

메기(*Silurus asotus*) 및 엽채류의 성장과 생산을 위한 Hybrid BFT 아쿠아포닉스(HBFT-AP), 반순환 양식(Semi-RAS) 및 수경재배(Hydroponics)의 비교 연구

이동훈 · 김진영¹ · 임성률 · 김달영 · 김광배 · 김주민² · 김정대^{3*}

경기도해양수산자원연구소, ¹경기도농업기술원, ²세븐필라, ³강원대학교 동물생명과학대학

Comparative Study on Growth and Yield of Far Eastern Catfish *Silurus asotus* and Leafy Vegetables Grown in Hybrid BFT-Aquaponics, Semi-RAS and Hydroponics

Dong-Hoon Lee, Jin-Young Kim¹, Seong-Ryul Lim, Dal-Young Kim, Kwang-Bae Kim, Joo-Min Kim² and Jeong-Dae Kim^{3*}

Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute, Yangpyeong 12513, Korea

¹Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18274, Korea

²Seven Pillars, Dangjin 31778, Korea

³College of Animal Life Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

This study compared the productivity of fish and vegetables grown using the hybrid biofloc technology-aquaponics (HBFT-AP), a semi-recirculating aquaculture system (SRAS), and hydroponics (HP). For the study of fish productivity (HBFT-AP vs. SRAS), fish were provided feed containing 3.0% monobasic potassium phosphate (MKP) for 18 weeks. After the 18-week feeding trial, the average weight of the sampled population ($n=100$) was not significantly different ($P>0.05$), while hematocrit (PCV, %), hemoglobin (Hb, g/dL), and plasma K (mEq/L) were significantly different ($P<0.05$) between the two groups (HBFT-AP: 47.83%, 15.48 g/dL, and 1.39 mEq/L; SRAS 34.83%, 11.81 g/dL, and 2.48 mEq/L). Leaf vegetable productivity (HBFT-AP vs. HP) was compared in three experiments (EXP 1-3), and slower growth was observed in both groups in EXP 2, in which pH was maintained at 5.0 or less throughout the experiment. During the 18-week feeding trial, total ammonia nitrogen (TAN), $\text{NO}_3\text{-N}$, and $\text{PO}_4\text{-P}$ levels increased with time in the HBFT-AP system, while the concentration of $\text{NO}_2\text{-N}$ remained below 0.1 mg/L throughout the study.

Key words: *Silurus asotus*, Aquaponics, Hydroponics, MKP, HBFT

서론

최근 물의 희소성 증대와 자연 수계의 영양염 및 오염 물질에 대한 환경 수용능력 저감으로 수산양식업(aquaculture)에서 발생하는 환경오염 문제에 대해 엄격한 규제가 적용되고 있는 실정이다(NIFS, 2013). 또한 농업분야에서 수경재배(hydroponics)는 인공 배지인 양액(nutrient solution)을 사용하는데, 배지 내 염류의 집적을 방지하기 위해 식물의 증산 요구량 이상으로

양액을 관수하여 일정 비율의 배액을 발생시키는 것이 일반적이다. 배액은 영양염 농도가 높기 때문에 방류할 경우 환경오염원으로 이어질 수 있어 비료와 수자원을 낭비하게 된다(Ahn and Son, 2011). 이러한 이유로 안정적으로 배액을 재사용하는 연구가 현재 진행되고 있으나(Gielling et al., 2005; Gutierrez et al., 2008) 기술적인 한계로 아직 실용화되지 않고 있는 실정이다.

현재까지 수산양식에서 사육수의 재순환을 통한 양식방법

*Corresponding author: Tel: +82. 33. 250. 8634 Fax: +82. 33. 259. 5572

E-mail address: menzang@gmail.com



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0482>

Korean J Fish Aquat Sci 52(5), 482-495, October 2019

Received 5 September 2019; Revised 25 September 2019; Accepted 4 October 2019

저자 직위: 이동훈(연구사), 김진영(연구관), 임성률(연구사), 김달영(연구사), 김광배(연구사), 김주민(대표이사), 김정대(교수)

으로 recirculating aquaculture system (RAS)과 biofloc technology (BFT)가 대표적이거나(FAO, 1986; Avnimelech et al., 2015), 국내 순환여과식양식(RAS)은 완전히 물을 재사용하는 것이 아니라 하루에 전체 순환수의 10% 이하가 환수되고 보충되는 것이 일반적이다(Suh et al., 2001). Russo et al. (1981)은 RAS 생산방법은 용존산소(dissolved oxygen, DO) 부족, 유기물 증가, $\text{NH}_3\text{-N}$ 등의 무기질소 및 CO_2 의 축적 등에 의해 어류의 성장저해 및 질병발생 등의 문제가 야기될 수 있어 수질관리의 중요성을 언급하였고, RAS는 고형물과 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 제거를 위해 여러 장치(침전조, 여과기, 회전원판접촉기, 충전층 반응기, 유동층 반응기, 포말분리기, 자외선살균기 등)가 필요한 것으로 알려져 있다(Losordo et al., 1994; Reyes and Lawson, 1995). 그러나, Schneider et al. (2006)의 보고에 의하면 RAS는 초기 자본의 투자가 높아 산업적 확대의 진행이 느리며, 이러한 이유로 국내 내수면 육상수조식 양식에서는 유수식 양식방법에 의한 시설이 많은 편으로 인근 하천수 및 지하수를 취수하여 사육수로 사용하고 간단한 침전시설을 거쳐 배출되는 형태로 경영되고 있으며, RAS 시스템을 구축한 양식장은 뱀장어와 같은 고가의 어류양식에 제한되고 있다. BFT 양식은 국내에서 2000년대 도입된 사육수의 재순환 양식방법으로 양어장 내 수산생물에 의해 발생하는 오염물 중 하나인 $\text{NH}_3\text{-N}$ 을 유기탄소(당밀, 포도당 등)를 사용해 미생물을 증식시키고(C:N비 조절) 미생물총(biofloc) 형성을 유도한 후, 이를 수산생물(어류, 갑각류)이 다시 섭식하게 함으로써 지속적으로 수질을 유지하는 기술로 비용적 측면에서 RAS에 비해 매우 효과적인 양식방법이다. 국내 내수면 양식 대상 어종에서 뱀장어, 메기, 송어는 주요 생산 품종으로, 특히 메기의 경우 전 세계적으로 BFT 적합 어종으로 알려져 있다(Avnimelech et al., 2015).

아쿠아포닉스(aquaponics)는 수산양식(aquaculture)과 농업의 수경재배(hydroponics)가 결합된 복합재배 시스템으로, 수산양식 생물의 성장과 생존을 위해 공급된 먹이(사료)가 종속 및 독립영양미생물(heterotrophic and autotrophic microorganisms)에 의해 각종 무기물과 질산염으로 분해 및 생성된 것을 식물이 성장 영양소로 흡수하면서 양어수질의 안정화와 식물 성장을 이루어지게 하여 사육수의 교환없이 지속적으로 농·수산물을 생산할 수 있는 친환경 생산방법이다(FAO, 2014). 아쿠아포닉스에서 식물생산을 위해 제공되는 양어사료는 식물이 필요로 하는 13종류 영양소(N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Al) 중 10종류는 식물이 성장할 수 있는 적정량을 제공하나, Ca, K, Fe와 같은 영양소는 매우 부족할 정도로 존재하여 인위적으로 추가 되어야 한다(Rakocy, 2007). 또한 전세계적으로 보편화된 UVI (university of virgin islands) 아쿠아포닉 시스템에서도 식물성장을 위해서는 앞에서 언급한 부족한 영양소를 인위적으로 첨가하도록 제안하고 있다(Rakocy et al., 2006; Bailey and Ferrarezi, 2017). 이러한 UVI 아쿠아포닉 시스템은 양식의 RAS 생산방법에 수경재배지를 결합한 것

으로 시설비 문제와 시스템 운영의 복잡성을 가지고 있다. Lee et al. (2019)은 어류양식에 사용되는 배합사료 만으로 식물에 공급하는 영양소를 충당할 수 있도록 기존 상업용 사료에 사용되는 인 제제를 일인산칼륨(monobasic potassium phosphate, MKP)으로 대체하였고, 더불어 종속 및 독립영양미생물이 혼합된 유용미생물을 활용한 hybrid BFT 생산 방식을 적용하여 semi-pilot 규모에서 성공적으로 아쿠아포닉스를 운영하였음을 보고한 바 있다.

따라서 본 연구의 목적은 Lee et al. (2019)의 MKP 사료(MKP 3.0%) 및 hybrid BFT을 적용한 HBFT-아쿠아포닉스(aquaponics) 생산 방법과 기존 내수면 어류양식에 사용되는 반순환여과식(semi-recirculating system) 방법 및 농업의 수경재배(hydroponics) 방법의 생산성 비교를 통해 현장 실용화 가능성을 살펴보고자 하였다.

