Journal of Bio-Environment Control, Vol. 32, No. 2:122-131, April (2023)
DOI https://doi.org/10.12791/KSBEC.2023.32.2.122
pISSN 1229-4675
eISSN 2765-3641

식물공장형 아쿠아포닉스 시스템에서 배지 종류에 따른 딸기 잎의 무기이온 함량과 생육 특성

최수현[1] · 김민경[2] · 정영애[1] · 윤서아[2] · 최은영[3]*
[1]한국방송통신대학교 대학원 농업생명과학과 대학원생, [2]한국방송통신대학교 대학원 농업생명과학과 연구원,
[3]한국방송통신대학교 대학원 농업생명과학과 교수

Leaf Mineral Contents and Growth Characteristics of Strawberry Grown in Aquaponic System with Different Growing Media in a Plant Factory

Su-Hyun Choi[1], Min-Kyung Kim[2], Young-Ae Jeong[1], Seo-A Yoon[2], and Eun-Young Choi[3]*
[1]*Graduate Student, Department of Agriculture and Life Science, Korea National Open University, Seoul 03087, Korea*
[2]*Researcher, Department of Agriculture and Life Science, Korea National Open University, Seoul 03087, Korea*
[3]*Professor, Department of Agriculture and Life Science, Korea National Open University, Seoul 03087, Korea*

Abstract. This study was aimed to determine the effects of grow media on the mineral contents of the leaves and growth characteristics of strawberry grown under aquaponics system in a plant factory. For aquaculture, 12 fish (*Cyprinus carpio*) (total weight, 2.0 kg) were raised in an aquaponics tank (W 0.7 m × L 1.5 m × H 0.45 m, 472.5 L) filled with 367.5 L of water at a density of 5.44 kg·m^{-3} and total 34 of strawberry seedlings were transplanted in the pots filed with 200 g of orchid stone, hydroball or polyurethane sponge in the growing bed (W 0.7 m × L 1.5 m × H 0.22 m) laid out with holly acrylic sheet (140×60 mm, Ø80) on the top of the system. The pH and EC of the aquaponic solution was ranged from 7.6 to 4.9 and 0.24 − 0.91 dS·m^{-1}, respectively. The concentration of NO_3-N was about 28% lower than that of the hydroponic standard solution, and K, Fe and B were 10, 27 and 3.8 times lower, respectively; however, the mineral contents of strawberry leaves were in the appropriate ranges with lower contents in the leaves grown with sponge media. The organic content (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) of the sludge were 61.5, 5.72, 8.92, and 0.24%, respectively. The leaf area, leaf number, and dry and fresh weights of shoot at 81 DAT were significantly higher in the hydroball, and the average number of fruits per plant was significantly higher in both the orchid stone and hydroball. There was no significant difference in the fresh and dry weights of fruits. Integrated all the results suggest that the orchid stone and hydroball media are more effective to utilize nutrients in solid particles of aquaponic solution, compared to the polyurethane sponge.

Additional key words: *Cyprinus carpio*, hydroball, orchid stone, polyurethane sponge, solid particles

서 론

아쿠아포닉스(aquaponics)는 양어(aquaculture)와 수경(hydroponics)이 결합된 재배 방식으로 물고기 사육 수조에서 생성된 영양분을 식물재배에 필요한 양분으로 공급하는 생태계와 유사한 영양 순환 시스템이다(Francis 등, 2003). 아쿠아포닉스 시스템은 일반 수경재배 방식보다 수조 내 식물 생장에 필요한 무기이온 농도가 낮아 생산성이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Pineda-Pineda 등, 2017). 하지만 많은 선행 연구 결과에서 아쿠아포닉스 시스템에 사용되는 물고기 종류, 밀도 및 재배 방식에 따라 지속적으로 경제성을 갖춘 생산량을 도출할 수 있다고 보고되었다(Goddek 등, 2015; Pineda-Pineda 등, 2017; Tyson, 2008). 본 연구팀의 선행 연구에서 아쿠아포닉스 시스템의 물고기 밀도와 인공배지 사용 여부가 미생물 작용에 영향을 주어 수조 내 질소와 인산의 가용성이 달라진다고 보고하였다(Lee 등, 2020; Lee 등, 2022). 박테리아는 자갈, 경석, 플라스틱과 같은 서식하기 위한 표면이 필요한데(Thorarinsdottir, 2015), 하이드로볼과 같은 배지는 물고기 배설물을 변환하는 박테리아 서식지를 제공해줌으로서(Somerville, 2014), 배지를 활용하는 아쿠아포닉스 시스템이 NFT나 floating raft 방식보다 질소를 활용하는 측면에서

*Corresponding author: ch0097@knou.ac.kr
Received January 24, 2023; Revised April 11, 2023; Accepted April 17, 2023

효율이 높다고 하였다(Lennard와 Leonard, 2006). 이러한 결과는 배지가 물고기 배설물의 분해와 수조 내 무기이온 가용성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

아쿠아포닉스에 관한 실험 연구는 주로 상추(Lee 등, 2020), 청경채(Zou, 2016), 바질(Filep 등, 2016), 산채(Lee 등, 2022), 토마토(Yang과 Kim, 2020), 오이(Blanchard 등, 2020) 등을 대상으로 수행되었다. 아쿠아포닉스 재배를 선택하는 이유는 건강한 먹거리 생산과 지속가능한 환경을 위한 것이고 주로 교육용으로 활용하며 작물은 바질, 토마토, 샐러드용 엽채류를 주로 선택한다는 설문 연구보고가 있다(Love 등, 2014). 최근 소득수준의 향상과 건강에 대한 소비자들의 관심도가 증가함에 따라 건강에 좋은 기능성 식품 중 하나로 딸기(*Fragaria* ×*ananassa*) 수요가 증가하고 있다(Kim 등, 2010). 국내 딸기 재배는 9월에 정식하여 12월에 수확하는 촉성재배 작형이 주로 사용되나 식물공장형 아쿠아포닉스의 경우 재배 환경을 제어하여 주년 생산이 가능한 시스템으로 딸기 품종 중 사계성의 특성을 가진 딸기가 생산될 수 있다. 사계성 딸기 품종 중 '관하'는 고온과 장일조건에서 분홍색의 꽃이 연속으로 개화되는 특성이 있고 관상용 분화재배와 실내 조경용으로 적합하다(Lee 등, 2012). 식물공장형 아쿠아포닉스로 재배하는 경우 이상기후나 황사 등의 외부 환경에 관계없이 연중 안전하게 생산할 수 있고 가정이나 교육 현장에서 소규모로 재배가 가능하다. 따라서, 본 연구는 식물공장형 아쿠아포닉스 시스템에서 배지 종류에 따른 딸기 '관하'의 잎 내 무기이온 함량, 생육 특성을 구명하고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 재배 및 재배환경

