

수경재배 토마토 재사용 암면 배지의 기초 물리화학적 변화 비교

이재성¹ · 신종화^{2*}

¹국립안동대학교 대학원 원예육종학과 대학원생, ²국립안동대학교 생명과학대학 원예육종학과 교수

Comparison of Basal Physicochemical Changes of Reused Rockwool Substrate in Hydroponic Tomato Cultivation

Jae Seong Lee¹ and Jong Hwa Shin^{2*}

¹Graduate Student, Department of Horticulture and Breeding, College of Life Science and Biotechnology, Andong National University, Andong 36729, Korea

²Professor, Department of Horticulture and Breeding, College of Life Science and Biotechnology, Andong National University, Andong 36729, Korea

Abstract. Rockwool substrate has superior physicochemical characteristics and is often used in crop cultivation. However, rockwool substrate has the disadvantages of high purchase cost and difficulty in disposal. Reuse of substrate can compensate for these disadvantages. Substrate must be disinfected and rehydrated during reuse, and various physicochemical changes during this process must also be considered. This study was to compare the physical properties of two types of rockwool substrates (reused and unused) and to evaluate the reuse potential of rockwool substrate by analyzing the chemical properties of the reused rockwool substrate during the rehydration process. The experiment on substrate physicochemical properties comparison was conducted from March to August 2023 using used rockwool substrates in tomato cultivation and unused rockwool substrates. Drainage time, drainage volume, and substrate weight were measured using load cells installed at the top and bottom of the irrigation monitoring system. The reused rockwool substrate weight and density were higher than those of the unused rockwool substrate, while the average drainage time after irrigation was 1.5 times longer for the reused rockwool than for the unused rockwool. The salinity concentration in different parts of the reused rockwool substrate was found to be lower in the reused rockwool substrate compared to the unused rockwool substrate. The electrical conductivity of the drainage was at its peak at the beginning of the drainage and decreased exponentially as the drainage volume increased. Change in electrical conductivity of the drainage over the irrigation time showed an exponential decay pattern. Through the experiments, the potential reusability of the rock wool substrate was assessed by conducting a comparative analysis of its physicochemical properties.

Additional key words: Drainage, Electric conductivity (EC), Load-cell, Rockwool slab, Substrate

서 론

무토양 재배 시스템(soilless culture system, SCS)은 토양을 사용하지 않고, 인공 배지를 사용하여 작물을 재배하는 방식으로 다양한 작물에 적용되고 있다(Savvas, 2003; Gruda, 2019). 이러한 재배 방식은 토양으로부터 독립적이며, 근권환경과 병해충을 보다 효율적으로 제어할 수 있다는 장점이 있다(Savvas와 Gruda, 2018). 무토양 재배 시스템에서 배지는 작물 뿌리의 지지와 배양액의 저장 및 공급을 통해 작물 생육에 필수적인 역할을 한다. 또한, 배지의 물리적, 화학적 특성에

따라 작물의 양수분 흡수는 영향을 받을 수 있다(Bougoul과 Boulard, 2006).

인공배지 중에서 암면은 우수한 물리적, 화학적 특성을 가지고 있어 작물 재배 생산에 널리 사용된다(Sonneveld와 Voogt, 2009). 2021년 기준으로 국내 시설 수경 재배의 총 면적은 4,270ha에 이르며, 이 중 암면배지의 사용면적은 305ha에 달한다(Kim 등, 2023). 그러나 암면은 구매 시 많은 비용이 요구되며 사용 후 폐기가 용이하지 않다는 단점이 있다(Raviv 등, 2002). 배지의 재사용은 이러한 단점을 보완할 수 있는 방법 하나이다. 하지만 반복적인 배지 재사용은 배지의 물리화학적 변화를 일으키며, 이러한 변화는 작물 생장에 영향을 미칠 수 있다(Ombódi와 Valkai, 2020). Borosić 등(2007)은 신규 및 재사용 암면 배지에서 토마토 작물의 성장과 과실 생산

*Corresponding author: shinhj@andong.ac.kr
Received December 28, 2023; Revised April 29, 2024;
Accepted April 29, 2024