Table 1. Ingredient composition of the experimental diets

Ingredient	MKP3
Fish meal	37.00
Soybean meal	15.00
Corn gluten Meal	10.00
Blood Meal	5.00
Wheat flour	22.20
Fish Oil	4.80
Dried Yeast	1.00
MKP ¹	3.00
Vitamin mix ²	0.50
Methionine 100%	0.22
Salt	0.20
Choline-Liquid (50%)	0.20
Taurine	0.20
Mineral mix ³	0.10
Antioxidant	0.05
Stay C	0.03
KCl	0.50

¹MKP, monobasic potassium phosphate. ²Vitamin added to supply the following (per kg diet): vitamin A, 22,000 IU; vitamin D₃, 4,400 IU; vitamin E, 320 IU; vitamin K₃, 24 mg; thiamine HCl, 50 mg; riboflavin, 60 mg; D-Ca pantothenate, 120 mg; biotin, 2 mg; folic acid, 20 mg; vitamin B₁₂, 100 mg; niacin, 300 mg; pyridoxine HCl, 30 mg; inositol, 600 mg; ethoxyquin, 67 mg. ³Mineral added to supply the following (per kg diet): copper sulfate (25.4% Cu), 10 mg; zinc sulfate (22.7% Zn), 60 mg; manganous sulfate (32.5% Mn), 50 mg; magnesium sulfate (24.3% Mg), cobalt chloride (24.8% Co), 2 mg; potassium iodide (76.4% I), 2.0 mg; sodium selenite (45.6% Se), 0.75 mg.

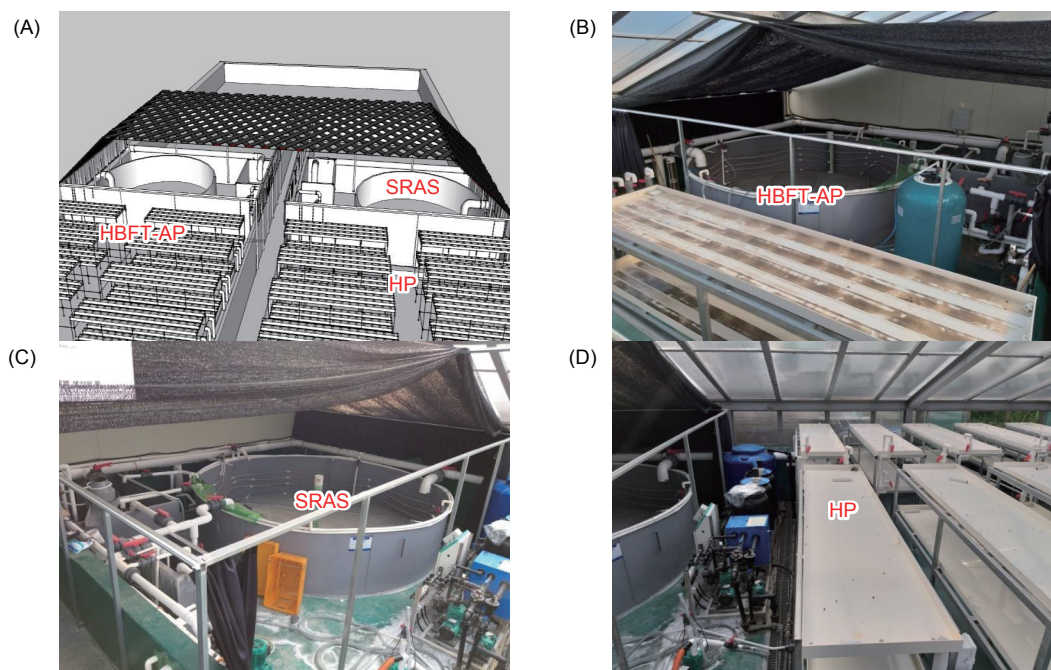


Fig. 1. Compartments of the experimental design. (A) Three production systems for fish and leafy vegetables cultivation (total area, 165m²). HBFT-AP (hybrid biofloc technology-aquaponics), SRAS (semi-recirculating aquaculture system), HP (hydroponics) (B) HBFT-AP system. Water flow, fish tank(φ 4.5 m)→sump tank(2×1 m)→pump(1.5 HP)→biohelix filter(680 L)→vegetable bed(2.9×0.6×0.1 m, No. 20)→fish tank (C) SRAS system. Water flow, fish tank(φ 4.5 m)→sump tank(2×1 m)→pump(1.5 HP)→fish tank+sump tank (D) HP system. Water flow, nutrient solution tank→pump(1 HP)→sump tank(1×0.5×1 m)→pump(1.5 HP)→vegetable bed(2.9×0.6×0.1 m, No. 20)→sump tank.

재료 및 방법

실험사료

실험에 사용된 사료는 사조동아원(주) 당진사료공장(충청남도 당진시)에서 직경 6 mm 내외 부상 EP (extruded pellet) 사료로 제작된 것으로, Lee et al. (2019)의 실험 결과에 보고된 MKP3 (monobasic potassium phosphate 3% in diet)를 사용하였다 (Table 1, 2).

시스템 구성 및 운영

아쿠아포닉스 생산, 어류 양식 생산 및 수경재배 생산을 위한 실험 시스템은 Fig. 1과 같다. BFT 양식시설과 수경재배 시설을 결합한 아쿠아포닉스 실험구(hybrid biofloc technology-aquaponics, HBFT-AP)는 어류 원형수조(φ 4.5 m×H 0.7 m) 1개, 섬프수조(L 2.0 m×W 1.0 m×H 0.9 m) 1개, 2층 구조의 식물베드지(L 2.9 m×W 0.6 m×H 0.1 m) 20개, 바이오헬릭스 여과기(680 L, Isan M Tech. Ltd., Korea) 1개, 원형수조와 식물 베드지의 물 순환을 위한 펌프(1.5 HP) 1개, 어류 수조 BFT 유지를 위한 벤츨리 에어 공급 시스템 순환펌프(1.0 HP) 1개, 식

Table 2. Chemical composition of the experimental diets¹

Composition (%)	MKP3 ²
Moisture	5.87
Crude protein	46.46
Crude lipid	6.69
Crude ash	11.55
Crude fiber	2.05
Ca	2.38
P	2.13
Composition (ppm)	MKP3
Mg	2,090.6
Fe	320.5
Cu	16.9
Mn	37.2
Zn	122.8
K	16,499.0

¹Values are means of 2 determinations. ²MKP, monobasic potassium phosphate.

물베드지 하단의 광 공급을 위한 형광등 40개로 구성되었다. 식물 재배 포트는 베드지 당 45개로 총 900개의 재배지로 구성되었으며, 식물에 공급되는 물 주수 배관은 25 mm PVC관, 배수 배관은 40 mm PVC관을 사용하였고, 최종 집수되어 어류 사육조로 유입되는 배관은 100 mm PVC관을 사용하였다. 대조 구로 사용된 어류 양식 생산 실험구(semi-recirculating system, SRAS)와 수경재배 생산 실험구(hydroponics, HP)는 HBFT-AP와 같은 조건으로 구성하였으나, 두 실험구간에는 독립적으로 물의 순환을 시켜 주었다. 또한 HP구는 양액공급시스템을 이용하였고, 기본 구성은 원수탱크 1개(1톤), 양액자동조정기 1대(Nutrient system Agronic 54 model, HANGARAMPONICS Ltd., Korea), 양액통(0.1톤) 3개(A, B and C solution), 섬프수조(L 1.0 m × W 0.5 m × H 1 m) 1개 및 식물베드지로 양액을 공급하기 위한 순환펌프(1.5 HP) 1개로 구성하였고, 양액통별 배양액 구성은 Table 3에 제시된 바와 같았다. SRAS구는 반순환여과방식으로 운영하였으며, 시설 구성요소는 HBFT-AP와 같으나 바이오헬릭스 여과기를 제거하는 대신 지속적으로 소량의 하천수를 공급하여 주었다.

실험어 배치

실험에 사용된 메기(*Silurus asotus*)는 경기도해양수산물자원연구소에서 사육 관리한 2,000마리 중 어체중(fish weight) 160-250 g의 개체 1,225마리를 선별하여 사용하였다. 본 사육 실험에 앞서 실험어는 제작된 MKP3 사료를 2주간 공급하여 적응시켰으며, 실험 개시 전 24시간 절식한 후 어류의 체중 측정이 수행되었다. HBFT-AP 실험구 수조에 평균 201.4 g 내외의 개체 615마리, SRAS 실험구 수조에 평균 204.6 g 내외의 개체 610마리가 각각 수용되었다. HBFT-AP 실험구의 사료 공급은 미접취 사료에 의한 식물생산성의 오차 배제를 위해 어체중 당 0.5%로

제한하여 1일 2회 공급하였고, SRAS 실험구 역시 HBFT-AP구와 어류 생산성 비교를 위해 동일하게 공급하였으며, 어류 사육 실험은 18주간 연속 진행되었다.

엽채류 배치

엽채류는 어류 입식 1주 후부터 총 3회(EXP 1. 2-5주, EXP 2. 9-12주, EXP 3. 14-17주)에 걸쳐 입식해 실험에 사용하였다. 실험에 이용된 엽채류는 경기도농업기술원 육묘용 온실에서 육묘한 개체로 총 11종을 사용하였다. EXP 1에서는 적근대(swiss chard), 선풍포참(sunpoong lettuce), 적로메인(romaine lettuce), 적적자채(red leaf mustard) 및 카이피라(caipira lettuce) 5종이 사용되었다. HBFT-AP 실험구 및 HP 실험구 각각 900개체(품종 당 180개체)를 입식하여 23일 후 성장도 조사를 진행하였다. EXP 2에서는 청경채(pak choi), 버터헤드(butterhead lettuce), 적근대(swiss chard), 볼꽃상추(red lettuce) 및 아바타(abata lettuce) 5종을 사용하였고, EXP 3에서는 볼꽃상추(red lettuce), 셀러리(celery), 비타민(tatsoi), 카이피라(caipira lettuce) 및 아바타(abata lettuce) 5종을 사용하였다. EXP 2 및 EXP 3의 실험구별(HBFT-AP 및 HP 실험구) 입식 방법은 EXP 1과 동일하게 진행하였고, 입식 후 24일 후 성장도 조사를 실시하였다.