본 실험은 2022년 10월 14일부터 12월 16일까지 주·야간 온도 21±0.5℃, 상대습도(relative humidity, RH) 60±5%가 유지되는 항온항습실에서 수행하였다. 공시재료는 딸기 '관하' 품종(*Fragaria* ×*ananassa* Duch. cv. Gwanha)로 하였고 순환형 아쿠아포닉스 시스템 상단의 식물 재배조(W 0.7m × L 1.5m × H 0.22m)에 정식하였다. 정식된 모종은 관부 직경이 7.84±0.9mm, 엽병장이 18.0±2.5cm, 엽장이 4.8± 0.5cm, 엽폭이 4.2±0.4cm, 엽수가 4.50±1.54였다. 정식 후 고사된 하엽이나 측지, 러너는 제거하며 재배하였다. 광도는 백색 LED로 200μmol·m^{-2}·s^{-1}, 광주기는 12H/12H(명기/암기)로 설정하였다. 산소 공급은 저압 분산기를 사육조에 8개를 에어펌프(LP-60A, Kosung Valve Co., Ltd., Korea)에 연결하여 24시간 공급하였고 전 재배기간 동안 포화용존산소량이 9－12 mg·L^{-1}을 유지되도록 하였다. 아쿠아포닉스 물고기 수조액은 24시간 이상 받아 둔 수돗물로 주 5회 감소된 물량을 측정 후 보충하였고, 수조액 정화를 위한 외부여과기(Oase Filtosmart 300, Oase GmbH, Hörstel, Germany)를 장착하여 주 1회 필터 세척을 하였다.

양어는 수온 및 pH 등 수질 변화에 내성이 강하여 사육이 용이한 비단잉어(*Cyprinus carpio* var. *koi*)(Kim과 Lee, 2015) 12마리(총 어체중 2kg)를 수조(W 0.7m × L 1.5m × H 0.45m, 472.5L)에 367.5L 물을 채운 후 입식하였고 사육 밀도는 5.44kg·m^{-3}를 유지하였다. 사료(Premium 1C, Woosung Inc., Seoul, Korea)는 1일 3회 어체중의 1%를 공급하였다. 사료 성분은 수분 8.8% 이하, 조단백질 47.21%, 조지방 6.82%, 조섬유 1.21%, 조회분 10.93%, Ca 2.62%, P 1.91%, Mg 0.22%, K 0.08%, Fe 0.04%이며 동물성 단백질류(어분, 어즙 흡착 사료) 배합비율은 64% 이상, 식물성 단백질류(대두박, 옥수수 글루텐) 20% 이상, 곡류(소백분) 10% 이하, 보조사료(비타민 C와 E, 염화콜린, 유화제) 5% 이하, 유지류(어유) 1.0% 이상으로 구성되었다.

딸기 식물체는 물고기를 입어 후 수조액 EC 농도가 0.3dS·m^{-1} 이상이 된 후 정식하여 재배하였고 실험 기간 중 수온은 최대 22.8℃, 최저 19.2℃ 범위를 유지하였다.

2. 실험 처리

딸기 모종은 난석 200g을 채운 네트포트(Hydroponic Net pot, Sein Co., Ltd., China, 8.5×5×7cm)에 12주, 하이드로볼(Gold Label Hydro, Gold Label, Aalsmeer, The Netherlands) 200g을 채운 네트포트에 16주, 폴리우레탄 스펀지를 채운 네트포트에 6주를 심은 후 시스템 상단의 식물 재배 베드(W 0.7m × L 1.5m × H 0.22m)에 구멍을 낸 아크릴판(140×60mm,

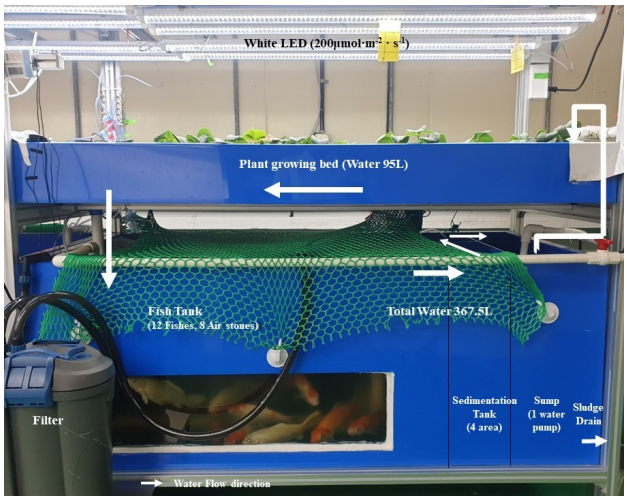

Fig. 1. The aquaponic system used in this study.

Ø80)을 설치하고 그 구멍에 식물체가 심어 있는 각 포트를 배치하였다. 시스템 하단의 수조액은 섬프 탱크(sump tank)에 볼탑으로 수위가 제어되는 수중모터(GSP-100G, GMPUMP Co., Ltd., Korea)를 사용하여 식물 재배 베드로 순환되도록 하였다(Fig. 1).

3. 수질 분석

수조액 및 배양액 pH, EC는 매일 1회 multiparameter(PC Tester 35, Oakton, IL, USA)로 측정하였다. 수조액의 무기이온 중 다량원소인 암모니아태 질소(NH_4-N), 질산태 질소(NO_3-N), 인산(PO_4-P), K, Ca, Mg은 이온 측정기(Auto CG200, Cleangrow, UK)로 분석하였고, 미량원소인 Fe 및 B와 식물체 내 무기이온 함량은 ICP-OES로 분석하였다. 수조액의 슬러지는 비료 특성 성분인 유기물(organic matter, OM)과 무기물 중 비소(As), 카드뮴(Cd), Hg, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, 총질소(T-N), 총인(T-P), K, 염분(NaCl), 수분, 대장균(Escherichia coli O157:H7), 살모넬라(*Salmonella* spp.), 그리고 염산불용해물을 분석하였다.

4. 생육 특성

생육 특성을 조사하기 위하여 엽수, 관부직경, 엽장, 엽폭은 정식 후 42, 49, 56, 63, 70, 77일에 조사하였고, 지상부 및 지하부 생체중 및 건물중, 엽면적은 정식 후 59일과 81일에 측정하였다. 엽장과 엽폭은 가장 큰 복엽을 선택하여 가운데 잎을 기준으로 측정하였다. 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3100 area meter, LI-COR Inc., USA)를 사용하여 측정하였다. 생체중은 수확 후 지상부와 지하부로 분리하여 전자 저울(HS410A, Yousheng, Shanghai, China)로 측정하였고, 생체중 측정 후 건물중은 65°C 건조기(HB-504F-0, Hanbaek Science Inc., Bucheon, Korea)에 72시간 동안 건조 후 무게를 측정하였다. S/R률(shoot/root ratio, S/R), 엽면적률(leaf area ratio, LAR ($cm^2 \cdot g^{-1}$) = 엽면적(cm^2)/줄기와 잎의 총건물중(g)을 계산하였다(Hoffmann과 Pooter, 2002).

