를 만든 다음 휴대용 당도계(PAL-1, ATAGO, Co., Ltd, Tokyo, Japan)를 이용하여 3반복 측정하였다. 과실의 건물중은 Valantin 등(1999)의 방법에 따라 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$DW = 0.009 \cdot FW^{1.392} \left(r^{2} = 0.95 \right) \quad (4)$$

* DW; 과실의 건물중; FW; 과실의 생체중

6. 실험 통계 방법

시험구는 난괴법 3반복으로 배치하였고 과실 조사 결과의 경우 처리 간의 평균간 비교를 위해 Student's t-test를 실시하였으며, 통계 분석은 Python(Python 3.11.5, Python Software Foundation, Wilmington, USA)을 이용하여 유의성을 분석하였다($p \leq 0.05$). 차트 작성에는 pandas, seaborn, matplotlib.pyplot 라이브러리를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 멜론 과실 수량 및 품질

코이어 배지를 활용한 멜론의 순환식 수경재배에서 과실의 평균 생체중과 건물중은 비순환식에 비하여 각각 71.4, 17.0g 높았고, 과폭은 평균 0.2cm 더 크게 측정되어 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 과고와 과육의 평균 당도는 통계적 유의성을 보이지 않았다(Table 2). 과실 크기 및 중량에서의 통계적인 차이는 과실이 횡적성장을 하는 후기 과실비대 시 순환식 급액의 양분 비율의 변화로 인한 이온의 흡수 농도(uptake concentration) 차이로부터 기인된 것으로 판단된다. Neocleous와 Savvas(2015)는 멜론에서 순환식 급액의 K^{+}와 Ca^{2+}, Mg^{2+}의 비율 및 농도 변화는 작물의 이온 흡수 농도에 영향을 미친다고 보고하였다. 따라서 본 연구의 결과 또한 추가적인 각 기관의 식물체내 이온 분석을 통하여 재순환한 급·배액의 화학적 변화에 따른 식물 영양생리 매커니즘의 해석이 필요할 것으로 사료된다. 그러나 과실의 크기에서 처리 간에 통계적으로는 유의한 차이를 보였지만 국립농산물품질관리원의 농산물표준규격에 따라 네트계 기준 'L'(2.0 − 2.6kg)에 분류되므로 상업적으로는 큰 차이가 없었다(NAQS, 2021). 이 결과는

Table 2. Effect of cultivation methods on melon fruit characteristics.

Treatment	Fresh weight (g/plant)	Dry weight (g/plant)	Fruit height (cm)	Fruit width (cm)	Sugar content (°Brix)
Open	2197.6 ± 101.4[z]	374.2 ± 23.8	17.2 ± 0.4	15.7 ± 0.3	13.7 ± 0.9
Closed	2269.0 ± 133.8	391.2 ± 31.8	17.3 ± 0.5	15.9 ± 0.3	13.9 ± 0.7
t-testy	*	*	NS	**	NS

[z]All values are mean ± SD (n = 30).

[y]NS, *, ** indicates not significant, significant at $p \leq 0.05$ or 0.01, respectively (Student's t-test).

재배기간 중 배액을 전량 재사용해도 수확량과 과실의 품질에는 큰 영향을 미치지 않음을 시사한다.

2. 급 · 배액량 및 관개수 생산성

급액량과 배액량은 생육단계에 따라 변화하며 영양생장기에 급증하여 과실비대기, 즉 정식 후 약 25일경부터 최대치를 기록하고, 과실비대가 종료된 후에는 점진적으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 1). 특히, 누적 일사량이 27MJ·m^{-2}·d^{-1} 이상인 봄철 맑은 날에는 증산과 증발로 인한 일일 물 소모량이 1개체당 최대 2,846mL에 이르렀다(Fig. 3). 75일간의 재배기간 동안 멜론 1개체를 생산하는 데에 쓰인 급액량은 147L이고 배액량은 46.5L이므로 소모된 수분량은 약 100.5L이다. 이를 1ha 기준으로 계산하면 2,573.1톤의 물이 급액으로 사용되었으며, 이중 1,759톤은 작물 재배에 나머지 814.0톤은 배수되었다. 멜론은 수분 스트레스에 의한 생산량 감소가 큰 작물로(English와 Raja, 1996; Yildirim 등, 2009; Mishra 등, 2017) 수분 손실이 최소 50% 이상인 토양재배에서 정상적인 과실을 생산하기 위해서는 증발산(Evapotranspiration) 모델을 활용하여 추정된 수분 요구량은 지역에 따른 토질별로 차이가 있으나 251.9－637mm 범위이다(Sensoy 등, 2007; Wang 등, 2017; Yavuz 등, 2021). 또한 멜론과 같은 박과 채소인 수박의 경우, 1개체 당 최소 수분 요구량은 117.5kg이므로(Li 등, 2018) 본 연구의 데이터는 적절한 양이 급액 되었다고 판단된다.