시료측정

실험어 측정은 실험 배치 및 종료 후 총 2회에 걸쳐 수행되었다. 사료 절식 24시간 후, 실험구별 총 어체중 측정은 사육 수조 내 임시 그물을 설치하여 전량 포획하여 수용한 다음 60 kg 전자저울(BW-1N, CAS Ltd., Korea)을 이용하여 총 8회에 걸쳐 측정하였다. 실험구별 어체중의 편차를 파악하기 위해 전체 무게 및 마리수를 파악한 후 무작위로 100마리씩 샘플하여 개별 어체중을 측정하였으며, 어류마취제인 MS-222 (Wojin B&G Ltd., Korea)로 마취시킨 후 진행하였다. EXP 1, EXP 2 및 EXP 3의 엽채류 11종 측정은 각각 줄기, 엽수, 엽중량, 뿌리, 엽채 길이 등을 세분화하여 측정하였다.

수질관리

HBFT-AP 실험구의 수질관리는 Lee et al. (2019)이 보고한 수질관리 방법을 적용하였다. 어류 입식 후 2주 간은 Emerenciano et al. (2017)의 방법에 준하여 사료 공급과 함께 유기탄소 원인 정제 포도당을 계산하여 유용미생물(BFT-ST, EgeeTech, Ltd., USA)과 함께 아쿠아포닉 시스템 내 섬프수조에 투입한 후, 2주 후부터 유기탄소의 공급은 중단하고 무기탄소원으로 CO₂ (탄산가스)를 pH가 6.0이하로 떨어질 때까지 지속적으로 사육수조에 투입하였다. 2-3일 간격으로 유용 미생물을 투입하였으나, pH 6.0 이하부터는 NO₂-N이 증가할 때 유용미생물을 투입하였고, 안정적인 수질 유지 시 중단하였다. SRAS 실험구는 일반적으로 민간 양식업체에서 가장 많이 활용하는 미생물(*Bacillus subtilis*) 제품 아다폰(Handong Ltd., Korea)을 1일 1

Table 3. Chemical composition of nutrient solution for growth of leaf vegetables in HP¹

Nutrient tank	Nutrient	Weight (g)
A solution tank (0.1 ton)	KNO ₃	2,525
	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	3,540
	Fe-EDTA	160
B solution tank (0.1 ton)	KNO ₃	2,525
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	1,850
	H ₃ BO ₃	30
	MnSO ₄ ·5H ₂ O	877
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.9
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.4
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.13
	NaCl	16.4
C solution tank (0.1 ton)	NH ₄ H ₂ PO ₄	1,380

¹HP, hydroponics.

회 13톤 사육수에 3 g을 투입하였으며, 사육수 환수는 1일 1.5 회전이 되도록 하여 수질을 관리하였다.

수질분석

수질측정은 1주 6회 용존산소(DO, mg/L), pH, 수온(°C), 전기전도도(electrical conductivity, EC; $\mu\text{S}/\text{cm}$), 탁도(NTU), TAN ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) (mg/L), $\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)와 $\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)를 측정하였다. DO, pH, 수온, EC와 탁도는 현장 수질측정기인 YSI PRODSS (YSI Inc., Yellow spring, USA)를 사용하였고, TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 분석시약(NitraVer[®]X Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia Reagent Set 2604545-KR, NitriVer[®]3 Reagent Set 2608345-KR, PhosVer[®]3 Phosphater Reagent, HACH Ltd., Love land, USA)과 다목적 수질측정기인 DR5000 (HACH Ltd., Love land, USA)을 이용한 비색법으로 분석하였다. 또한 EXP 3의 식물생산 실험 종료 후, HBFT-AP 및 HP 실험구의 미량원소를 분석하였다. K (mg/L), Ca (mg/L), Mg (mg/L), Na (mg/L), Fe (mg/L), Zn (mg/L), Mn (mg/L) 및 Cu (mg/L)는 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES Optima 8300, Perkin Elmer Co., Waltham, USA)로, Cl (mg/L) 및 SO_4 (mg/L)는 이온크로마토그래피(930 Comact IC Flex, Metrohm Co., Herisau, Switzerland)를 사용하여 분석하였다.

혈액분석

18주간 어류 사육실험 종료 후, HBFT-AP 및 SRAS 실험구의 메기 혈액성상 변화 조사를 위해 24시간 사료 절식이 이루어졌다. 이 후 어류마취제인 MS-222 (Wojin B&G Ltd., Korea)로 마취시킨 다음 헤파린(Heparin sodium salt from porcine intestinal mucosa, K3333-10KU, Sigma-Aldrich., Darmstadt, Germany)을 처리한 1 cc 주사기를 사용하여 미부정맥에서 실험구 별 12마리의 혈액을 샘플링하였다. 전혈은 hemoglobin (Hb; g/dL)과 hematocrit (PCV; %) 분석에 사용하였고, 이 후 4°C, 12,000 rpm, 10분간의 조건이 설정된 원심분리기(Centrifuge 5415 R, Eppendorf Ltd., Hamburg, Germany)를 이용하여 혈장(plasma) 분리 후 glutamic oxaloacetic transaminase (GOT; U/L), glutamic pyruvic transaminase (GPT; U/L), glucose (GLU; mg/dL), inorganic phosphorus (Pi; mg/dL), Na (mEq/L), K (mEq/L)와 Cl (mEq/L)을 분석하였다. PCV는 HAEMATOKRIT 210 (Hettich Ltd., Tuttingen, Germany)을 이용하여 분석하였으며, Hb 등 다른 혈액 요소는 시판되는 임상진단키트(Fuji DRI-CHEM slide, Fuji photo film co. Ltd., Japan)와 함께 혈액분석기(DRI-CHEM 3500 I, Fujifilm Ltd., Japan)를 이용하여 분석하였다.

통계처리

어류의 성장 실험에서 얻어진 개시 어체중 및 종료 어체중의 각 실험구별(HBFT-AP 및 SRAS 실험구) 표본집단(100마리)

의 평균 비교와 업체류의 성장 항목(엽수, 엽중량, 엽체길이)은 SPSS Version 10 (SPSS, 1999) 프로그램의 일원분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 분석하였으며, 통계분석의 유의수준은 5% ($P < 0.05$)에서 결정되었다. 분석에 앞서 모든 자료의 변량의 동질성(homogeneity of variance)은 Cochran's test (Sokal and Rohlf, 1995)를 이용하여 확인하였다.

결 과

어류 생산성 비교

사료 내 MKP 3.0% 농도를 포함한 실험사료(MKP3)를 2종류(HBFT-AP, SRAS)의 생산 시스템에 입식된 메기에게 18주간 공급한 결과는 Table 4와 같다. HBFT-AP구는 실험기간 동안 사료의 건조중량(dry matter, DM) 기준 141,280 g을 공급한 결과 개시 총어체중 123,900 g에서 실험 종료 후 190,100 g으로 성장하여 53.43%의 증체율(weight gain, WG)을 나타내었고, SRAS구의 WG은 142,440 g의 사료를 공급하여 개시 총

Table 4. Growth performance of Far eastern catfish *Silurus asotus* fed diets with monobasic potassium phosphate (MKP¹) in HBFT-AP and SRAS for 18weeks

Growth performance	Aquaculture methods	
	HBFT-AP ²	SRAS ²
Initial fish No.	615	610
Final fish No.	601	603
Initial average (No. 100) weight of total fish (g)	201.4 $\pm$ 21.2 ^{ns}	204.6 $\pm$ 24.1
Final average (No. 100) weight of total fish (g)	316.4 $\pm$ 33.6 ^{ns}	315.9 $\pm$ 46.3
Initial total weight of total fish (g)	123,900	124,300
Final total weight of total fish (g)	190,100	191,500
Feed intake (g, DM)	141,280	142,440
WG (%) ³	53.43	54.06
FE (%) ⁴	46.85	47.18
SGR (%) ⁵	0.35	0.35
PER ⁶	0.95	0.96
DFI ⁷	0.48	0.45
Survival rate (%) ⁸	97.7	98.9

¹MKP, monobasic potassium phosphate. ²HBFT-AP (hybrid biofloc technology-aquaponics), SR (semi-recirculating aquaculture system). ³Weight gain (%)=[final weight (g)-initial weight (g)] $\times$ 100/initial weight (g). ⁴Feed efficiency (%)=wet weight gain (g)/dry feed intake $\times$ 100. ⁵Specific growth rate (%)=(Ln final weight (g)-Ln initial weight (g))/experimental days $\times$ 100. ⁶Protein efficiency ratio=wet weight gain (g)/protein intake. ⁷Daily feed intake (%/av. wt/d)=dry feed intake (g/fish)/[(initial wt+final wt+dead fish wt)/2]/experimental days $\times$ 100. ⁸Survival rate (%)=final fish number/initial fish number $\times$ 100. ns, nonsignificant ($P > 0.05$).