5. 통계 분석

지상부·지하부 생체중과 건물중, 엽면적 등의 생육 특성은 각 처리마다 3반복으로 측정한 평균값으로 각 처리 간 통계적 유의성 검정은 SAS(Statistical Analysis System, V9.4, Cary, NC, USA) 프로그램을 이용하여 Duncan's multiple range test(DMRT)로 검증하였다.

결과 및 고찰

1. 수조액의 수온, pH 및 EC 변화

전 재배기간 동안 21±0.5°C로 설정된 항온항습실 내 실제 온도는 21±0.99°C, RH는 60±5%로 잘 유지되었고 수조액 수온은 일평균 20.73±0.99°C, 최고 22.8°C, 최저 19.2°C이었다. 유기질소의 질산화에 영향을 미치는 요인(미생물 농도, pH, 온도) 중 온도는 중요한 변수로 9－35°C 범위에서 질산화과정이 일어난다고 하였다(Wong-Chong와 Loehr, 1975). 또한, 딸기 '관하'의 생육 온도 범위는 최저 5°C 이상, 최고 28°C 이하의 범위가 좋다고 하였고(Lee 등, 2012), 근권온도 18°C가 딸기 생육에 적합하다(Jun 등, 2008). 이에 따라서 본 연구의 수조액 온도는 적정 범위였다.

수조액은 전 재배기간 동안 pH 4.9－7.6 수준으로 정식 후 13일까지 7.2 수준을 유지하다가 그 후 18일까지 7.2에서 5.9

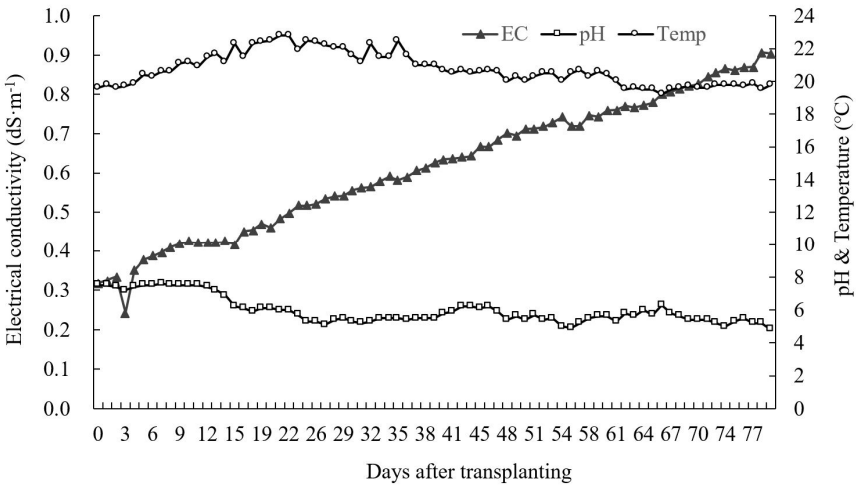

Fig. 2. Changes of pH, electrical conductivity (EC), and temperature in the solution of aquaponic system.

로 하강하였다(Fig. 2). 일반적으로 아쿠아포닉스에서 pH 하강은 물고기 배설물의 유기태질소가 질산화균에 의해 질산태질소(NO_3-N)로 전환되는 질산화과정(nitrification)에서 H^+ 이온 축적과 무기화과정에서 CO_2가 축적되기 때문이다(Schreier 등, 2010). 아쿠아포닉스에서 질산화 박테리아 활동에는 pH 7.5 – 9.0가 적정 수준이고(Hochheimer과 Wheaton, 1998), 유기질소의 질산화과정은 pH 6.0 – 8.5에서 진행된다고 하였다. 본 연구 결과에서는 전 재배기간동안 pH 6.0보다 낮은 수준을 보였지만, 엽내 총질소함량이 2.9 – 3.1% 범위로 적정 수준인 3.0 – 4.0%에서 크게 벗어나지 않아 질산화는 진행된 것으로 보인다(Table 3). 딸기의 적정 배양액 pH는 6.0 – 6.5 범위로(RDA, 2019), 본 실험에서는 정식 18일 이후 딸기는 pH 5.9 이하 수준으로 재배되었다.

EC(electrical conductivity)는 수조액을 보충하는 시점에 잠시 하락하는 것을 제외하고 정식 후부터 81일째까지 지속적으로 증가하여 평균 0.62dS·m^{-1}, 최고 0.91dS·m^{-1}, 최저 0.24dS·m^{-1}로 유지하였다(Fig. 2). 양액농도에 따른 생육과 수량 연구는 주로 일계성 품종 위주로 수행되어 사계성 딸기에 대한 연구가 부족하다. 본 연구와 동일한 '관하' 품종은 아니지만 같은 사계성 딸기 품종인 '페치카'의 고랭지 여름재배에서 야마자키 조성액(NO_3 5.0, NH_4 0.5, H_2PO_4 1.5, K 3.0, Ca 2.0, Mg 1.0me·L^{-1})의 EC 농도(S)를 2/3S(0.5dS·m^{-1}), S(0.75dS·m^{-1}), 4/3S(1.0dS·m^{-1}), 5/3S(1.25dS·m^{-1})로 각각 달리하여 처리하였을 때 0.75dS·m^{-1}일 때 생체중, 건물중과 뿌리 활력이 우수하다고 보고되었다(Lee 등, 2006). Rakocy 등(2006)도 아쿠아포닉스에서 추천되는 EC 농도는 0.3 – 0.6 dS·m^{-1} 수준이라고 하였다.