량을 비교하였으며, Acuña 등(2013)은 멜론과 고추 작물에서 신규 및 재사용 암면 배지 사용에 대한 작물 성장 특성을 비교하였다. 하지만 재사용 암면의 물리화학적 변화에 대한 비교 및 분석에 대한 연구는 미비하다. 배지 재사용으로 인한 보수력 등 다양한 물리적 변화는 작물의 가용수분량을 변화시키며 (Shin과 Son, 2015), 배지 내의 잔류 염분 증가로 인한 화학적 변화는 작물의 수분 흡수 장애를 일으킬 수 있다(Chalker-Scott, 1999). 또한 배지는 재사용 시 소독 및 재수화 과정을 거쳐야 하며, 이 과정에서 발생하는 다양한 물리화학적 변화 또한 고려하여야 한다.

토마토(*Solanum lycopersicum* L.)는 전체 시설 작물 재배 면적 54,443ha 중에서 3,229ha를 차지하며, 전체 재배 면적의 6%를 점유하고 있는 중요한 작물이다(Kosis, 2020). 토마토 수경재배에는 암면 및 코이어 배지가 주로 사용된다(Lee 등, 2019; An과 Shin, 2021). 따라서 암면 배지 재사용을 위해서는 배지의 물리화학적 변화 특성에 대한 파악이 필요하다.

본 연구에서는 두 가지 암면배지(재사용, 미사용)의 물리적 특성을 비교하고, 재사용 암면 배지의 재수화 과정에서 발생하는 화학적 특성 분석을 통해 암면 배지의 재사용 가능성을 판단하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험에 사용된 장치 및 재료

안동대학교 자동제어 연구온실(36.5° N, 128.8° E, 일중 피복, polyolefin film, 폭 25m, 길이 24m, 높이 9.6m)에서 2023년 3월부터 8월까지 토마토 ‘도태랑’ 품종이 재배되었다. 2023년 3월 21일에 토마토 묘를 암면 큐브에 이식 후 가식을 실시하였으며, 이후 2주 뒤 가식 된 묘를 암면 슬라브에 정식하였다. 정식 이후에 공급되는 배양액의 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 $1.8\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 으로 설정되었다. 재배 기간 동안 공급 배양액의 EC는 $1.8\text{--}3.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위였으며, pH는 5.8-6.0 범위를 유지하였다. 실험에서는 토마토 재배에 사용된 암면배지와 미사용 암면배지(Grodan prestige, Grodan, Roermond, The Netherlands)가 사용하였다(Fig. 1). 또한 배지 관수는 배지 포화시점까지 실시되었다. 관수시간에 따른 배지 내 수분 이동 분석을 위해, 관수모니터링 시스템(Fig. 2)의 상부에 설치된 로드셀(JSB-50, CAS Co. Ltd., Yangju, Korea)을 이용하여 배지 중량 변화를 측정하였다. 배수 시간 및 배수량은 관수 모니터링 시스템 하단에 설치된 배액 로드셀(JSB-20, CAS Co., Ltd., Yangju, Korea)을 통해 측정되었으며, 측정된 데이터는 데이터 로거(CR1000, Cambell Scientific, USA)에 2초 간격으로 저장되었다.

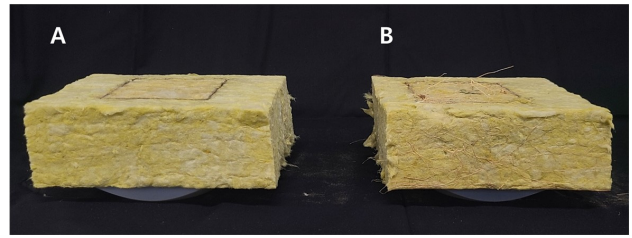


Fig. 1. Profile of new (A) and reused (B) rock slabs.

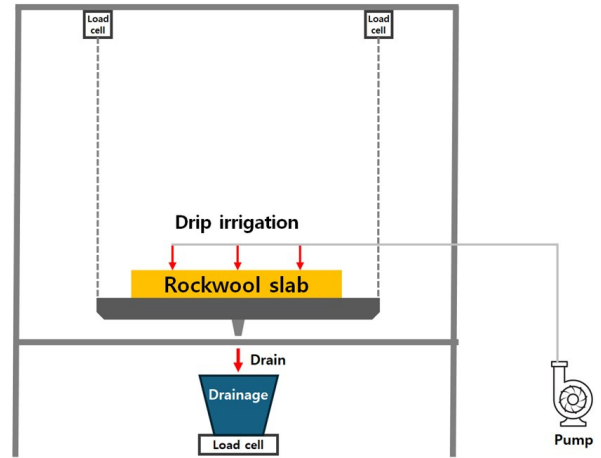


Fig. 2. Irrigation control and monitoring system diagram.