Fig. 2. Growth of leafy vegetables in HP and HBFT-AP for 18 weeks. (A) EXP 1, (B) EXP 2, (C) EXP 3. HP, hydroponics. HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics.

어체중 124,300 g에서 실험 종료 후 191,500 g으로 성장하여 54.06%의 값을 나타내었다. 사료효율(feed efficiency, FE)은 각 실험구별 46.85% (HBFT-AP)와 47.18% (SRAS)의 값을 보였고, 일간성장률(specific growth rate, SGR)은 두 실험구가 유사하게 0.35%의 값을 나타내었다. 단백질이용효율(protein efficiency ratio, PER)은 0.95% (HBFT-AP)와 0.96% (SRAS), 일간사료섭취율(daily feed intake, DFI)은 0.48% (HBFT-AP)와 0.45% (SRAS), 생존율(survival rate)은 97.7% (HBFT-AP)와 98.9% (SRAS)의 값을 보였다. 성장함에 따라 각 실험구별 집단 내 개체 차이를 파악하기 위해 각각 100마리 샘플을 개체 중량한 결과 HBFT-AP구는 실험 전 SD (standard deviation) 21.2의 값에서 종료 후 33.6의 값을 보였고, SRAS구는 SD 24.1에서 46.3의 값을 나타내었다. 사료의 제한 공급으로 성장함에 따라 두 실험구 모두 집단내 개체간 성장 차이가 크게 증가하

였으나, 두 실험구의 표본 평균은 유의한 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$).

엽채류 생산성 비교

HBFT-AP구와 HP구의 엽채류 생산성 비교 결과는 Table 5, 6, 7 및 Fig. 2에 나타내었다. EXP 1은 5종류(적근대, 선풍포참, 적로메인, 적겨자채, 카이피라)의 엽채류 입식 후 23일간 재배하여 성장을 측정한 결과(Table 5) 모든 엽채류에서 각 실험구별 엽수(leaf No.) 평균, 엽중량(leaf weight) 평균, 엽채길이(leaf length) 평균의 유의한 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$). EXP. 2의 경우 5종류(청경채, 버터헤드, 적근대, 불꽃상추, 아바타)의 엽채류 입식 후 24일간 재배하여 성장을 측정한 결과(Table 6) 청경채와 버터헤드의 엽수 평균은 유의한 차이가 없으나($P>0.05$), 청경채 엽중량 평균(HBFT-AP 63.86 g, HP

31.73 g), 엽채길이 평균(HBFT-AP 19.33 cm, HP 16.18 cm)과 버터헤드 엽종량 평균(HBFT-AP 60.99 g, HP 38.42 g), 엽채길이 평균(HBFT-AP 20.75 cm, HP 15.58 cm)은 HBFT-AP구가 유의하게 높은 값을 보였다($P<0.05$). 적근대, 불꽃상추는 HBFT-AP구가 HP구에 비해 엽수 평균(적근대 11.00, 불꽃상추 16.58), 엽종량 평균(적근대 30.26 g, 불꽃상추 49.41 g), 엽채길이 평균(적근대 26.75 cm, 불꽃상추 25.66 cm) 모두 유의하게 높은 값을 나타내었다($P<0.05$). 아바타는 엽채길이 평균은 유의한 차이가 없으나($P>0.05$), 엽수 평균(HBFT-AP 16.91, HP 12.58), 엽종량 평균(HBFT-AP 37.56 g, HP 22.45 g)은 HBFT-AP구가 유의하게 높은 값을 보였다($P<0.05$). EXP 3은 5종류(불꽃상추, 셀러리, 비트라민, 카이피라, 아바타)의 엽채류

Table 5. Growth of five leafy vegetables in HBFT-AP and HP for 23 days (EXP 1)¹

Species (No. 12)	Growth factor	Culture method	
		HBFT-AP ²	HP ³
Swiss chard (<i>Beta vulgaris</i>)	Stem mean weight (g)	5.41	3.15
	Leaf No.	12.67±2.06 ^{ns}	11.25±1.71
	Leaf weight (g)	71.56±14.71 ^{ns}	57.22±14.22
	Root mean weight (g)	2.72	5.91
	Leaf length (cm)	34.67±3.36 ^{ns}	31.21±3.51
Sunpoong lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	13.62	11.42
	Leaf No.	13.17±1.90 ^{ns}	11.25±1.60
	Leaf weight (g)	70.61±14.50 ^{ns}	78.93±12.49
	Root mean weight (g)	3.02	6.17
	Leaf length (cm)	28.63±2.23 ^{ns}	29.38±1.48
Romaine lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	11.38	19.25
	Leaf No.	18.75±2.56 ^{ns}	16.92±2.64
	Leaf weight (g)	97.46±16.49 ^{ns}	112.4±18.54
	Root mean weight (g)	5.44	9.22
	Leaf length (cm)	31.58±1.68 ^{ns}	34.67±2.67
Red leaf mustard (<i>Brassica juncea</i>)	Stem mean weight (g)	3.9	5.2
	Leaf No.	9.58±1.78 ^{ns}	9.25±1.14
	Leaf weight (g)	65.83±17.16 ^{ns}	73.23±21.71
	Root mean weight (g)	5.64	5.91
	Leaf length (cm)	37.13±2.56 ^{ns}	38±4.34
Caipira lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	5.41	6.34
	Leaf No.	20.08±1.88 ^{ns}	18.75±2.60
	Leaf weight (g)	79.45±11.77 ^{ns}	86.65±16.04
	Root mean weight (g)	2.72	3.94
	Leaf length (cm)	21.75±1.71 ^{ns}	21.58±1.51

¹Values represent the mean±SD of sampled leafy vegetables.

²HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. ³HP, hydroponics. ns, nonsignificant.

입식 후 24일간 재배하여 성장을 측정한 결과(Table 7) 불꽃상추를 제외한 4종류 엽채류의 엽수 평균, 엽종량 평균, 엽채길이 평균에서 HBFT-AP구와 HP구는 유의한 차이를 나타내지 못했다($P>0.05$). 불꽃상추의 경우 엽종량 평균(HBFT-AP 66.54 g, HP 54.83 g)에서 두 실험구간 유의성이 발견되지 않았으나($P>0.05$), 엽수 평균(HBFT-AP 20.00, HP 15.50) 및 엽채 길이 평균(HBFT-AP 28.35 cm, HP 22.76 cm)은 유의한 차이를 나타내었다($P<0.05$).

수질분석

실험 18주 기간 동안 혼합미생물(중속영양세균 및 독립영양세균)을 활용한 hybrid BFT 아쿠아포닉(HBFT-AP) 시스템의

Table 6. Growth of five leafy vegetables in HBFT-AP and HP for 24 days (EXP 2)¹

Species (No. 12)	Growth factor	Culture method	
		HBFT-AP ²	HP ³
Pak Choi (<i>Brassica campestris</i>)	Stem mean weight (g)	0.88	1.20
	Leaf No.	13.08±1.16 ^{ns}	11.5±1.38
	Leaf weight (g)	63.86±11.90*	31.73±6.03
	Root mean weight (g)	1.92	2.63
	Leaf length (cm)	19.33±1.61*	16.18±1.20
Butterhead lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	0.36	0.58
	Leaf No.	19.00±1.41 ^{ns}	16.75±1.82
	Leaf weight (g)	60.99±7.51*	38.42±8.94
	Root mean weight (g)	3.47	2.57
	Leaf length (cm)	20.75±1.60*	15.58±1.18
Swiss chard (<i>Beta vulgaris</i>)	Stem mean weight (g)	0.73	0.45
	Leaf No.	11.00±1.28*	8.33±0.65
	Leaf weight (g)	30.26±5.73*	17.00±2.62
	Root mean weight (g)	2.99	1.03
	Leaf length (cm)	26.75±2.30 ^{ns}	23.54±2.46
Red lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	0.59	0.92
	Leaf No.	16.58±1.44*	12.25±1.22
	Leaf weight (g)	49.41±9.25*	22.65±4.64
	Root mean weight (g)	3.32	1.68
	Leaf length (cm)	25.66±1.23*	19.05±2.10
Abata lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	1.03	0.68
	Leaf No.	16.91±1.51*	12.58±1.38
	Leaf weight (g)	37.56±5.12*	22.45±2.93
	Root mean weight (g)	4.27	2.99
	Leaf length (cm)	15.83±3.16 ^{ns}	12.50±1.31

¹Values (means±SD of sampled leafy vegetables) with *super-scripts in the same line are significantly different ($P<0.05$). ²HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. ³HP, hydroponics. ns, nonsignificant.