2. 수조액, 슬러지 및 식물체의 무기이온 농도

수조액의 NO_3-N은 정식 후 32 – 67일 기간 중 50 – 60mg·L^{-1}, NH_4-N는 15 – 20 mg·L^{-1} 수준을 유지하였는데 이는 식물체 정식 전(−43일)에 측정된 NO_3-N(30mg·L^{-1})와 NH_4-N(1.0 mg·L^{-1}) 농도보다 증가한 결과를 보였다(Fig. 3). 이러한 질소 변동은 수조액의 pH 변화와 관련이 있는데(Schreier 등, 2010), 정식 후 수조액의 pH는 18일부터 7.2에서 5.9로 하강하여 48일째는 5.4로 떨어졌다(Fig. 2). 아쿠아포닉스 시스템에서 pH 변화는 질산화과정(nitrification)과 관련이 있는데(Schreier 등, 2010), 본 실험에서도 정식 19일전 염소 제거된 수돗물로 60% 환수한 직후 수조액의 NO_3-N과 NH_4-N 농도는 각각 35.45±19.13mg·L^{-1}, 1.0±0.28mg·L^{-1}로 낮았으나 정식 8일후 각각 56.21±16.08mg·L^{-1}, 7.35±0.71mg·L^{-1}, 정식 32일 후 각각 60.02±8.70mg·L^{-1}, 11.47±0.55mg·L^{-1}, 정식 48일 후 각각 45.35±0.07mg·L^{-1}, 14.32±0.63mg·L^{-1}, 정식 67일 후 각각 51.04±0.86mg·L^{-1}, 12.63±0.43mg·L^{-1}로 농도가 증가하는 결과를 보였다(Fig. 3). 최근 발표된 연구결과에서 원형수조(Ø4.5m × H 0.7m)에 비단잉어(평균 어체중 880g) 120마리를 입식하여 9.49kg·m^{-3} 사육 밀도로 엽채류(유럽 상추 10품종)를 재배 실험한 결과, 물고기 재배 후 6주(식물 정식 전)에서 14주(정식 7주 후)까지 NO_3-N 농도는 14.53±3.89에서 66.32±2.56mg·L^{-1}로 EC는 367.8±13.7에서 712.3±24.5μS·cm^{-1}로 증가했고 pH 변화는 6.07±0.31에서 6.02±0.04라고 보고되었다(Lee, 2022). 이 연구에서 수조액의 NO_3-N 농도가 본 실험보다 높았던 것은 사육 밀도가 본 실험보다(5.44kg·m^{-3}) 높고 작물 종류와 재식밀도가 다른 것과 관련이 있고 사육수의 pH 수준이 안정되게 유지된 것은 본 실험과는

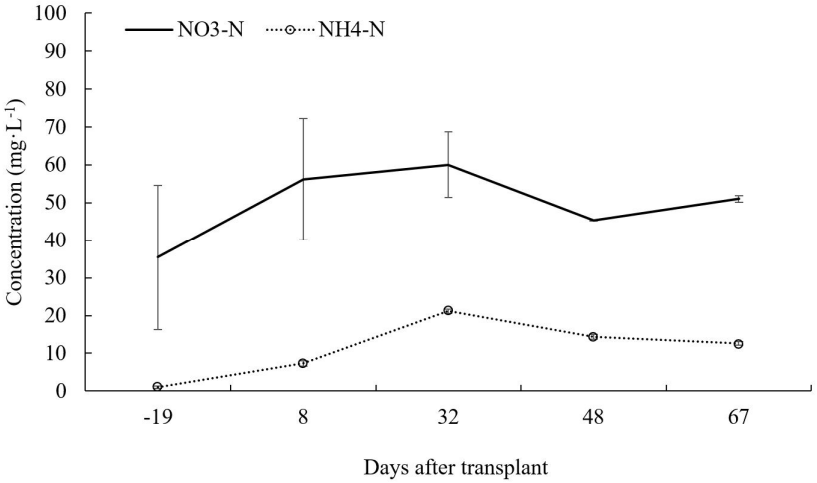

Fig. 3. Changes of nitrate nitrogen (NO_3-N) and ammonium nitrogen (NH_4-N) concentrations in the solution of the aquaponic system at the 19 days prior to transplant, 8, 32, 48, and 67 days after transplant. Bars represent standard deviation of 2 replications.

달리 실험 중 지속적으로 KOH가 투입된 결과이다.

정식 후 67일째 측정된 수조액 NO_3-N와 NH_4-N 농도를 밀리그램 당량으로 변환하면 각각 3.6me·L^{-1}와 0.9me·L^{-1}으로 딸기 수경재배용 표준 배양액 NO_3-N(5.0me·L^{-1})보다 약 28% 낮고 NH_4-N(0.50me·L^{-1})보다는 높았다(Table 1). Ca, Mg, S 이온은 수경배양액 농도와 유사한 수준을 보였고, P은 1/2 수준이었다. K, Fe, B는 수경재배 표준 배양액보다 각각 10배, 27배, 3.8배 낮은 수준이었다(Table 1). 정식 19일전 염소 제거된 수돗물로 60% 환수한 직후 수조액의 K은 6.95±6.01mg·L^{-1}로 낮았으나, 정식 8일후 51.63±8.40mg·L^{-1}로 높아졌고 정식 32일 후 26.57±3.16mg·L^{-1}, 정식 67일 후 12.23±0.04mg·L^{-1}로 낮아졌다(자료 미제시).

수조액 슬러지는 아쿠아포닉스 시스템 하단에서 drain관으로 매일 건물중 기준 1.3 – 1.7g을 채취하여 분석한 결과, 유기물 함량(OM), N, P, K의 함량이 각각 61.5, 5.72, 8.92, 0.24%로 나타났다. 우리나라 비료 공정규격에 의한 가공계분이 함유하여야 할 주성분의 최소량이 N, P, K 전량의 합계량이 6%이고 유기물이 70%인 것을 감안할 때 수조액 슬러지는 비료로서 충분한 특성을 갖춘 것으로 보인다(Table 2). 미량원소 중 Cu와 Zn은 다른 이온보다 높았는데 이 결과는 사료효율 개선 등의 목적으로 사료에 첨가되는 Cu, Zn, As, Mn, Fe 및 셀레늄(Se) 같은 이온들이 전량 동물체 내에서 이용되지 않고 일부 분뇨로 배출되기 때문이다(Ko와 Kim, 2016). 우리나라에서 부산물 비료 중 부숙 유기질비료에 속하는 가축분뇨 퇴·액비의 함량 기준은 유기물 대 질소의 비 45 이하, 건물중에 대한 NaCl은 2.0% 이하, 염산불용해물은 25% 이하로 지정하고 있는데(RDA, 2022), 본 연구의 실험 결과 수조액 슬러지의 유기물 대 질소의 비는 10.75, NaCl은 0.36%(자료 미제시), 염

Table 1. Mineral concentrations in the solution of the aquaponic system measured at the 67 days after transplant (20th of Dec., 2022).

Component	Macroelement (me·L^{-1})							Microelement (mg·L^{-1})	
	NO_3	NH_4	K	P	Ca	Mg	S	Fe	B
Experiment	3.6[z]	0.9	0.3	0.7	2.9	0.9	1.0	0.11	0.13
Reference[y]	5.0	0.5	3.0	1.5	2.0	1.0	1.0	3.0	0.50

[z]Each value is the mean of 2 replications.
[y]Nutrient solution for strawberry referred from Lee et al. (2015).

Table 2. Contents of organic matter (OM) and minerals in the sludge collected from the aquaponics system measured at the 73 days after transplant (26th of Dec., 2022).