2. 배지 물리성 분석

재사용 및 미사용 암면배지의 물리성 비교를 위해 각 종류별 암면 슬라브($1000 \times 150 \times 75\text{mm}$) 5개를 분석에 사용하였다. 배지의 부피(A)는 가로와 세로, 높이의 길이를 측정 후 곱하여 계산되었으며, 배지 중량의 측정은 순환 건조기(JSOF-400T, JSR Co., Ltd., Korea)를 이용하여 60°C 에서 배지를 완전히 건조시킨 후에 측정하였다. 그리고 측정된 배지 중량(B)에서 부피를(A)을 나누어 밀도(B/A)를 계산하였다. 배지 포화 시의 물의 양(C)과 중력수 배출량(D)은 관수 모니터링 시스템을 활용하여 각각의 배지가 포화되는 시점에서 암면 슬라브의 커버 하단을 절개하여 측정하였다. 측정된 변수들을 활용하여 포장용수량[(C-D)/A]을 계산하였다.

3. 배지 화학성 분석

재사용 및 미사용 암면 각각 3개를 활용하여 부분별 염류 집적도를 측정하였으며, 커터칼을 사용하여 암면을 길이 방향으로 각각 50mm 간격으로 20등분하고, 다시 높이를 2등분하였다. 그리고 등분된 총 40개의 암면 조각(상부 20개, 하부 20개)을 무게의 60배에 해당하는 증류수에 각각 30분간 진탕하였다. 이후 EC 및 pH측정기(Seven Go Duo SG23, Mettler Toledo Co., Ltd., OH, USA)를 이용하여 부분별 배지 내 EC

를 측정하였으며, 측정값을 다음 식(Eq. 1)을 이용하여 환산하였다. 또한 배지에 드리퍼와 압력 보상형 점적단추(2L·h⁻¹; Netafim, Tel Aviv, Israel) 3개를 사용하여 증류수를 공급하였다. 배지의 배수시간에 따른 배액의 EC는 배수가 시작되고 3분 간격으로 25차례 15mL 튜브에 배액을 수집 후 EC 및 pH 측정기로 측정하였다. 이후 측정된 값을 exponential decay 2 변수 함수를 활용하여 관수 시간에 따른 전기전도도의 변화를 분석 실시하였다(Eq. 2).

$$\text{Substrate EC} = EC_{\text{Obs}} \cdot \text{DilutionRate} \quad (60) \quad (1)$$

EC_{Obs}: Observed substrate electrical conductivity (dS · m⁻¹).

$$\text{Substrate EC} = a \cdot \exp(-b \cdot T) \quad (2)$$

T : Irrigation time

4. 통계분석

통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.4, SAS S Institute Inc. Cary, NC, USA)를 활용해 분산분석(ANOVA)을 통해 유의성 검정을 실시하였으며, Tukey's test로 5% 유의수준에서 처리간 비교를 하였다. 그래프는 Sigma Plot(Sigma Plot 12.5, Systat Software Inc, USA) 프로그램을 이용하여 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 배지의 물리적 특성 비교