신선 과실을 생산하는 데에 사용된 관개수를 계산하여 생산성을 분석한 결과 비순환식일 경우 15.0kg/ton으로 나타났으나, 배액을 모두 재사용한 순환식일 때 22.6kg/ton으로 생산성이 7.6kg/ton 상승하였다(Table 3). 즉, 100톤의 같은 양의 물을 사용하여 2kg 크기 멜론을 생산할 수 있는 수량을 계산하였을 때, 비순환식에서는 750개를 수확할 수 있는 반면 순환식을 적용할 경우 1,130개를 생산하므로 380개를 더 생산하는 것으로 계산된다.

토양에서 작물을 재배하는 토경재배와 달리 고형배지경 수경재배에서는 배지의 용량이 제한적이기 때문에 보수력뿐만 아니라 비료성분 보유능력 등이 떨어지므로 근권의 급격한 수분 퍼텐셜 및 화학적 변화가 생길 수 있다(De Boodt와 Verdonck,

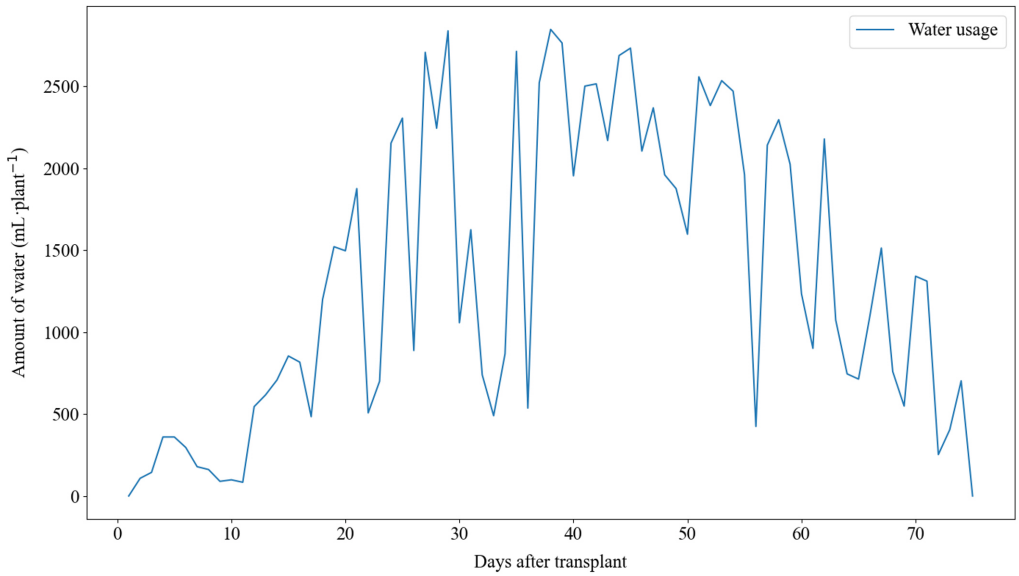

Fig. 3. Daily water usage amounts for hydroponically grown melon during the cultivation period.

Table 3. Volume of irrigation water applied, drainage, water usage and water productivity of hydroponically grown melon.