수질변화는 Table 8과 9에 제시되었다. 1주간 측정 평균 값은 DO의 경우 7.93에서 9.00 mg/L, 수온은 23.77에서 26.38°C, 전기전도도(EC)는 170.37에서 1,050 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH는 4.62에서 7.53, 탁도(NTU)는 1.27에서 4.17, 총암모니아(TAN)는 0.44에서 14.62 mg/L, 아질산염($\text{NO}_2\text{-N}$)은 0.02에서 5.08 mg/L, 질산염($\text{NO}_3\text{-N}$)은 4.37에서 108.12 mg/L, 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$)은 4.99에서 33.20 mg/L 범위의 값을 나타내었다. EC는 실험기간이 늘어남에 따라 메기에서 발생하는 배설물 축적량도 증가하였고, 종속영양미생물의 무기화과정(mineralization)에 따라 수치가 지속적으로 상승하였다. TAN는 실험기간 동안 지속적 증가를 보였으나 15주 후부터 다소 감소되었고, $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 실험 초기부터 감소하기 시작하여 실험 3주 후부터 0.1 mg/L 이하의 값을

을 유지하였다. TAN 및 $\text{NO}_2\text{-N}$ 과 달리 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 $\text{PO}_4\text{-P}$ 은 실험 시작 후부터 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. pH는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 증가 및 $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 감소에 따라 감소하기 시작하였고, 실험기간(18주) 동안 pH 5.0에서 6.5의 값을 유지하도록 하였으나 지속적인 질산화과정(nitrification)에 따른 H^+ 이온 생성과 무기화과정에 따른 CO_2 축적으로 pH 5.0 이하의 기간은 3주간(11-13주) 지속되어(Table 8), pH 5.0에서 6.5의 값을 유지하기 위해 중탄산나트륨(NaHCO_3)을 13주부터 투입하였다.

같은 기간 동안 SRAS 실험구와 HP 실험구의 수질변화는 Table 10에 제시되었다. SRAS 실험구의 경우 실험기간 동안 전반적으로 모든 수질 변수에서 안정적인 값을 보였는데, DO의 경우 7.89 ± 0.32 mg/L, 수온은 $25.48 \pm 1.25^\circ\text{C}$, EC는 167.35 ± 7.54 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH는 7.64 ± 0.15 , 탁도(NTU)는 1.88 ± 0.27 , TAN는 0.21 ± 0.11 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 0.07 ± 0.02 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 3.84 ± 0.59 mg/L, $\text{PO}_4\text{-P}$ 은 2.87 ± 0.23 mg/L의 값을 나타내었다. HP 실험구는 DO의 경우 9.81 ± 0.37 mg/L, 수온은 $20.49 \pm 0.84^\circ\text{C}$, EC는 $1,214.36 \pm 95.65$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH는 6.35 ± 0.34 (1-9주), 4.63 ± 1.66 (10-14주) 및 6.34 ± 0.21 (15-18주)의 값을 보였고, 탁도(NTU)는 1.92 ± 0.34 , TAN는 2.75 ± 0.57 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 0.01 ± 0.01 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 57.38 ± 13.21 mg/L, $\text{PO}_4\text{-P}$ 은 78.29 ± 28.67 mg/L의 값을 나타내었다.

혈액분석

18주간의 어류 사육실험 종료 후, 사료절식을 24시간 한 다음 HBFT-AP와 SRAS 실험구의 메기 혈액을 샘플하여 분석한 결과는 Table 11과 같다. 두 처리구(HBFT-AP vs SRAS)의 PCV (%)는 47.83 ± 3.49 vs 34.83 ± 3.69 , Hb (g/dL)는 15.48 ± 0.98 vs 11.81 ± 1.60 , GOT (U/L)는 87.33 ± 8.00 vs 81.83 ± 10.62 , GPT (U/L)는 25.83 ± 4.49 vs 24.58 ± 5.12 , GLU (mg/dL)는 74.75 ± 8.29 vs 75.75 ± 10.52 , Pi (mg/dL)는 16.28 ± 0.76 vs 16.05 ± 0.85 , Na (mEq/L)는 141.92 ± 1.56 vs 140.42 ± 1.00 , K (mEq/L)는 1.39 ± 0.33 vs 2.48 ± 0.36 그리고 Cl (mEq/L)은 121.83 ± 2.32 vs 119.25 ± 2.42 의 값을 보였다. PCV (%), Hb (g/dL) 및 K (mEq/L)의 항목을 제외한 나머지 혈액 항목은 실험구별 유의성이 발견되지 않았다($P > 0.05$).

고 찰

본 연구에 적용된 HBFT-AP생산 방법은 Lee et al. (2019)에 의하여 제안된 방법으로, 기존 보편화된 UVI 아쿠아포닉 시스템과 달리 물리적 여과기, 생물학적 여과기, 침전조 및 탈질조를 단순화하여 여과기(물리적 생물학적 여과 동시 수행)와 유용 혼합미생물(종속영양세균 및 독립영양세균)만을 활용한 생산 방법이다. 또한 semi-pilot 규모에서 성공적으로 시도된 첫 사례 후, 현장 실험(field test)에서도 유사한 결과를 도출하였다.

Bittsanszky et al. (2016)는 일반적으로 아쿠아포닉 시스템에

Table 7. Growth of five leafy vegetables in HBFT-AP and HP for 24 days (EXP 3)¹

Species	Growth factor	Culture method	
		HBFT-AP ²	HP ³
Red lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	1.71	2.33
	Leaf No.	20.00 $\pm$ 2.63*	15.50 $\pm$ 1.31
	Leaf weight (g)	66.54 $\pm$ 16.74 ^{ns}	54.83 $\pm$ 13.44
	Root mean weight (g)	4.96	7.98
	Leaf length (cm)	28.35 $\pm$ 1.40*	22.76 $\pm$ 2.36
Celery (<i>Apium graveolens</i>)	Stem mean weight (g)	1.99	1.98
	Leaf No.	10.58 $\pm$ 1.00 ^{ns}	12.83 $\pm$ 2.48
	Leaf weight (g)	46.16 $\pm$ 5.92 ^{ns}	48.84 $\pm$ 10.59
	Root mean weight (g)	5.51	12.90
	Leaf length (cm)	33.26 $\pm$ 1.78 ^{ns}	30.96 $\pm$ 2.64
Tatsoi (<i>Brassica narinosa</i>)	Stem mean weight (g)	0.69	0.73
	Leaf No.	21.91 $\pm$ 4.56 ^{ns}	20.25 $\pm$ 2.83
	Leaf weight (g)	45.48 $\pm$ 12.38 ^{ns}	55.61 $\pm$ 19.74
	Root mean weight (g)	4.53	8.92
	Leaf length (cm)	19.67 $\pm$ 2.25 ^{ns}	20.47 $\pm$ 2.73
Caipira lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	1.30	2.20
	Leaf No.	20.00 $\pm$ 1.60 ^{ns}	18.91 $\pm$ 1.16
	Leaf weight (g)	89.29 $\pm$ 17.47 ^{ns}	91.56 $\pm$ 9.55
	Root mean weight (g)	5.45	7.47
	Leaf length (cm)	19.75 $\pm$ 1.14 ^{ns}	18.12 $\pm$ 1.05
Abata lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Stem mean weight (g)	1.29	1.95
	Leaf No.	17.08 $\pm$ 1.62 ^{ns}	15.00 $\pm$ 2.15
	Leaf weight (g)	85.96 $\pm$ 13.10 ^{ns}	88.35 $\pm$ 13.21
	Root mean weight (g)	5.82	10.56
	Leaf length (cm)	20.81 $\pm$ 2.38 ^{ns}	19.44 $\pm$ 2.33

¹Values (means $\pm$ SD of sampled leafy vegetables) with *super-script in the same line are significantly different ($P < 0.05$). ²HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. ³HP, hydroponics. ns, nonsignificant.

Table 8. Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC and Turbidity) in HBFT-AP¹ for 18 weeks²

Diet	Week	DO ⁴ (mg/L)	pH	Temperature (°C)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)
MKP ³	1	8.28±0.21	7.53±0.14	25.43±0.72	170.37±3.79	1.27±0.49
	2	8.09±0.14	6.86±0.81	25.94±0.21	196.08±18.10	2.10±0.47
	3	7.93±0.14	5.96±0.27	26.38±0.22	326.88±36.30	3.18±0.56
	4	8.12±0.16	6.07±0.12	26.12±0.28	427.68±12.75	4.02±0.33
	5	8.51±0.30	6.20±0.29	25.56±0.67	470.60±12.15	3.86±0.30
	6	8.72±0.07	6.43±0.09	25.10±0.10	509.00±4.00	4.17±0.58
	7	8.35±0.34	6.31±0.11	25.90±0.36	545.50±7.33	2.78±0.67
	8	8.56±0.13	6.14±0.13	24.94±0.48	594.45±9.38	2.54±0.41
	9	8.27±0.45	5.85±0.48	25.43±0.90	702.75±26.00	2.93±0.13
	10	9.00±0.34	5.04±0.24	24.05±1.24	822.75±25.66	2.30±0.28
	11	8.93±0.56	4.80±0.10	23.77±0.35	884.33±6.43	2.60±0.40
	12	8.78±0.39	4.85±0.24	24.45±0.19	956.00±8.49	3.03±0.35
	13	8.91±0.04	4.62±0.37	24.20±0.14	959.25±12.62	2.37±0.23
	14	8.67±0.24	5.59±0.48	24.57±0.76	984.56±11.34	2.37±0.23
	15	8.69±0.31	5.12±0.26	24.92±0.14	994.62±10.21	1.75±0.12
	16	8.42±0.34	4.97±0.33	25.55±0.07	1,008.34±9.14	1.55±0.07
	17	8.89±0.18	6.01±0.84	24.86±0.25	1,012.80±19.58	1.84±0.09
	18 (3day)	8.72±0.22	6.36±0.33	25.16±0.63	1,050.20±17.34	1.42±0.15

¹HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. ²Values represent the mean±SD of the values for 7 days. ³MKP, monobasic potassium phosphate. ⁴DO, dissolved oxygen.