두 종류 암면배지의 물리적 특성 비교에서 배지의 무게와 밀도는 유의적으로 차이 나지 않았지만, 재사용 암면배지가 미사용 암면배지보다 무게와 밀도가 높은 경향을 보였다(Table 1). Ombódi와 Valkai(2020)는 암면 슬라브 재사용 시 물리적 특성에 변화가 생기며, 암면 슬라브 내의 수분 확산 패턴 또한 변화된다고 보고하였다. 이러한 물리적 특성 변화는 배지 내 작물의 뿌리 잔해에 의해 나타난 것으로 판단된다(Urrestarazu 등, 2008). 포장용수량은 재사용 암면이 미사용 암면에 비해 낮은 경향을 보였으나 통계적으로는 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 1). 포수 후 평균 배수 시간은 재사용 암면이 1,430초로 미사용 암면의 924초 대비 약 1.5배 늦었다(Fig. 3). Ombódi와 Valkai(2020)는 재사용 암면이 미사용 암면보다 수분 보유 능력은 높고, 배지 내 공극률은 더 낮다고 보고하였다. 본 실험에서 재사용 암면과 미사용 암면의 포장용수량은 유의적인 차이를 보이지 않았지만, 배액 발생 시점과 배출 양상에서는 큰 차이를 보였다. 재사용 암면(A)의 경우 배액의 증가 속도가 발생시점부터 급격히 증가하였지만, 미사용 암면(B)의 경우는 배액의 증가 속도가 1,500초까지 선형적으로 증가하다가, 이후 구간에서는 배액 증가속도가 감소하는 패턴을 보였다. 이러한 결과는 암면 배지 내 뿌리 잔해가 배지 내 밀

Table 1. Physical characteristics of unused and reused rockwool slabs (n=5).

Substrate	Volume (L)	Weight (kg)	Density (L·kg ⁻¹)	Field capacity (%)
New rockwool slab	11.25	0.564 ± 0.012 a ^z	0.050 ± 0.001 a	80 ± 0.061 a
Reused rockwool slab	11.25	0.587 ± 0.014 a	0.052 ± 0.001 a	78 ± 0.054 a

^zMean separation within columns by the Tukey's test at *p* ≤ 0.05.

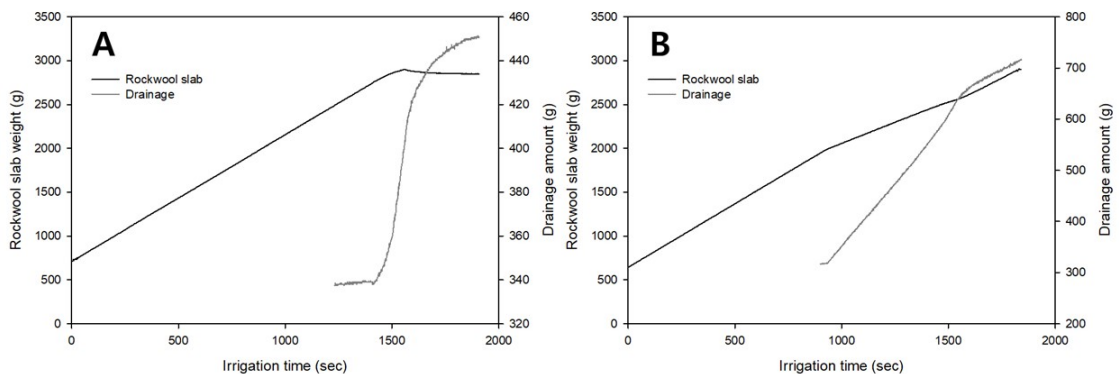


Fig. 3. Drainage starting point of the reused (A) and new (B) rockwool slabs.

수경재배 토마토 재사용 암면 배지의 기초 물리화학적 변화 비교

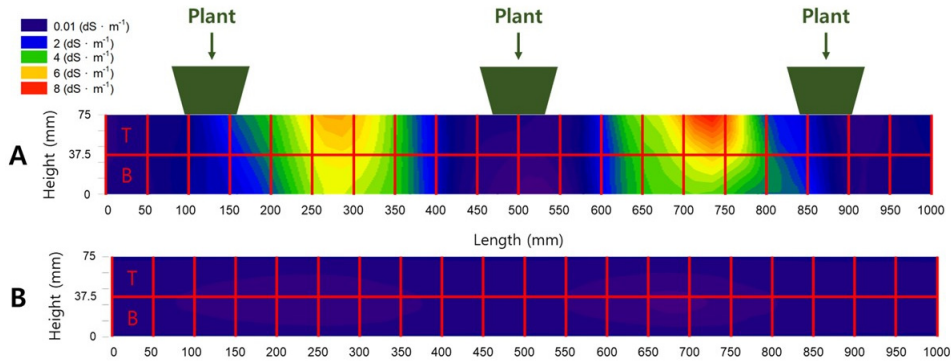


Fig. 4. Distribution of substrate EC in rockwool slab (A: reused, B: new).