Parameter	Value
Irrigation water applied (ton/ha)	2,573.1
Drainage (ton/ha)	814.0
Water usage (ton/ha)	1,759.0
Water productivity on open system (kg / ton applied water)	15.0
Water productivity on closed system (kg / ton water used)	22.6

1972; Lee, 1994). 그리하여 배지경 재배 시 근권의 급격한 변화를 방지하기 위하여 일반적으로 배액률을 20－30% 수준으로 유지하여 재배하는 것을 권장한다(Smith, 1987; Schon와 Compton, 1997; Kim 등, 2001, 2010; Hwang 등, 2012). 또한 멜론의 과실은 수분이 90% 이상 차지하므로(RDA, 2018b) 증산에 따른 수분 흡수량은 과실의 크기를 결정하는 데에 큰 영향을 미치는 중요한 요인이다. Chang 등(2012)에 따르면 배액률을 10% 이하로 관리하였을 때보다 20－40%일 때 수량이 약 5% 이상 증가하였다. 이러한 이유로 배액률을 평균 30% 수준으로 관수량을 늘리는 것이 작물을 안정적으로 재배하는 데에 있어 중요한데, 이때 버려지는 배액을 재사용하여 순환식으로 재배를 하면 수자원을 31.6% 절약할 수 있었다.

3. 급 · 배액 양분 소모량

비순환식의 경우, 급액에 포함된 비료의 양은 N, K, Ca, S, Mg, P 순으로 각각 541, 523, 438, 91, 61, 53kg/ha으로 추정되었다. 비료의 양이 가장 많은 N은 312kg/ha가 사용되고 228kg/ha가 배출되어 전체 공급량 중 58%만 사용되었다. P는 53kg 중 39kg, 즉 74%가 소모되어 사용 비율이 가장 높았고, K는 278kg가 사용되고 245kg가 배출되어 전체의 53%만 소모되어 비율이 가장 낮았다. 다른 화학비료의 사용량은 최저 53%에서 최고 76%까지 다양하였다(Table 4). 멜론과 같은 박과 채소인 오이의 사례에서도 유사한 결과를 알 수 있는데, 순환식을 적용하지 않을 경우 N, P, K, Ca, Mg, S는 각각 약 59, 25, 55, 83, 76, 87%가 배출되었다(Grewal 등, 2011). 이 결과는 수자원 및 화학비료를 보다 효율적으로 사용하는 농업 방식이 필요한 현대사회에서 매우 중요한 의미를 지닌다. 멜론에서 순환식 수경재배를 적용할 경우 배출되는 관개수와 비료를 재활용함으로써 자원을 보다 효율적으로 사용할 수 있으며 농업에 큰 비용을 차지하는 비료 값을 절약함으로써 경제적인 이익을 가져올 수 있다.

4. 급 · 배액 양분 비율 균형

배액의 재사용은 급액의 질소 이온 비율에 변화를 가져왔다. 구체적으로 암모니아태 질소의 비율이 점차 감소하고 질산태 질소의 비율이 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4). 이 변화는 멜론이 질소 중 암모니아태 질소를 우선적으로 흡수하는 양분 흡수 특성 때문인 것으로 판단된다(Ikeda와 Osawa, 1981). 다량원소의 비율을 분석한 결과 배액을 재사용 할수록 NO_3^{2-}와 Ca^{2+}의 비율은 각각 최대 9.6, 9.1%까지 증가하였으며, 두 이온을 제외한 다른 이온들은 그 비율이 점차 감소하였다(Fig. 5).

멜론은 근권 환경이 양분의 권장 수준보다 높더라도 수확량과 과실 품질에서 큰 부정적인 영향을 미치지 않을 정도로 근권의 화학적 변화에 다소 둔감하다(Colla 등, 2006; Neocleous와 Savvas, 2015). 멜론처럼 재배기간이 짧은 작물은 정식부터 수확까지 3개월 이내에 재배가 종료되므로 장기재배를 하는 타 시설 과채류와 달리 멜론은 배액의 양분 보정 없이 순환식 수경재배가 가능한 것으로 판단된다. 급액 중 68.4%가 기존의 양분 조성인 새 양액으로부터 공급되었으며, 심각한 양분 불균형이 발생하기 전에 재배가 종료되기 때문에 수량과 품질에 부정적인 영향을 미칠 정도의 급액의 급격한 화학적 변화가 일어나지 않았다. 따라서 과중 2.2kg 이상, 당도 약 14°Brix의 상품과를 수확할 수 있었다고 판단된다.