Component	OM (%)	Macroelement (%)			Heavy metal and Microelement (mg·kg^{-1})							
		N	P	K	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
Sludge	61.5[z]	5.72	8.92	0.24	2.14	1.71	nd[y]	0.15	15.19	263	19.6	790
Reference[x]	> 30	-	-	-	< 45	< 5	< 2	< 130	< 200	< 360	< 45	< 900

[z]Each value is the mean of 2 replications.
[y]Non detectable.
[x]The official standards for composed organic fertilizer by the Rural Development Administration (RDA, 2022).

Table 3. Mineral contents of strawberry leaves grown in the aquaponic system with the orchid stone, hydroball, and polyurethane sponge at the 81 days after transplant (3rd of Jan., 2023).

Growing media	Macroelement (%)					Microelement (mg·kg^{-1})	
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	B
Orchid stone	3.05 a[zy]	0.80 a	3.23 a	1.79 a	0.61 a	77	115
Hydroball	3.11 a	0.85 a	3.01 a	1.80 a	0.61 a	93	120
Sponge	2.88 b	0.65 b	2.75 b	1.66 b	0.57 b	80	100
Reference[x]	3.0 – 4.0	0.2 – 0.4	1.1 – 2.5	0.5 – 1.5	0.25 – 0.45	50 – 300	25 – 50

[z]Means with different letters within the column are significantly different by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.
[y]Each value is the mean of 2 replications.
[x]Campbell (2000).

산불용해물은, 8.28%(자료 미제시)로 함량 기준에 적합하였다. 일반 가축 퇴비와 다르게 병원성 미생물인 대장균(*Escherichia coli* O157:H7)와 살모넬라(*Salmonella* spp.)는 전혀 배출되지 않았다(자료 미제시).

딸기 잎의 무기이온 함량은 적정수준을 크게 벗어나지 않았고 스펀지 처리에서 난석과 하이드로볼 처리보다 낮았다(Table 3). 엽내 B 함량은 적정수준인 25 − 50mg·kg^{-1}보다 2배 이상의 수준을 보였는데 이는 국내 딸기 엽내 B 적정수준인 50 − 100mg·kg^{-1} 범위이다(Table 3). Pineda-Pineda 등(2017)은 틸라피아(tilapia, *Oreochromis mossambicus*)를 25kg·m^{-3} 밀도로 사육하면서 상추를 m^{2}당 25포기 재배하였을 때 K, Ca, Cu를 제외하고 잎의 무기이온 함량이 정상 수준이었고 잎에 결핍 증상이 관찰되지 않았다고 하였다. 본 연구결과에서 수조액의 NO_3-N은 수경재배 표준 배양액보다 약 28% 낮고 K, Fe, B은 각각 10배, 27배, 3.8배 낮았으나(Table 1), 딸기 잎의 무기이온 함량은 적정 수준을 보였다(Table 3). 이러한 결과는 슬러지가 비료 성분이 높은 특성을 가진 것과 관련이 있는 것으로 보인다.

배지를 사용하지 않은 스펀지 처리구에서 잎의 무기이온 함량이 낮았는데 이 결과는 Blanchard 등(2020)이 수조액과 수조 내 슬러지(solid particles)는 지속적으로 인공배지(100% 펄라이트) 내에서 상호작용되어 식물에 적정한 영양분이 된다고 한 것과 관련 있다. 그는 수조액의 무기이온 농도가 오이 수경재배 표준 배양액에 비해 낮음에도 불구하고 식물체 내 무기이온 결핍이 발생하지 않은 것은 슬러지가 지속적으로 근권의 인공배지 내에서 무기화되어 식물체의 추가적 양분이 되었기 때문이라고 하였다. 또한, 틸라피아 수조액의 pH 수준(5.0, 5.8, 6.5, 또는 7.0)이 오이의 생장률, 절간장, 수량에 유의적 영향을 미치지 않았고 pH 수준이 일부 무기영양소의 흡수와 가용성에 영향은 주었지만 상업적 생산 수량에 중요한 영향은 없었다고 하였다. 그 이유에 대해서는 수조 내 많은 양의 슬러지(solid particles)와 가용성 유기물의 pH 완충 작용(pH-buffering functional groups)이 탈질작용과 연관성이 있다고 하였다. 슬러지는 아쿠아포닉스에서 P과 K 공급량을 증가시킨다고 하였다(Monsees 등, 2017).

이러한 선행 연구 결과를 토대로, 배지를 사용하지 않은 스

Table 4. Leaf growth characteristics of strawberry grown in the aquaponic system with the orchid stone, hydroball, and polyurethane sponge. Measurements were conducted at the 42, 49, 56, 63, 70, and 77 days after transplant (DAT).

DAT	Growing media	No. of new leaves	No. of leaves	Crown diameter (mm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf petiole length (cm)
42	Orchid stone	1.00 a[z,y]	5.67 a	13.79 a	6.80 a	6.50 a	9.40 a
	Hydroball	0.33 a	5.33 a	13.62 a	6.03 b	5.57 b	7.77 ab
	Sponge	0.67 a	4.33 a	11.87 a	5.57 b	5.27 b	6.07 b
49	Orchid stone	0.67 a	5.67 a	12.19 a	6.97 a	6.40 a	9.23 a
	Hydroball	1.00 a	6.33 a	12.59 a	6.53 ab	5.90 a	9.13 a
	Sponge	0.67 a	3.33 b	11.04 a	5.70 b	5.43 a	6.30 b
56	Orchid stone	1.33 a	6.00 a	10.90 a	7.13 a	6.80 a	9.50 a
	Hydroball	0.67 a	7.67 a	12.60 a	6.87 a	6.17 b	8.70 ab
	Sponge	0.33 a	6.00 a	11.95 a	6.20 a	5.77 b	6.13 b
63	Orchid stone	0.67 a	7.00 a	12.27 a	7.27 a	6.87 a	10.20 a
	Hydroball	0.33 a	8.00 a	12.78 a	6.90 a	6.33 a	9.17 a
	Sponge	0.33 a	6.33 a	12.49 a	5.67 b	5.07 b	6.30 b
70	Orchid stone	0.00 a	8.00 ab	10.83 b	7.37 a	7.03 a	9.23 a
	Hydroball	0.01 a	9.67 a	13.99 a	6.73 a	6.23 ab	8.87 a
	Sponge	0.33 a	7.33 b	12.14 ab	6.20 a	5.70 b	6.83 a
77	Orchid stone	0.33 a	6.00 b	14.15 b	7.40 a	6.83 a	10.20 a
	Hydroball	1.00 a	9.33 a	17.25 a	7.37 a	6.53 a	8.57 ab
	Sponge	0.33 a	7.00 b	13.57 b	6.23 a	5.93 a	6.63 b

[z]Means with different letters within the column are significantly different by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.
[y]Each value is the mean of 3 replications.