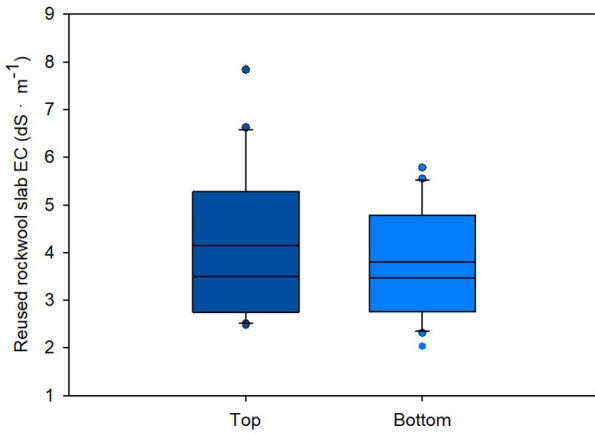


Fig. 5. Comparison of electrical conductivity (EC) measured at the top and bottom in the reused rockwool slab.

도와 수분 확산에 영향을 주어 수분보유능력에 차이가 났기 때문에 판단된다. Acuña 등(2013)은 배지 내의 뿌리 잔해로 인해 발생하는 공극 구조의 변화가 재사용 암면 배지의 수분 보유 능력을 미사용 암면배지보다 향상시키지만, 이로 인한 배지 내의 수분 분포는 균일하지 않다고 보고하였다.

2. 배지 화학적 특성 비교

재사용 암면 배지에서 작물이 식재된 부분과 식재되지 않은 부분의 염류 농도는 각각 $2.81 \pm 0.09 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 와 $5.71 \pm 0.24 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 이었으며, 작물이 식재된 부분의 염류 농도는 작물이 식재되지 않은 곳에 비해 48% 낮았다(Fig. 4A). 작물은 뿌리를 통해 양수분을 흡수하므로, 뿌리에 의한 양수분 흡수는 배지 내 수분 분포와 이동에 영향을 준다(Wu 등, 1999). 또한 작물이 식재된 경우, 뿌리는 주변 배지로부터 양수분을 흡수하고, 작물 식재 부위의 배지 염류 농도는 감소하게 된다(Mcgrath와 Lobell, 2013). 작물 재식 수 및 간격은 배지 내 양수분 분포에 영향을 주는 변수로 간주될 수 있다. 이러한 변수의 적절한 조절은 배지 내 양수분 분포를 균일하게 유지할 수 있는 하나의

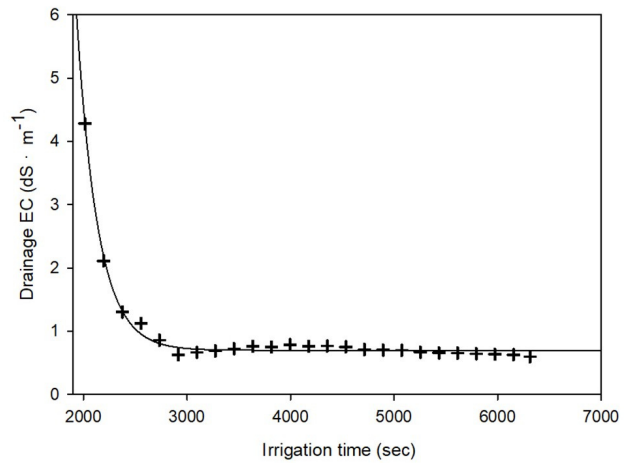


Fig. 6. Relationship between irrigation time and drainage electrical conductivity (EC) for reused rockwool slabs.