Table 9. Change of water quality (TAN, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in HBFT-AP¹ for 18 weeks²

Diet	Week	TAN ⁴ (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
MKP ³	1	0.44±0.39	5.08±0.31	4.37±0.55	5.43±0.70
	2	0.55±0.28	2.50±1.74	11.10±4.08	4.99±0.47
	3	3.24±0.86	0.06±0.02	24.72±2.51	5.05±0.48
	4	4.45±0.17	0.02±0.01	31.08±1.50	5.10±0.58
	5	4.02±0.06	0.04±0.01	31.24±0.59	6.08±0.33
	6	4.03±0.09	0.05±0.01	34.37±0.70	7.10±0.54
	7	3.97±0.05	0.06±0.01	37.50±1.44	8.01±0.20
	8	3.96±0.08	0.04±0.01	39.54±1.21	8.16±0.31
	9	3.99±0.07	0.05±0.01	45.13±1.57	12.34±3.55
	10	4.00±0.04	0.02±0.00	48.43±0.99	14.18±1.29
	11	3.96±0.02	0.02±0.00	50.63±1.38	16.39±2.14
	12	5.96±0.02	0.03±0.02	54.51±2.44	19.39±3.26
	13	9.62±3.58	0.02±0.01	59.16±3.02	23.39±2.15
	14	14.62±1.58	0.03±0.01	65.24±1.54	28.56±2.45
	15	12.14±3.26	0.04±0.01	71.42±4.11	29.42±3.53
	16	11.00±0.99	0.05±0.04	85.84±10.46	31.62±2.21
	17	9.26±3.12	0.04±0.04	98.50±11.21	32.25±2.36
	18 (3day)	8.08±0.60	0.03±0.01	108.12±3.32	33.20±1.29

¹HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. ²Values represent the mean±SD of the values for 7 days. ³MKP, monobasic potassium phosphate. ⁴TAN, total ammonium nitrogen

서는 양어 사육조 내 어류의 밀도에 따라 수치는 변화하나 질산염은 충분히 발생하며, P, Ca, Fe 및 K는 식물의 최적 성장을 위해 크게 결핍된다고 보고하였다. 현재 실험에서는 아쿠아포닉 시스템 내 식물 성장에 최대 결핍 요인으로 주목되는 K의 극복과 더불어 P의 농도도 상승시키기 위해 기존 상업용 사료에 사용되고 있는 일인산칼슘(MCP), 이인산칼슘(DCP) 또는 삼인산칼슘(TCP)와 같은 인산염 제제를 일인산칼륨(MKP)으로 대체하였고, 추가적으로 KCl도 사료 내 0.5% 첨가하였다. 18주간 어류 사양실험에서 HBFT-AP구와 SRAS구의 성장 요인(WG, FE, PER, SGR)들은 유사하게 나타났으나, 혈액 성분에서는 차이를 나타내었다. Lee et al. (2019)은 semi-plot 규모의 HBFT-AP 생산에서 성장한 메기의 혈액은 여러 연구자들(Leard et al., 1998; Adedjei, 2009; Akinrotimi et al., 2011; Yoon et al., 2014)이 보고한 노지 양식장, 유수식 및 순환여과 시스템 양식시설에서 사육된 메기 혈액과 PCV, Hb와 K이온에서 차이를 나타냈었음을 보고하였는데, HBFT-AP 생산에서 성장한 메기의 PCV (%)는 45.33에서 45.83, Hb (g/dL)는 14.03에서 14.50, K (mEq/L)는 0.57에서 0.92의 값을 보였으나 다른 양식환경에서 사육된 메기의 PCV (%)는 35.30에서 41.31, Hb (g/dL)는 9.00에서 14.86, K (mEq/L)는 4.01에서 4.43의 값을 나타내었다고 보고하였다. 본 실험에서 HBFT-AP 생산의 메기는 SRAS 생산과 비교 시 높은 PCV, Hb의 값과 낮은 K 값을 나타내어(Table 10), Lee et al. (2019)의 이전 보고 결과와 일치하는 경향을 나타내었다. PCV와 Hb의 두 항목은 주로 어체 내 산소 운반 능력과 영양학적 빈혈의 판단이 되는 지표로, 앞서 언급한 여러 연구자들의 결과와 현재 실험의 SRAS구에 비해 HBFT-AP구에서 이 두 항목의 값이 높은 것은 폐쇄된 환경의 저 pH 상태에서 메기의 생체 대사과정에 필요한 산소 운반 능력을 증대시키기 위해 환경에 적응된 결과라 사료되며, 또

한 K의 경우 Leard et al. (1998)가 보고한 값(4.01 mEq/L)과 SRAS시스템의 값(2.48 mEq/L)보다 현저히 낮게 나타난 것은 현 실험의 HBFT-AP 생산 시스템 내 사육수 K농도가 높아 체내 삼투 현상 유지를 위해 혈액 내 K 농도를 낮게 유지한 것으로 사료된다.

수경재배는 배지의 사용여부에 따라 순수수경(water culture)과 고형배지경(media culture)으로 나누며, 배양액 재사용여부에 따라 비순환식(open cultural system)과 순환식(closed cultural system)으로 나눈다. 순수수경이란 식물의 뿌리를 지탱하는 물질로 고형배지가 없는 배양액에서 키우는 것으로 담액수경(deep flow technique, DFT), 막막수경(nutrient film technique, NFT), 분무경(aeroponics), 모관수경(capillary culture)을 말한다. 본 실험에 사용된 HP 생산시스템은 담액수경 방식으로 3종류(Table 3)의 배양액은 펌프로 급액관을 통해 다시 섬프수조로 돌아와 순환되는 구조를 가지고 있다(Fig. 1). 순환식 수경재배는 폐양액의 재사용을 통해 질소나 인산염과 같은 비료염의 배출을 감소시켜 환경오염을 최소화 할 수 있고, 비료와 원수 사용량을 절감하여 경제성도 높일 수 있다고 한다(Jang et al., 2017). 그러나 이와 같은 장점에도 여러 연구자들은 순환식 수경재배 시 재배기간이 길어지게 되면 순환이 진행될수록 배양액 내 이온들의 불균형이 심각해져 작물 생육 및 수량에 부정적인 영향을 미친다고 보고하였다(Ho and Adams, 1995; Lopez et al., 1996; Zekki et al., 1996). 이와 상반되게 Dhakal et al. (2005)는 28%의 유기물을 함유한 배지를 사용한 토마토 재배시 순환과 비순환식 수경재배의 생산량 차이는 없었다고 보고하였다. 이러한 상반된 결과는 식물이 영양분을 흡수하는 농도는 배액 성분, 환경조건, 생육단계에 따라 변하고, 식물이 가진 이온 선택성에 의해 스스로 유리한 생육 발달을 유지하는 것으로 유추된다(Abram, 1980). 본 실험은 HP시스

Table 10. Characteristics of water quality in SRAS and HP for 18 weeks¹

Water quality parameter	Culture method	
	SRAS ² (fish)	HP ³ (leaf vegetables)
DO ⁴ (mg/L)	7.89±0.32 (1 to 18weeks)	9.81±0.37
pH	7.64±0.15 (1 to 18weeks)	6.35±0.34 (1 to 9weeks) 4.63±1.26 (10 to 14weeks) 6.34±0.21 (15 to 18weeks)
Water temperature (°C)	25.48±1.25 (1 to 18weeks)	20.49±0.84 (1 to 18weeks)
EC ⁵ (µs/cm)	167.35±7.54 (1 to 18weeks)	1,214.36±95.65 (1 to 18weeks)
Turbidity (NTU)	1.88±0.27 (1 to 18weeks)	1.92±0.34 (1 to 18weeks)
TAN (mg/L)	0.21±0.11 (1 to 18weeks)	2.75±0.57 (1 to 18weeks)
NO ₂ -N (mg/L)	0.07±0.02 (1 to 18weeks)	0.01±0.01 (1 to 18weeks)
NO ₃ -N (mg/L)	3.84±0.59 (1 to 18weeks)	57.38±13.21 (1 to 18weeks)
PO ₄ -P (mg/L)	2.87±0.23 (1 to 18weeks)	78.29±28.67 (1 to 18weeks)

¹Values represent the mean±SD of the values for 18 weeks. ²SRAS, semi-recirculating aquaculture system. ³HP, hydroponics. ⁴DO, dissolved oxygen. ⁵EC, electric conductivity.

템에서 18주간 엽채류 11종에 대해 3회(EXP 1. 2-5주, EXP 2. 9-12주, EXP 3. 14-17주) 입식하여 재배하였다. 3회 동안 EXP 2가 가장 낮은 성장을 보였고, 또한 HBFT-AP구와 비교에서도 낮은 성장도를 나타내었는데(Table 6), 이는 순환식 재배방식에 따른 영양분의 지속적 침적(Table 12)에 의한 pH 하강이 주된 원인으로 사료된다(Table 10). HBFT-AP구 역시 3회 실험 기간 동안 EXP 2 기간에 가장 낮은 엽채류 성장도를 보였으며, 이 기간에 가장 낮은 pH 값을 나타내어 공통된 성향을 나타내었다(Table 8). HP구는 4주간(9-12주) pH 5.0이하의 값을 보인 반면 HBFT-AP구는 11-12주 기간에 pH 5.0이하로 떨어져 2주 정도는 HP 시스템에 비해 식물재배에 적절한 pH를 유지하게 되어 엽채류 성장도가 높았음을 알 수 있다. 일반적으로 배양액의 pH는 5.5에서 6.5가 좋으며, pH가 4.5이하로 떨어지면 Ca, Mg, K 등과 같은 알칼리성 염류가 불용화되고, 반대로 pH가 7이상일 때에는 제2철(Fe^{3+})같은 것이 침전되어 식물이 이용할 수 없게 된다(Moore, 1974; Islam et al., 1980). 또한 식물의 성장을 감소시키고 쇠퇴시키는 엽의 황화현상, 지상부 생장 방해 및 무기이온의 흡수, 수송과 기능에 연관된 증상들, 빈약한 발육은 pH가 불충분한 조건에서 빈번히 일어난다고 하였다(Findenegg et al., 1986).