펀지 처리에 비해 난석과 하이드로볼은 표면에서 슬러지의 양분이 호기성 박테리아의 작용으로(Monsees 등, 2017) 가용화되어 식물 영양분으로 활용된 것으로 보인다. 박테리아는 자갈, 경석, 플라스틱과 같은 서식하기 위한 표면이 필요한데(Thorarinsdottir, 2015), 인공배지와 필터는 물고기 배설물을 변환하는 박테리아 서식지를 제공한다고 하였다(Somerville, 2014). 배지를 활용하는 아쿠아포닉스 시스템이 NFT 방식이나 floating raft 방식보다 미생물에 더 많은 표면적을 제공하여 질소를 활용하는 측면에서 효율이 높다(Lennard와 Leonard, 2006). 또한, Shukla 등(2008)은 아쿠아포닉스에서 마그네슘은 물고기 사료의 산화마그네슘(MgO) 형태로 공급되어 슬러지뿐만 아니라 물고기가 먹지 않고 남은 잔량의 사료에서 식물 영양분으로 공급될 수 있다고 하였다. 본 실험의 수조 내 Fe 농도가 매우 낮았지만(Table 1) 식물체 Fe 함량이 결핍 수준이 아닌 것은 물고기 사료에 0.04% 함유된 Fe이 식물 영양분으로 가용화된 것으로 보인다.

3. 생육 및 수량 특성

엽수와 관부직경은 정식 70일 이후 인공배지 종류에 따른 유의차가 나타났는데, 엽수는 정식 후 70일에 하이드로볼 배지에서 스폰지보다 약 2개 많았고, 관부직경은 정식 77일에 스폰지보다 약 4mm 더 굵었다. 엽병장은 정식 77일에 난석에서 스폰지보다 약 3.5cm 길었다(Table 4). 생육은 59일째에는 인공배지 처리에 따른 유의차가 없었지만, 81DAT에는 유의

Table 5. Plant growth characteristics of strawberry grown in the aquaponic system with the orchid stone, hydroball, and polyurethane sponge. Measurements were conducted at the 59 and 81 days after transplant (12th of Dec., 2022 and 3rd of Jan., 2023).

DAT	Growing media	Leaf area ($cm^2 \cdot plant^{-1}$)	No. of leaves per plant	Fresh weight ($g \cdot plant^{-1}$)		Dry weight ($g \cdot plant^{-1}$)		Leaf area ratio ($cm^2 \cdot g^{-1}$ DW)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
59	Orchid stone	446 a[zy]	7.00 a	17.54 a	13.67 a	3.56 a	1.34 a	92.37 a
	Hydroball	432 a	7.33 a	18.07 a	10.11 a	3.73 a	1.17 a	89.17 a
	Sponge	513 a	6.67 a	20.66 a	12.34 a	4.16 a	1.01 a	99.20 a
81	Orchid stone	371 b	6.00 b	14.97 b	9.85 a	3.18 b	1.24 ab	83.06 a
	Hydroball	671 a	10.67 a	23.40 a	11.96 a	5.37 a	1.56 a	96.98 a
	Sponge	368 b	7.00 b	13.78 b	8.72 a	3.38 b	1.14 b	80.84 a

[z]Means with different letters within the column are significantly different by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.
[y]Each value is the mean of 3 replications.

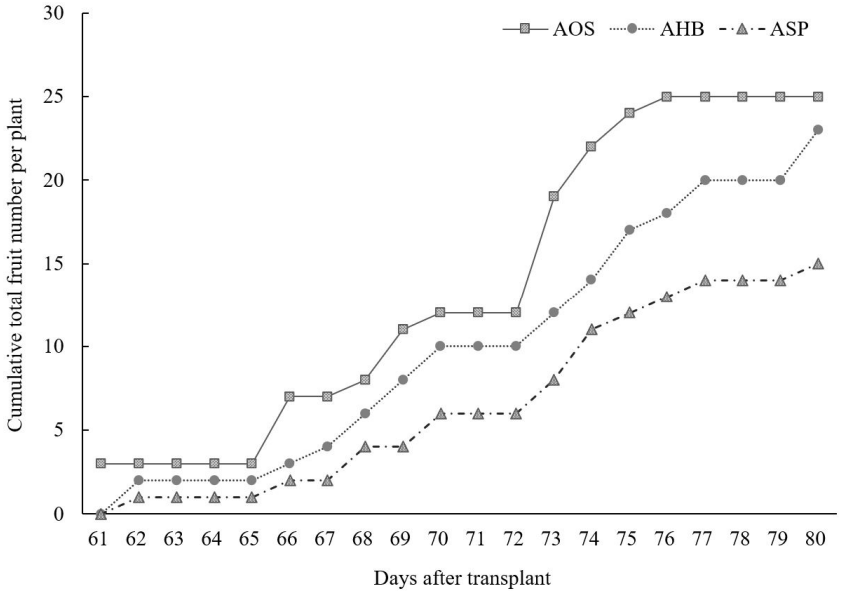

Fig. 4. Cumulative fruit number harvested from the plants grown in the aquaponic system with the orchid stone (AOS), hydroball (AHB), and polyurethane sponge (ASP). Measurements were conducted for 3 plants per treatment.

차가 나타났다(Fig. 5와 Table 5). 엽면적, 엽수, 지상부 생체중과 건물중은 정식 81일째에 하이드로볼 처리에서 유의적으로 높았고, 난석과 스폰지 처리간 유의차는 보이지 않았으며 엽면적 비율(LAR)은 처리별 유의차가 없었다(Table 5). 본 실험에서 딸기의 뿌리 발달 저해가 관찰되지 않았다(자료 미제시). 일반적으로 작물 뿌리 세포의 효소 활성은 H^+의 농도에 따라 영향을 받으며, pH가 낮아짐에 따라 옥신(auxin)의 활성이 낮아 발근이나 뿌리의 신장이 저해된다고 하였다(Inoue 등, 2016). 하지만, Tyson 등(2008)은 아쿠아포닉스에서 pH는 7.5 – 8.0 수준이 필요하지만 오이 재배 실험에서 pH를 5.0까지 낮춰도 수량 차이가 없었다고 하였다. 이 결과는 앞서 언급한 수조내 슬러지(solid particles)와 가용성 유기물의 pH 완충 작용(pH-buffering functional groups)과 관련이 있는 것으로 판단되고 일반 수경재배와는 다른 특성으로 보인다.