방법으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 암면 배지의 상부와 하부의 평균 염류 농도는 상부 $4.15 \pm 1.62 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 와 하부 $3.8 \pm 1.21 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 으로 배지 하부의 염류 농도가 상부에 비하여 8.4% 낮았다(Fig. 5). 배지 내의 수분은 중력에 의해 하부로 이동하여, 배지 하부에는 상부에 비해 많은 수분이 분포하게 된다. 따라서, 배지 하부의 염류 농도는 상부에 비해 낮아질 수 있다. 또한, 배지 내 작물 뿌리 밀도는 상대적으로 배지 하부가 상부에 비해 높다(Acuña와 Bonachela, 2005; Acuña 등, 2013). 따라서, 배지 하부에 배치된 많은 뿌리의 수분 흡수가 재사용 배지 상, 하부 농도의 변화에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 배액의 전기전도도는 배수가 시작되는 시점에서 가장 높았으며, 배액의 양이 증가할수록 기하급수적으로 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 6). 위 결과에서 관수시간과 배액의 전기전도도의 관계(Fig. 6)는 Corwin 등(2007)의 연구 결과와 같은 exponential decay 형태를 보였다. 배수가 시작된 시점에서 배액의 높은 EC는 해당 시점의 배지내 염류 농도가 높다는 것을 의미한다. 위 결과를 통해 배액의 특성은 배수량 혹은 관수

시간에 의해 크게 변화할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 배지 재수화 과정에서 관수시간에 따른 배액 전기전도도의 변화 속도 예측에 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 그로우 백을 사용한 재배에서 배지 내 수분의 이동은 배지 커버의 절개 방식, 작물의 재식간격 및 드리퍼의 적용 위치에 따라 다양하게 변화할 수 있으므로, 이러한 변수들과 배지 내의 수분이동에 관한 연구가 추가적으로 진행되어야 될 것으로 판단된다.

$$\text{Drainage EC} = 0.6964 + 64216.7225 \cdot e^{-0.0049 \cdot T} \quad (3)$$

T: Irrigation time

결론

암면 배지의 재수화 과정에서 재사용 및 미사용 배지의 물리화학적 특성 비교를 통해 배지의 재사용 가능성을 판단하고자 하였다. 관수시간 및 관수량에 따른 배액의 전기전도도의 변화율은 exponential decay한 관계를 가짐을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 얻은 결과는 재사용 암면을 활용하는 재배에서 관수 전략 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

적요

암면은 우수한 물리화학적 특성을 가지고 있어 작물 재배 생산에 많이 사용된다. 그러나 높은 구매 비용과 폐기가 용이하지 않다는 단점이 있다. 배지의 재사용은 이러한 단점을 보완할 수 있다. 배지는 재사용 시 소독 및 재수화 과정을 거쳐야 하며, 이 과정에서 발생하는 다양한 물리화학적 변화 또한 고려하여야 한다. 본 연구는 두 가지 암면배지(재사용, 미사용)의 물리적 특성을 비교하고, 재사용 암면 배지의 재수화 과정에서 발생하는 화학적 특성 분석을 통해 암면 배지의 재사용 가능성을 판단하고자 하였다. 배지 물리화학적 비교 실험은 2023년 3월부터 8월까지 토마토 재배에 사용된 암면배지와 미사용 암면배지를 이용하여 진행되었으며, 재배 기간 동안 암면에 공급된 배양액의 전기전도도와 pH는 각각 1.8-3.5 dS·m⁻¹, 5.8-6.0이었다. 배수시간 및 배수량은 관수모니터링 시스템 상단 및 하단에 설치된 로드셀을 통해 측정되었다. 암면배지의 물리적 특성 비교에서 무게와 밀도는 재사용 암면배지에서 높은 경향을 보였으며, 포수 후 평균 배수 시간은 재사용 암면이 미사용 암면에 비해 1.5배 늦었다. 암면 배지의 부분별 염류 농도는 재사용 암면배지가 미사용 암면배지에 비해 낮게 나타났다. 관수 시간에 따른 배액의 전기전도도 변화는 배수가 시작되는 시점에서 가장 컸으며, 배액의 양이 증가할

수록 급속하게 작아지는 경향을 보였다. 위 실험 결과를 통해 관수시간 및 관수량과 배액의 전기전도도 변화율은 exponential decay한 관계를 보였다.