다른 시설원예 작물의 순환식 수경재배 연구에서도 본 연구와 유사한 결과를 나타내었다. 토마토, 파프리카, 장미 등에서 배액을 재활용한 기간이 길어질수록 특정 이온의 축적이 있을 수 있으며 배액 재활용 초기(8주 이하)에는 그 영향이 크지 않

Table 4. Amount and usage of nutrients in the nutrient solution for each ion of hydroponically grown melon.

Nutrients	Nutrient supplied (kg/ha)	Nutrient usage (kg/ha)	Nutrient drained off (kg/ha)	Nutrient uptake out of total applied (%)	Nutrient drained off (%)
N	541.00	312.45	228.55	58%	42%
P	53.53	39.71	13.82	74%	26%
K	523.59	278.33	245.25	53%	47%
Ca	438.57	248.78	189.79	57%	43%
Mg	61.70	41.58	20.12	67%	33%
S	91.50	56.50	35.00	62%	38%
Fe	0.89	0.66	0.22	75%	25%
Mn	0.39	0.29	0.09	76%	24%
Cu	0.13	0.09	0.04	68%	32%
B	0.47	0.25	0.22	53%	47%

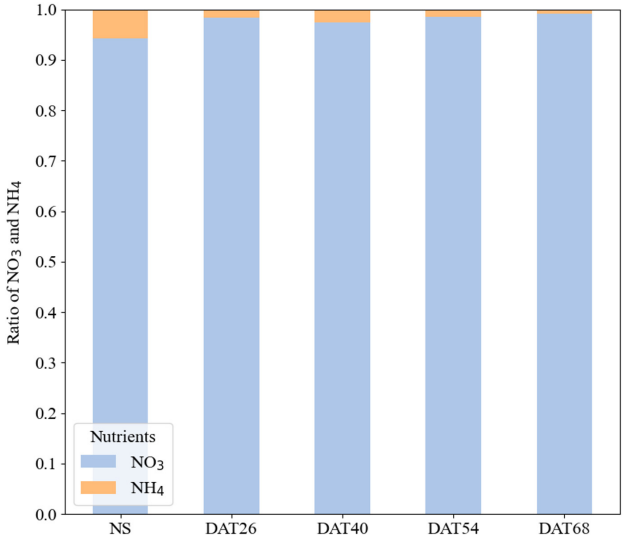

Fig. 4. Ratio changes of nitrate nitrogen to ammonium nitrogen during the cultivation period in closed hydroponic cultivation of melon. DAT: days after transplant, NS: nutrient solution.

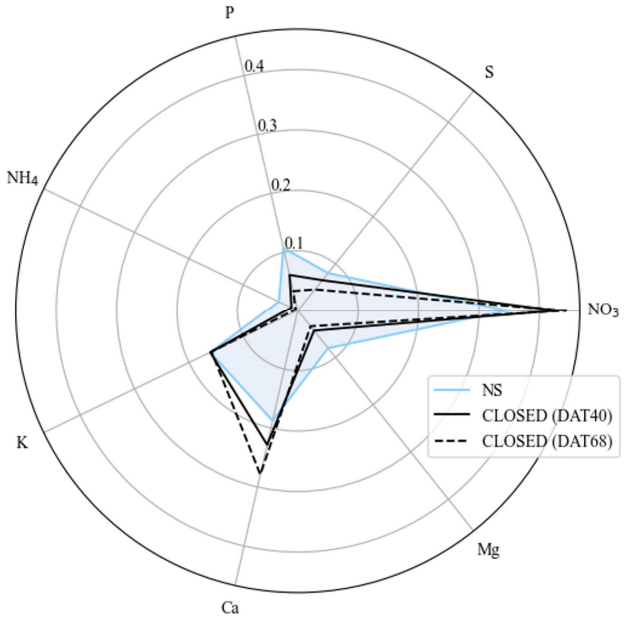

Fig. 5. Ratio changes of macroelements during the cultivation period in closed hydroponic cultivation of melon. DAT: days after transplant, NS: nutrient solution.

다고 하였다. 또한 작물 생육 및 과실 또는 절화의 생산성과 품질 등에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며 순환식 재배 방식을 경제적으로 적용 가능하다고 하였다(Zekki 등 1996; Ehret 등 2005; Ahn과 Son, 2022; Lim 등 2022). Neocleous 등(2017)에 따르면 멜론 수경재배 시 배액을 재활용하여 재배할 때의 생육에 가장 큰 부정적 요인은 Na^+의 농도가 높은 지하수 수질이며, 작물이 소비하지 않기 때문에 지속적으로 축적되게 된다. 그러나 근권 내 20mM까지는 생육에 부정적인 영향이 없었으며 본 실험 또한 한계농도 이상으로 나트륨 축적이 발생하지 않았다(자료 미제시).