누적 과수는 스폰지 처리에서 가장 적었다(Fig. 4). 과실 생체중과 건물중은 처리별 유의차가 없었으며 과실 내 가용성고형물 함량은 스폰지(8.19) > 하이드로볼(7.56) > 난석(6.79 °Brix) 순으로 나타나 스폰지보다 난석에서 평균 1.4°Brix 높은 것을 알 수 있다(Table 6). 배지를 사용하지 않은 스펀지 처리에서 재배된 과실 내 가용성고형물 함량이 높았던 것은 스펀지 처리에서 누적 과수와 총과실수가 가장 작았던 것과 관련이 있어 보인다. Lee 등(2014)는 착과 정도가 '설향' 딸기의 수량, 과실 품질 및 식물체 생육에 미치는 영향을 밝히고자 1화방부터 4화방까지 과실수가 20, 25, 30이 되도록 착과량을 조절하였을 때 착과량이 적을수록 당도는 증가하였다고 보고하였다.

본 연구의 결과를 종합해보면, 아쿠아포닉 시스템에서 난석이나 하이드로볼 배지는 폴리우레탄 스펀지보다 수조액의 슬러지 비료성분을 가용화하는 데 효율적인 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 식물공장형 아쿠아포닉스 시스템에서 배지 종류에 따른 딸기 잎의 무기이온 함량과 생육 특성을 관찰하고자 수행되었다. 양어는 비단잉어(*Cyprinus carpio*) 12마리(총 어체중, 2.0kg)를 수조(W 0.7m × L 1.5m × H 0.45m, 472.5L)

Table 6. Fruit characteristics of strawberry grown in the aquaponic system with the orchid stone, hydroball, and sponge. Measurements were conducted at the 81 days after transplant (3rd of Jan., 2023).

Growing media	No. of fruits per plant	Fruit fresh weight ($g \cdot fruit^{-1}$)	Fruit dry weight ($g \cdot fruit^{-1}$)	Soluble solid content (°Brix)
Orchid stone	8.33 a[zyx]	5.34 a	0.42 a	6.79 c
Hydroball	7.67 a	6.03 a	0.52 a	7.56 b
Sponge	5.00 b	5.63 a	0.51 a	8.19 a

[z]Means with different letters within the column are significantly different by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.
[y]Each value is the mean of 3 replications.
[x]Harvesting was conducted from the 1st cluster of 3 plants.

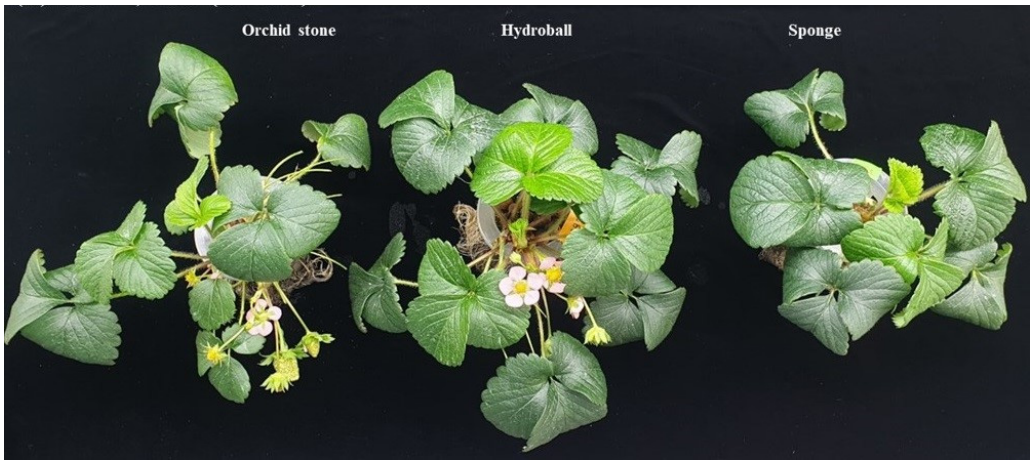

Fig. 5. 'Gwanha' strawberry plants grown in the aquaponic system with the orchid stone, hydroball, and polyurethane sponge at 81 days after transplant.

에 367.5L 물을 채운 후 입식하였고 5.44kg·m^{-3} 밀도로 사육하고 딸기 모종 34개체는 시스템 상단의 재배 베드(W 0.7m × L 1.5m × H 0.22m)에 구멍을 낸 아크릴판(140×60mm, Ø80)을 설치하고 난석, 하이드로볼 그리고 폴리우레탄 스폰지를 채운 네트포트에 정식하였다. 재배기간 동안 수조액의 pH는 4.9 − 7.6, EC는 0.24 − 0.91dS·m^{-1} 범위를 보였다. 수조액의 NO_3-N은 수경재배 표준 배양액보다 약 28% 낮고 K, Fe, B은 각각 10배, 27배, 3.8배 낮았으나 딸기 잎의 무기이온 함량은 적정 수준을 보였으며 스펀지 처리구에서 난석과 하이드로볼 처리구보다 낮았다. 수조액 슬러지의 유기물 함량(OM), 질소(N), 인(P), 칼륨(K)의 함량이 각각 61.5, 5.72, 8.92, 0.24%였다. 정식 후 81DAT에 측정된 엽면적, 엽수, 지상부 생체중과 건물중은 하이드로볼 처리에서 유의적으로 높았고, 개체당 평균 과실수는 난석과 하이드로볼에서 스펀지보다 유의적으로 많았지만 과실 생체중과 건물중은 처리별 유의차가 없었다. 본 연구의 결과를 종합해보면, 아쿠아포닉 시스템에서 난석이나 하이드로볼 배지는 폴리우레탄 스펀지보다 수조액의 슬러지 비료성분을 가용화하는 데 효율적인 것으로 판단된다.

추가 주제어 : 난석, 비단잉어, 슬러지, 폴리우레탄 스펀지, 하이드로볼

사 사

본 연구는 한국방송통신대학교 교내 연구비(2022년도) 지원을 받아 수행되었음.

Literature Cited

Blanchard C., D.E. Wells, J.M. Pickens, and D.M. Blersch 2020, Effect of pH on cucumber growth and nutrient availability in a decoupled aquaponic system with minimal solids removal. Horticulturae 6:10. doi:10.3390/horticulturae6010010

Campbell C.R. 2000, Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. South Coop Ser Bull 394:111.

Filep R.M., D. Stefan, M. Costache, M.S. Bedivan, L. Badulescu, and C.G. Nicolaea 2016, Pilot aquaponic growing system of carp (*Cyprinus carpio*) and basil (*Ocimum basilicum*). Agric Agric Sci Proced 10:255-260. doi:10.1016/j.aaspro.2016.09.062

Francis C., G. Lieblein, S. Gliessman, T.A. Breland, N. Creamer, R. Harwood, L. Salomonsson, J. Helenius, D. Rickerl, R. Salvador, M. Wiedenhoeft, S. Simmons, P. Allen, M. Altieri, C. Flora, and R. Poincelot 2003, Agroecology: The ecology of food systems. J Sustain Agric 22:99-118. doi:10.1300/J064v22n03_10

Goddek S., B. Delaide, U. Mankasingh, K.V. Ragnarsdottir, H. Jijakli, and R. Thorarinsdottir 2015, Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199-4224. doi:10.3390/su7044199

Hochheimer J.N., and F.W. Wheton 1998, Biological filters: Trickling and RBC design. In GS Libey, MB Timmons, eds, Proceedings of the Second International Conference on Recirculating Aquaculture. Virginia Polytechnic Institute and State University, Roanoke, Virginia, USA, pp 291-318.