추가 주제어: 로드셀, 배수, 배지, 암면 슬라브, 전기전도도 (EC)

사사

이 논문은 국립안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

Literature Cited

- Acuña R.A., and S. Bonachela 2005, Response of a sweet pepper crop grown in new and two-year-old reused rockwool slabs in greenhouse on the Mediterranean coast of south-east Spain. *Acta Hort* 697:189-194. doi:10.17660/ActaHortic.2005.697.23
- Acuña R.A., S. Bonachela, and J.J. Magán 2013, Reuse of rockwool slabs and perlite grow-bags in a low-cost greenhouse: Substrates' physical properties and crop production. *Sci Hort* 160:139-147. doi:10.1016/j.scienta.2013.05.031
- An C.B., and J.H. Shin 2021, Comparison of rockwool, reused rockwool and coir medium on tomato (*Solanum lycopersicum*) growth, fruit quality and productivity in greenhouse soilless culture. *J Bio-Environ Control* 30:175-182. doi:10.12791/KSBEC.2021.30.3.175
- Borosić J., B. Benko, B. Novak, N. Toth, I. Zutić, and S. Fabek 2007, Growth and yield of tomato grown on reused rockwool slabs. *Acta Hort* 819:221-226. doi:10.17660/ActaHortic.2009.819.24
- Bougoul S., and T. Boulard 2006, Water dynamics in two rockwool slab growing substrates of contrasting densities. *Sci Hort* 107:399-404. doi:10.1016/j.scienta.2005.11.007
- Chalker-Scott L. 1999, Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. *Photochem Photobiol* 70:1-9. doi:10.1111/j.1751-1097.1999.tb01944.x
- Corwin D.L., J.D. Rhoades, and J. Simunek 2007, Leaching requirements for soil salinity control: steady-state versus transient models. *Agric Water Manag* 90:165-180. doi:10.1016/j.agwat.2007.02.007
- Gruda N.S. 2019, Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy* 9:298-298. doi:10.3390/agronomy9060298
- Kim T.W., S.C. Hong, P.I. Yi, S.H. Jang, and J.M. Suh 2023, Current Status of Using Rock Wool at Hydroponic Greenhouses. *J Korea Soc Waste Manag* 40:429-440 doi:10.9786/kswm.2023.40.5.429

- Korean Statistical Information Service (KOSIS) 2020, Vegetable production (fruits and vegetables). (in Korean) Available via https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0027&conn_path=I3 Accessed 5 July 2022
- Lee J.S., H.D. Lee, S.G. Lee, K.S. Kwak, B.G. Kim, T.H. Kim, J.H. Baek, S.Y. Rho, and Y.S. Hong 2019, Effects of environmental substrate composition on the growth and yield of hydroponically grown tomato. *J Environ Sci Int* 28:729-735. doi:10.5322/JESI.2019.28.9.729
- McGrath J.M., and D.B. Lobell 2013, Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops grown in elevated CO₂ concentrations. *Plant Cell Environ* 36:697-705. doi:10.1111/pce.12007
- Ombódi A., and M.B. Valkai 2020, Effect of reused rockwool slabs on the performance of 'Daras F1' hot pepper under glasshouse conditions. *Hung Agric Eng* 37:48-52. doi:10.17676/HAE.2020.37.48
- Raviv M., R. Wallach, A. Silber, and A. Bar-Tal 2002, Substrates and their analysis. In D. Savvas, H Passam, eds, *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Embryo Publ, pp 25-102.
- Savvas D. 2003, *Hydroponics: A modern technology supporting the application of integrated crop management in greenhouse*. Available at: www.world-food.net (Accessed April 9, 2019).
- Savvas D., and N. Gruda 2018, Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry e a review. *Eur J Hortic Sci* 8:280-293. doi:10.17660/ejhs.2018/83.5.2.
- Shin J.H., and J.E. Son 2015, Comparisons of water behavior and moisture content between rockwools and coir used in soilless culture. *Protected Hortic Plant Fac* 24:39-44 (in Korean). doi:10.12791/KSBEC.2015.24.1.039
- Sonneveld C., and W. Voogt 2009, *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer, NY, USA. doi:10.1007/978-90-481-2532-6
- Urrestarazu M., C. Guillen, P.C. Mazuela, and G. Carrasco 2008, Wetting agent effect on physical properties of new and reused rockwool and coconut coir waste. *Sci Hortic* 116:104-108. doi:10.1016/j.scienta.2007.10.030
- Wu J., R. Zhang, and S. Gui 1999, Modelling soil water movement with water uptake by roots. *Plant Soil* 215:7-17. doi:10.1023/A:1004702807951