수산생물과 식물이 함께 양식 및 재배되는 아쿠아포닉 시스템에서는 양 쪽의 수질 환경을 생물학적 한계 내 적정 범위로 유지하는 것이 중요하다(FAO, 2014). 특히 pH는 식물 성장에 있어 가장 중요한 요소 중 하나로 식물의 영양염 흡수와 직결되며, 수

경재배에서 생산되는 식물의 경우 대다수 다량광물질(N, P, K, Ca, S 및 Mg)은 pH 6.5에서 7.0 범위에서 잘 흡수되는 반면 미량광물질(Fe, B, Cu, Zn, Mn 및 Mo)은 pH 6.5 이하에서 흡수가 잘 되므로 적절 pH 범위를 6.5 이내로 설정하고 있다(FAO, 2014; Thorarinsdottir, 2015). 또한 어류의 경우 pH 4.0 이하에서는 생존하지 못하며 pH 4.0에서 5.0 범위에서는 성장이 일어나지 않아 생산성이 없고, pH 9.0에서 11.0은 성장이 늦고, pH 11이상에서는 폐사개체가 출현한다고 하였다(Thorarinsdottir, 2015). 서로 다른 pH 환경을 갖는 HBFT-AP구(저 pH)와 SRAS구(최적 범위)의 성장도 비교 시(Table 5), 증체율(WG, %), 사료효율(FE, %), 일간성장률(SGR, %), 생존율(%) 및 표본평균(No. 100 fish)의 어체중은 유사한 값을 나타내어 pH 5.0에서 6.5의 구간은 아쿠아포닉 시스템 내 어류 성장에 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

Lee et al. (2019)의 보고에 의하면 서로 다른 농도의 MKP를 포함한 4종류 사료(MKP 1.0%, MKP 2.0%, MKP 3.0%, MKP 4.0%)로 HBFT-AP실험에 적용하였을 때, MKP 1.0% 실험구는 사육수 내 가장 낮은 Fe 값(0.0092 mg/L)을 보여 식물성장 저하와 더불어 엽채의 채색이 연하게 진행되었다고 하였고, MKP 2.0% 실험구와 3.0% 실험구는 최적의 엽채류 성장을 나타내었으며, 이 때 Fe의 사육수 내 농도는 0.0148 mg/L 와 0.0233 mg/L 의 값을 나타내었다고 하였다. Thorarinsdottir (2015)은 아쿠아포닉 시스템 내에서 Fe는 엽록체와 전자전달 사슬에 이용되는 미량원소로 광합성에 있어 매우 중요한 제한요소로 작용하며 Fe 부족 시 잎과 식물 전반에 황색으로 변하며 결국 괴사하게 되므로 인위적인 첨가가 필요하다 하였다. 본 실험의 18주간 HBFT-AP구의 사육수 내 Fe 농도는 2.1458 mg/L 로(Table 12),

Table 11. Hematological analysis of Far eastern catfish *Silurus asotus* in HBFT-AP and SRAS for 18 weeks¹

Blood parameters	Culture method	
	HBFT-AP ⁸	SRAS ⁹
Average Fish weight (n=12)	306.82±20.21 ^{ns}	311.08±23.53
PCV (%) ²	47.83±3.49*	34.83±3.69
Hb (g/dL) ³	15.48±0.98*	11.81±1.60
GOT (U/L) ⁴	87.33±8.00 ^{ns}	81.83±10.62
GPT (U/L) ⁵	25.83±4.49 ^{ns}	24.58±5.12
GLU (mg/dL) ⁶	74.75±8.29 ^{ns}	75.75±10.52
Pi (mg/dL) ⁷	16.28±0.76 ^{ns}	16.05±0.85
Na (mEq/L)	141.92±1.56 ^{ns}	140.42±1.00
K (mEq/L)	1.39±0.33*	2.48±0.36
Cl (mEq/L)	121.83±1.64 ^{ns}	119.25±2.42

¹Values (means±SD of six individuals) with * superscripts in the same line are significantly different ($P<0.05$); ns=nonsignificant. HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. SRAS, semi-recirculating aquaculture system. ²Hematocrit. ³Hemoglobin. ⁴Glutamic oxaloacetic transaminase. ⁵Glutamic pyruvic transaminase. ⁶Glucose. ⁷Inorganic phosphorus. ⁸HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. ⁹SRAS, semi-recirculating aquaculture system.

Table 12. Nutrient concentrations in HBFT-AP and HP experimental groups for 18 weeks¹

Water quality parameter	Culture method	
	HBFT-AP ²	HP ³
$NO_3\text{-N}$ (mg/L)	108.1	42.2
$PO_4\text{-P}$ (mg/L)	33.2	108.3
K (mg/L)	87.6	95.3
Ca (mg/L)	108.3	158.9
Mg (mg/L)	14.8	7.5
Na (mg/L)	241.4	299.9
Cl (mg/L)	23.0	34.0
SO_4 (mg/L)	62.0	111.0
Fe (mg/L)	2.1458	2.2789
Zn (mg/L)	1.2918	2.2782
Mn (mg/L)	1.3233	0.0740
Cu (mg/L)	1.0291	0.8187

¹Values are means of 2 determinations. ²HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. ³HP, hydroponics.

Lee et al. (2019)의 10주간 실험에 비해 높은 값을 나타내었는데, 이는 현재 실험에서 바이오헬릭스 여과기의 역세는 실험기간 동안 6회(1회/3주)를 실시한 반면, Lee et al. (2019)의 실험에서는 바이오헬릭스 여과기 역세를 1주 2회 실시하여 완전 분해되지 않은 어류의 분, 미생물 사체 등의 유기물 유출이 많았기 때문으로 사료된다. 일반적으로 수경재배(hydroponics)의 양액 농도의 범위는 PO_4^{3-} (36.9 ± 6.2 mg/L), Total N (321 ± 6.2 mg/L), K (340 ± 101 mg/L), Ca (160 ± 10 mg/L), Mg (40.9 ± 3.3 mg/L), SO_4^{2-} (134 ± 53 mg/L), B (0.573 ± 0.134 mg/L), Co (0.0065 mg/L), Cu (0.0420 ± 0.0174 mg/L), Mn (1.83 ± 0.96 mg/L), MO (0.0872 ± 0.0374 mg/L) 그리고, Zn (0.455 ± 0.374 mg/L)의 값을 보인다(Murashige and Skoog, 1962; Trejo-Téllez and Gomez-Merino, 2012). 현재 실험의 HBFT-AP 실험구의 사육수 영양염 농도는 HP 실험구의 영양염 농도와 비교 시 $\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)를 제외하고는 유사한 값을 보이고 있으며, 특히 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)의 경우 2배 이상의 높은 농도를 나타내었고(Table 12), 전기전도도(EC) 역시 $1,050 \mu\text{S}/\text{cm}$ 의 값을 나타내어(Table 8) 엽채류 외 과채류 생산도 가능할 정도의 영양염과 환경을 조성하게 되었다. HBFT-AP 실험구와 HP 실험구 모두 순환식의 방법을 택한 엽채류 생산에서 실험기간이 늘어남에 따라 pH 하강은 공통된 사항이었고, 이를 방지하기 위해 13주 이후부터 중탄산나트륨을 두 실험구 모두에게 투입하였는데, 이에 따라 Na의 농도가 아주 높아지는 결과를 초래하였다(Table 12). Na는 상추류(lettuce)에 대해 배지 내 100 mg/L 를 초과하지 않는 것이 일반적으로, 이러한 이유는 배지 내 높은 Na는 엽채류에 빠르게 흡수되어 K의 흡수를 방해하기 때문이며, 특히 순환식 시스템에서 K는 작물의 최적 성장을 위해 고려되는 아주 중요한 요소이다(Parks and Murray, 2011). 현재 엽채류 3회 생산 실험에서 중탄산나트륨을 투입하지 않았던 EXP 1과 투입한 EXP 3실험에서(Table 5, 7) 공통적으로 재배되었던 카이피라(caipira)의 성장도를 비교 시 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이는 높아진 Na 농도와 더불어 K 농도도 함께 상승하였기 때문으로 사료된다. 20세기 동안 식물 영양분야에서는 가장 부족한 영양소에 의해 식물성장은 통제된다는 리비히의 법(Liebig's law)이 정설이었으나 현재는 개별 영양소의 상호작용에 의한 복잡한 algorithms의 이론으로 대체 되고 있다(Parent et al., 2013; Baxter, 2015). 이는 한 요소에 의한 식물의 성장 저해보다 영양소 상호간에 밀접한 관련이 있어 모든 영양소 요인들을 고려해야 정확한 결과를 예측할 수 있다는 것으로 앞으로 과학적 접근이 더욱 요구되고 있다.