이상의 연구 결과를 종합적으로 고려해 볼 때, 멜론 재배에 있어서 순환식 수경재배 방식을 도입함으로써 과실의 우수한 품질을 유지하면서도 물과 비료의 사용을 효과적으로 최적화할 수 있는 것으로 확인되었다. 이러한 접근 방식은 자원의 효율적 사용과 환경 오염 감소에 기여함으로써, 지속 가능한 농업 발전의 새로운 지평을 열어가는 데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 이는 농업 생산성의 향상과 자원의 지속 가능한 관리를 추구하는 현대 사회의 필요성에 부응하는 결과이며, 이를 통해 환경 보호와 경제적 이익을 동시에 추구하는 지속 가능한 농업 모델을 구축하는 데 기여할 것이다.

적 요

본 연구는 코이어 배지를 활용한 멜론(*Cucumis melo* L.)의 순환식 수경재배에 관한 연구로, 이 재배 방식이 멜론의 수량, 과실 품질, 물과 양분 사용 효율에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다. 실험 결과, 순환식으로 키운 과실의 평균 과중은 비순환식에 비하여 71.4g 높았고, 과폭은 평균 0.2cm 더 크게 측정되어 통계적으로 유의한 차이를 보였으나 과고와 과육의 평균 당도는 차이가 없었다. 상업적으로는 큰 차이는 없으나 통계적으로 과중이 증가한 데에는 급액 내 다량원소 비율 변화에 따른 작물 흡수 농도 변화가 관여하였을 것으로 판단되며 이는 추가적인 연구가 필요하다. 과실을 생산하는 데에 필요한 관개수의 생산성을 분석한 결과 비순환식보다 순환식을 적용했을 때 7.6kg/ton 상승하여 수자원을 31.6% 절약할 수 있었다. 또한, 양분의 경우 순환식으로 재배하였을 때 전 재배기간 동안 N, P, K, Ca, Mg, S를 각각 약 59, 25, 55, 83, 76, 87% 만큼 절약할 수 있으며, 배액을 재사용할수록 NO_3^-와 Ca^{2+}의 비율은 각각 최대 9.6, 9.1%까지 증가하고 두 이온을 제외한 다른 이온들은 그 비율이 점차 감소하는 양상을 보였다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때, 순환식 수경재배를 통해 멜론 재배 시 과실의 우수한 품질을 유지하면서도 물과 비료의 사용을 효과적으로 최적화할 수 있을 것으로 판단된다.

추가 주제어 : 멜론, 순환식 수경재배, 이온 흡수, 양액

사 사

이 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01604804)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Ahn T.I., and J.E. Son 2022, Application of an alternative nutrient replenishment method to electrical conductivity-based closed-loop soilless cultures of sweet peppers. Horticulturae 8:295.

Chang Y.H., Y.H. Hwang, C.G. An, H.S. Yoon, J.U. An, C.S. Lim, and G.M. Shon 2012, Effects of non-drainage hydroponic culture on growth, yield, quality and root environments of muskmelon (*Cucumis melo* L.). J Bio-Env Con 21:348-353. (in Korean)

Colla G., Y. Rouphael, M. Cardarelli, and E. Rea 2006, Effect of salinity on yield, fruit quality, leaf gas exchange, and mineral composition of grafted watermelon plants. HortScience 41:622-627. doi:10.21273/HORTSCI.41.3.622

De Boodt M., and O. Verdonck. 1972, The physical properties of the substrates in horticulture. Acta Hortic 26:37-44. doi:10.17660/ActaHortic.1972.26.5

Ding X.T., L.Z. He, R.G. Li, T.T. Qian, H.M. Zhang, H.J. Jin, J.W. Cui, H. Wang, Q. Zhou, J. Zou, D.F. Hui, Y.P. Jiang, K. He, and J.Z. Yu 2022, Zero discharge of nutrient solution to the environment in a soilless greenhouse cucumber production system. Plants-Basel 11:14. doi:10.3390/plants11172252

Domis M., A. Papadopoulos, and A. Gosselin 2002, Greenhouse tomato fruit quality. Hortic Rev 26:239-349.