Hoffmann W.A., and H. Poorter 2002, Avoiding bias in calculations of relative growth rate. Ann Bot 90:37-42. doi:10.1093/aob/mcf140

Inoue S.I., K. Takahashi, H. Okumura-Noda, and T. Kinoshita 2016, Auxin influx carrier AUX1 confers acid resistance for *Arabidopsis* root elongation through the regulation of plasma membrane H^+-ATPase. Plant Cell Physiol 57:2194-2201. doi:10.1093/pcp/pcw136

Jun H.J., J.G. Hwang, M.J. Son, and D.J. Choi 2008, Effect of root zone temperature on root and shoot growth of strawberry. J Bio-Env Con 17:14-19. (in Korean)

Kim S.K., R.N. Bae, H.S. Hwang, M.J. Kim, H.R. Sung, and C.H. Chun 2010, Comparison of bioactive compounds contents in different fruit tissues of June-bearing strawberry cultivars. Korean J Hortic Sci Technol 28:948-953.

Kim Y.O., and S.M. Lee 2015, Influence of spirulina level in diet on skin color of red- and white-colored fancy carp cyprinus carpio var. koi. JFMSE 27:414-421. (in Korean) doi:10.13000/JFMSE.2015.27.2.414

Ko H.J., and K.Y. Kim 2016, Heavy metals contents and chemical characteristics in compost from animal manures. J Korean Soc Occup Environ Hyg 26:170-177. (in Korean) doi:10.15269/JKSOEH.2016.26.2.170

Lee D.H. 2022, Comparative study on growth of leafy vegetables and fancy carp (*Cyprinus carpio* var. *koi*), grown in coupled aquaponics (CAS) and decoupled aquaponics (DAS). JFMSE 34:750-764. (in Korean) doi:10.13000/JFMSE.2022.10.34.5.750

Lee H.C., N.J. Kang, I.R. Rho, H.J. Jung, J.K. Kwon, K.H. Kang, J.H. Lee, and S.C. Lee 2006, Hydroponic culture possibility and optimal solution strength of 'Pechika' ever-bearing strawberry on highland in summer. J Bio-Env Con 15:250-256. (in Korean)

Lee H.J., K.Y. Choi, and E.Y. Choi 2020, Determination of mineral nutrient concentrations in fish growing water and lettuce leaf for hydroball aquaponics. Protected Hort Plant Fac 29:293-305. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2020.29.3.293

Lee H.J., K.Y. Choi, M.H. Chiang, and E.Y. Choi 2022, Photosynthesis, growth and yield characteristics of *Peucedanum japonicum* T. grown under aquaponics in a plant factory. J Bio-Env Con 31:67-76. (in Korean) doi:10.12791/

KSBEC.2022.31.1.067

Lee J.N., H.J. Kim, K.D. Kim, D.L. Yoo, and J.T. Suh 2012, Characteristics of new ever-bearing strawberry 'Gwanha' cultivar for ornamental horticulture. Korean J Hortic Sci Technol 30:784-787. (in Korean) doi:10.7235/hort.2012.12119

Lee S.W., G.C. Hwang, J.G. Yun, J.K. Hong, and S.J. Park 2014, Effect of various fruit-loads on yield, fruit quality and growth of 'Seolhyang' strawberry. Protected Hort Plant Fac 23:205-211. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2014.23.3.205

Lee Y.B., K.W. Park, S.T. Park, J.H. Bae, H.J. You, H.Y. Jo, K.Y. Choi, and Y.Y. Choi 2015, Practical hydroponics. In YB Lee, ed, Practical hydroponics: Nutrient composition for leaf vegetable, Ed 1. Jinsol, Korea, p 87.

Lennard W.A., and B.V. Leonard 2006, A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. Aquac Int 14:539-550. doi:10.1007/s10499-006-9053-2

Love D.C., J.P. Fry, L. Genello, E.S. Hill, J.A. Frederick, X. Li, and K. Semmens 2014, An international survey of aquaponics practitioners. PLoS ONE 9:e102662. doi:10.1371/journal.pone.0102662

Monsees H., J. Keitel, M. Paul, W. Kloas, and S. Wuertz 2017, Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: Evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. Aquac Environ Interact 9:9-18. doi:10.3354/aei00205

Pineda-Pineda J., I. Miranda-Velázquez, J.E. Rodríguez-Pérez, J.A. Ramírez-Arias, E.A. Pérez-Gómez, I.N. García-Antonio, and J.J. Morales-Parada 2017, Nutrimental balance in aquaponic lettuce production. Acta Hortic 1170:1093-1100. doi:10.17660/ActaHortic.2017.1170.141

Rakocy J.E., M.P. Masser, and T.M. Losordo 2006, Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC publication 454.

Rural Development Administration (RDA) 2019, Agricultural technology guide 40 (strawberry). Accessed 12 January 2023.

Rural Development Administration (RDA) 2022, Enforcement Decree of the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food-Fertilizer process specification setting. Accessed 12 January 2023.

Schreier H.J., N. Mirzoyan, and K. Saito 2010, Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems. Curr Opin Biotech 21:318-325. doi:10.1016/j.copbio.2010.03.011

Shukla J., V.P. Mohandas, and A. Kumar 2008, Effect of pH on the solubility of $CaSO_4$ $2H_2O$ in aqueous NaCl solutions and physicochemical solution properties at 35°C. J Chem Eng Data 53:2797-2800.

Somerville C., M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus, and A. Lovatelli 2014, Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Thorarinsdottir R. 2015. Aquaponics guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, p 40.

Tyson R.V., E.H. Simonne, D.D. Treadwell, M. Davis, and J.M. White 2008, Effect of water pH on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recirculating hydroponics. J Plant Nutr 31:2018-2030. doi:10.1080/01904160802405412

Wong-Chong G.M., and R.C. Loehr 1975, The kinetics of microbial nitrification. Water Res 9:1099-1106. doi:10.1016/0043-1354(75)90108-6

Yang T., and H.J. Kim 2020, Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato, basil, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. J Cleaner Prod 274:122619. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122619

Zou Y.N., Z. Hu, J. Zhang, H.J. Xie, C. Guimbaud, and Y.K. Fang 2016, Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. Bioresour Techol 210:81-87. doi:10.1016/j.biortech.2015.12.079