현재 농가에서 수경재배로 이뤄지는 엽채류의 경우 포기수확 기간은 종묘 입식 후 25-30일 정도 기간이 필요하다. 본 실험 결과에서 pH가 5.0이하로 하강한 EXP 2실험기간을 제외한 엽채류는 초기 종묘 입식 후 23-24일 경과하여 포기 수확이 가능할 정도로 성장하였다. 또한 Lee et al. (2019)이 보고한 MKP가 첨가된 HBFT-AP전용사료 외 빈번한 여과기 역세를 지양한 결

과, 아쿠아포닉스 사육수 내 P, K 및 Fe의 수치를 상승시켜 수경재배와 유사한 엽채류 생산성이 가능함을 제시하였다. 향후 사육수 내 pH 조절을 위해 천연물인 굴패각의 비료(CaCO_3) 등을 이용하여 안정된 pH 조절 방법을 고안한다면 더욱 완벽한 HBFT-AP 시스템 구성이 가능할 것으로 사료된다. 아울러 세계에서 처음으로 시도된 HBFT-AP의 현장 적용 결과는 RAS 기반에 운영되는 아쿠아포닉 시스템의 시설비 및 운영의 복잡성 문제를 보완할 수 있는 해결책으로 대두될 것이며, 향후 지속적인 연구를 통해 매뉴얼화한 후 아쿠아포닉스를 희망하는 농어가에 확대 보급 할 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농생명산업 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 118049-03-2-HD020).

References

- Abram A. Steiner. 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae*. 98, 87-97. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1980.98.7>.
- Adedeji OB. 2009. Effect of diazinon on blood parameters in the African catfish (*Clarias gariepinus*). *Afr J Biotechnol* 8, 3940-3946.
- Ahn TI and Son JE. 2011. Changes in ion balance and individual ionic contributions to EC reading at different renewal intervals of nutrient solution under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet peppers (*Capsicum annuum* L. 'Fiesta'). *Kor J Hort Sci Technol* 29, 29-35.
- Akinrotimi OA, Bekibele DO and Orokotan OO. 2011. Select hematological values of the African catfish (*Clarias gariepinus*) raised in a water recirculating aquaculture system. *Int J Rec Aquaculture* 12, 1-12. <https://doi.org/10.21061/ijra.v12i1.1351>.
- Avnimelech Y, De-Schryver P, Emmereciano M, Kuhn D, Ray A and Taw N. 2015. Overview of aquaculture systems. In: *Biofloc Technology*. Tomasso J. ed. The world Aquaculture Society Press, Baton Rouge, Louisiana, LA, U.S.A., 9-20.
- Bailey DS and Ferrarezi RS. 2017. Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. *Aquaculture Rep* 7, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002>.
- Baxter I. 2015. Should we treat the ionome as a combination of individual elements, or should we be deriving novel combined traits. *J Exp Bot* 66, 2127-2131. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erv040>.
- Bittsanszky A, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Junge Ranka, Morris V, Kotzen B and Komives T. 2016. Nutrient supply

- of plants in aquaponics systems. *Ecocycles* 2, 17-20. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>.
- Dhakal U, Salokhe VM, Tantau HJ and Mas J. 2005. Development of a greenhouse nutrient recycling system for tomato production in humid tropics. *Agricultural engineering international: the CIGR Ejournal* 7, 1-15.
- Emerenciano MGC, Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M and Miranda-Baeza A. 2017. Biofoc technology (BFT) : A tool for water quality management in aquaculture. *IN-TECH*, 91-109. <https://doi.org/10.5772/66416>.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1986. Flow-through and recirculation systems. Report of the working group on terminology, format and units of measurement. EIFAC Technical paper 49, 1-27.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2014. Small-scale aquaponic food production integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and aquaculture technical paper 589, 1-19.
- Findenegg GR, van Beusichen ML and Keltjens WG. 1986. Proton balance of plants: physiological, agronomical and ecological implications. *Neth J Agric Sci* 34, 371-379.
- Gieling TH, van Straten G, Janssen HJJ and Wouters H. 2005. ISE and chemfet sensors in greenhouse cultivation. *Sens Actuator B-Chem* 105, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.02.045>.
- Gutierrez M, Alegret S, Caceres R, Casadesus J, Marfa O and Del Valle M. 2008. Nutrient solution monitoring in greenhouse cultivation employing a potentiometric electronic tongue. *J Agr Food Chem* 56, 1810-1817. <https://doi.org/10.1021/jf073438s>.
- Ho LC and Adams P. 1995. Nutrient uptake and distribution in relation to crop quality. *Acta Hort* 396, 33-44. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.396.3>.
- Islam AKS, Edwards DG and Asher CJ. 1980. pH optima for crop growth. *Plant Soil* 54, 339-357.
- Jang DC, Choi KY and Kim IS. 2017. Effect of drainage reusing ratio on growth and yield of summer-cultivated paprika in recycling hydroponic cultivation. *Protected Hort* 26, 7-12. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2017.26.1.7>.
- Leard AT, Wagnerr BA, Camp KL, Wise DJ and Gao XD. 1998. Seasonal values of selected blood parameters of farm-raised channel catfish (*Ictalurus punctatus*) in the Mississippi Delta. *J Vet Diagn Invest* 10, 344-349.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim JM, Shin SJ and Kim JD. 2019. Effect of dietary monobasic potassium phosphate levels on water quality and the growth of far eastern catfish *Silurus asotus* and four leafy vegetables in a hybrid biofloc technology aquaponic system. *Korean J Fish Aquat Sci* 52, 159-172. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0159>.
- Lopez J, Nicolas T, Wim V, Sylvain D and Adner G. 1996. Effects of varying sulphate concentrations on growth, physiology and yield of the greenhouse tomato. *Sci Hort* 67, 207-217. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(96\)00948-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(96)00948-X).
- Losordo TM, Westerman PW and Liehr SK. 1994. Water treatment and wastewater generation in intensive recirculating fish production systems. *Bull Natl Res Inst Aquaculture Suppl* 1, 27-36.
- Moore DP. 1974. Physiological effects of pH on roots. In: *The plant root and its environment*. Carsoned EW. ed. University Press of Virginia, Charlottesville, Virginia, U.S.A., 135-151.
- Murashige T and Skoog F. 1962. A Revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiol Plant* 15, 473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2013. 2012 FAO world fisheries trends. Myeong JI, Min BH, Park NB, Park MS, Park JJ, Shin YK, Lee KA, Lee JH, Jeon JC and Hwang HG. eds. Koran Grapefice, Pusan, Korea, 194-205.
- Parent SÉ, Parent LE, Egozcue JJ, Rozane DE, Hernandez A, Lapointe L, Hébert-Gentile V, Naess K, Marchand S, Lafond J, Mattos D, Barlow P and Natale W. 2013. The plant ionome revisited by the nutrient balance concept. *Front Plant Sci* 22, 4-39. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00039>.
- Parks S and Murray C. 2011. Leafy Asian vegetables and their nutrition in hydroponics. NSW department of industry press, Gosford, New South Wales, Australia, 1-20. Retrieved from <http://www.dpi.nsw.gov.au/> on Sep 02, 2019.
- Rakocy JE. 2007. Ten guidelines for aquaponics systems. 10 th Anniversary Issue. *Aquaponics J* 46, 14-17.
- Rakocy JE, Masser MP and Losordo TM. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Retrieved from http://www.gemstone.umd.edu/team-sites/classof2014/mega/documents/Rakocy_RAS.PDF on May 16, 2018.
- Reyes AAD and Lawson TB. 1995. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. *Aquacult Eng* 15, 27-39. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(95\)00005-Y](https://doi.org/10.1016/0144-8609(95)00005-Y).
- Russo RC, Thurston RV and Emerson K. 1981. Acute toxicity of nitrate to rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Canadian J Fish Aqua Sci* 38, 387-393. <https://doi.org/10.1139/f81-054>.
- Schneider O, Blancheton JP, Varadi L, Eding EH and Verreth JAJ. 2006. Cost price and production strategies in European recirculation systems. *Linking Tradition & Technology Highest Quality for the Consumer*. World Aquaculture Society Conference proceedings, Firenze, Italy.
- Sokal RR and Rohlf FJ. 1995. Nested analysis of variance. In: *Biometry*. freeman WH. 3 rd ed. New York, NY, U.S.A., 272-342.
- Suh KH, Kim BJ and Jeon IG. 2001. Design and development of integrated recirculating aquaculture system. *J Korean Fish Soc* 34, 70-76.
- Thorarinsdottir RI. 2015. *Aquaponics guidelines*. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33-39.

- Trejo-Tellez LI and Gomez-Merino FC. 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. In: Hydroponics: A standard methodology for plant biological researches. Asao Toshiki, ed. InTech, Rijeka, Croatia, 1-22.
- Yoon TH, Lee DH, Won SG, Ra CS and Kim JD. 2014. Optimal incorporation level of dietary alternative phosphate (MgH-PO_4) and requirement for phosphorus in juvenile Far eastern catfish (*Silurus asotus*). Asian Australas J Anim Sci 28, 111-119. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0378>.
- Zekki H, Gauthier L and Gosselin A. 1996. Growth, Productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. J Amer Soc Hort Sci 121, 1082-1088. <https://doi.org/10.21273/JASHS.121.6.1082>.