Ehret D.L., J.G. Menzies, and T. Helmer 2005, Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. Sci Hortic 106:103-113. doi:10.1016/j.scienta.2005.03.002

English M., and S.N. Raja 1996, Perspectives on deficit irrigation. Agric Water Manag 32:1-14.

Grewal H.S., B. Maheshwari, and S.E. Parks 2011, Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study. Agric Water Manag 98:841-846. doi:10.1016/j.agwat.2010.12.010

Hwang Y.H., C.G. An, Y.H. Chang, H.S. Yoon, J.U. An, G.M. Shon, C.W. Rho, and B.R. Jeong 2012, Effect of zero drainage using drainage zero sensor on root zone environment, growth and yield in tomato rockwool culture. J Bio-Env Con 21:398-403. (in Korean)

Ikeda H., and T. Osawa 1981, Nitrate-and ammonium-N absorption by vegetables from nutrient solution containing ammonium nitrate and the resultant change of solution pH. J Jpn Soc Hortic Sci 50:225-230.

Kim H.J., J.H. Kim, Y.H. Woo, W.S. Kim, and Y.I. Nam 2001, Nutrient and water uptake of tomato plants by growth stage in closed perlite culture. J Korean Soc Hortic Sci 42:254-258.

Kim S.E., S.Y. Sim, and Y.S. Kim 2010, Comparison on irrigation management methods by integrated solar radiation and drainage level sensor in rockwool and coir bag culture for tomato. J Bio-Env Con 19:12-18. (in Korean)

Kumar R.R., and J.Y. Cho 2014, Reuse of hydroponic waste solution. Env Sci Pollut Res 21:9569-9577. doi:10.1007/s11356-014-3024-3

Lee Y.B. 1994, Cultivation of fruits and vegetables using solid media. Proc Korean Soc Bio-Env Con 3:34-54. (in Korean)

Li H., X. Yang, H. Chen, Q. Cui, G. Yuan, X. Han, C. Wei, Y. Zhang, J. Ma, and X. Zhang 2018, Water requirement characteristics and the optimal irrigation schedule for the growth, yield, and fruit quality of watermelon under plastic film mulching. Sci Hortic 241:74-82.

Lim M.Y., E.S. Jeong, M.Y. Roh, G.L. Choi, S.H. Kim, and C.K. Lee 2022, Changes of plant growth and nutrient concentrations of the drainage according to drainage reuse and substrate type in sweet pepper hydroponics. J Bio-Env Con 31:476-484. (in Korean)

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2022a, Agricultural business registration information statistics service. Available via https://uni.agrix.go.kr/

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2022b, Present status of greenhouse and vegetable production in 2022. MAFRA, Sejong, Korea, p 116.

Ministry of Environment (ME) 2018, Enforcement rule of the water environment conservation Act, Article 34. Korea. Available via https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=62518&type=new&key=

Mishra S., C. Chugh, A. Sharma, and V. Sharma 2017, Correlation analysis of musk melon, *Cucumis melo* genotypes grown under different water regimes in greenhouse. Biosci Biotechnol Res Commun 10:22-27.

Molden D. 1997, Accounting for water use and productivity. IWMI Books, SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka. doi:10.22004/ag.econ.113623

NAQS 2021, Agricultural products grading standards manual. Ministry of Agriculture, National Agricultural Products Quality Management Service, Gimcheon, Korea, p 59.

Neocleous D., and D. Savvas 2015, Effect of different macronutrient cation ratios on macronutrient and water uptake by melon (*Cucumis melo* L.) grown in recirculating nutrient solution. J Plant Nutr Soil Sci 178:320-332. doi:10.1002/jpln.201400288

Neocleous D., and D. Savvas 2016, NaCl accumulation and macronutrient uptake by a melon crop in a closed hydroponic system in relation to water uptake. Agric Water Manag 165:22-32. doi:10.1016/j.agwat.2015.11.013

Neocleous D., G. Ntatsi, and D. Savvas 2017, Physiological, nutritional and growth responses of melon (*Cucumis melo* L.) to a gradual salinity built-up in recirculating nutrient

solution. J Plant Nutr 40:2168-2180. doi:10.1080/01904167.2017.1346673

RDA 2012, Manual for agriculture investigation. Rural Development Administration, Suwon, Korea, pp 590-593. (in Korean)

RDA 2018a, Development of closed hydroponic technologies with an environment-friendly substrate in cultivation of export fruit vegetable. RDA, Wanju, Korea. (in Korean)

RDA 2018b, Manual for melon cultivation. Rural Development Administration, Wanju, Korea, p 8. (in Korean)

Roh M.Y., G.L. Choi, H.C. Rhee, T.C. Seo, W.S. Kim, and Y.B. Lee 2009, Changes in nutrient element concentrations and growth of cucumber plants (*Cucumis sativus* L. cv. Joeun Baegdadagi) as affected by nutrient solution composition in recirculating hydroponic systems. J Bio-Env Con 18:363-369. (in Korean)

Savvas D., and G. Manos 1999, Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. J Agric Engin Res 73:29-33. doi:10.1006/jaer.1998.0389

Savvas D., G. Gianquinto, Y. Tuzel, and N. Gruda 2013a, Soilless culture. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops 303.

Savvas D., G. Meletiou, S. Margariti, L. Tsirogiannis, and A. Kotsiras 2005a, Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. HortScience 40:802-807. doi:10.21273/hortsci.40.3.802

Savvas D., G. Ntatsi, M. Rodopoulou, and F. Goumenaki 2013b, Nutrient uptake concentrations in a cucumber crop grown in a closed hydroponic system under mediterranean climatic conditions as influenced by irrigation schedule. Paper read at International Symposium on Growing Media and Soilless Cultivation, Jun 17-21, at Leiden, The Netherlands.

Savvas D., V.A. Pappa, A. Kotsiras, and G. Gizas 2005b, NaCl accumulation in a cucumber crop grown in a completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. Eur J Hortic Sci 70:217-223.

Schon M., and M.P. Compton 1997, Comparison of cucumbers grown in rockwool or perlite at two leaching fractions. HortTechnology 7:30-33.

Sensoy S., A. Ertek, I. Gedik, and C. Kucukyumuk 2007, Irrigation frequency and amount affect yield and quality of field-grown melon (*Cucumis melo* L.). Agric Water Manag 88:269-274. doi:10.1016/j.agwat.2006.10.015

Smith D. 1987, Rockwool in horticulture: Grower books. World Vegetable Center, Taiwan.

Tzerakis C., D. Savvas, and N. Sigrimis 2012, Responses of cucumber grown in recirculating nutrient solution to gradual Mn and Zn accumulation in the root zone owing to excessive supply via the irrigation water. J Plant Nutr Soil Sci 175:125-134. doi:10.1002/jpln.201100035

Tzerakis C., D. Savvas, N. Sigrimis, and G. Mavrogiannopoulos 2013, Uptake of Mn and Zn by cucumber grown in closed hydroponic systems as influenced by the Mn and Zn concentrations in the supplied nutrient solution. HortScience 48:373-379.

Valantin M., C. Gary, X.C. Vaissi, B.E. Re, and J.S. Frossard 1999, Effect of fruit load on partitioning of dry matter and energy in cantaloupe (*Cucumis melo* L.). Ann Bot 84:173-181.

Wang J., G. Huang, J. Li, J. Zheng, Q. Huang, and H. Liu 2017, Effect of soil moisture-based furrow irrigation scheduling on melon (*Cucumis melo* L.) yield and quality in an arid region of Northwest China. Agric Water Manag 179:167-176.

Yavuz D., M. Seymen, N. Yavuz, H. Çoklar, and M. Ercan 2021, Effects of water stress applied at various phenological stages on yield, quality, and water use efficiency of melon. Agric Water Manag 246 doi:10.1016/j.agwat.2020.106673

Yildirim O., N. Halloran, Ş. Çavuşoğlu, and N. Şeng l 2009, Effects of different irrigation programs on the growth, yield, and fruit quality of drip-irrigated melon. Turk J Agric For 33:243-255.

Zekki H., L. Gauthier, and A. Gosselin 1996, Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. J Am Soc Hortic Sci 121:1082-1088. doi:10.21273/JASHS.121.6.1082