

황금 비단잉어를 이용한 Hybrid 바이오플락 아쿠아포닉 시스템과 수경재배 시스템의 엽채류 생산성 비교 연구

이 동 훈[†]

경기도해양수산자원연구소(연구소)

Comparative study on Growth of Leafy Vegetables Grown in a Hybrid BFT-Aquaponics using Yellow Koi Fish, *Cyprinus carpio* and Hydroponics

Dong-Hoon LEE[†]

Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

Aquaponics is a cultivation system that combines aquaculture and agricultural hydroponics. This study investigated the productivity of leafy vegetables cultivated in the hybrid biofloc technology-aquaponics (HBFT-AP) and hydroponics (HP). Yellow koi fish (*Cyprinus carpio*) were fed an EP diet containing 3% MKP (monobasic potassium phosphate, KH_2PO_4) for 10 weeks in the HBFT-AP. Leafy vegetables of 2 cultivar (ovired lettuce, volare lettuce) were employed in the experiment and water quality [dissolved oxygen (DO, mg/L), pH, water temperature ($^{\circ}\text{C}$), electrical conductivity (EC; $\mu\text{s/cm}$), turbidity (NTU), TAN ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) (mg/L), $\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L) and $\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)] was measured 6 times a week. Leafy vegetables in HBFT-AP using yellow koi fish fed the EP with MKP 3.0% had a productivity somewhat higher (2 kinds of cultivar) compared to those in HP, and the pH in the HBFT-AP was maintained at the range around 6.0 for 7-10 week. During the 10-week feeding trial, concentration of $\text{NO}_2\text{-N}$ was kept low in variability while total TAN, $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ levels increased with time in HBFT-AP. Higher values in hematocrit (PCV, %), hemoglobin (Hb, g/dL) and inorganic phosphorus (mg/dL) were found ($P < 0.05$) in fish at the end of the experiment compared to the fish at the beginning of the experiment (initial fish: 27.45%, 12.19 g/dL and 6.39 mg/dL; final fish: 36.26%, 14.52 g/dL and 11.21 mg/dL).

Key words : Aquaponics, Hybrid biofloc technology (HBFT), Koi fish, Monobasic potassium phosphate (MKP), Vegetables.

I. 서론

관상어에 대한 수요는 2000년대 중반부터 지속적으로 증가되고 있으며, 관상어 관련 상품 산업을 위한 연구도 병행되고 있다(Lee and Lee,

2008). 이 중 비단잉어는 채색이 다양하여 대중적으로 관심이 높은 어종으로, 수온 및 pH 등 수질변화에 내성이 강하여 다른 관상어에 비해 양성하기가 용이한 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2006; Lee et al., 2010; Kim and Lee, 2014;

[†] Corresponding author : 031-8008-6510, leedh27@gg.go.kr

Kim and Lee, 2015).

물의 사용량을 줄이며 지속적으로 양식이 가능하도록 하고, 이와 더불어 양식 생산성을 높이며 환경문제를 최소화하기 위한 친환경적인 양식 기술에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 양식방법으로 순환여과식양식(recirculating aquaculture system, RAS), 바이오플락양식(biofloc technology, BFT), 아쿠아포닉스(aquaponics)가 대표적이다 (Rakocy et al., 2006; Mariscal-Lagarda et al., 2012; Rijn, 2013; Avnimelech et al., 2015).

아쿠아포닉스(aquaponics)는 수산양식과 농업의 수경재배가 결합된 복합재배 시스템으로, 수산양식 생물의 성장과 생존을 위해 공급된 먹이(사료)가 종속 및 독립영양미생물(hetero- and autotrophic microorganisms)에 의해 각종 무기물과 질산염으로 분해 및 생성된 것을 식물이 성장 영양소로 흡수하면서 양어수질의 안정화와 식물성장을 이루어지게 하여 사육수의 교환없이 지속적으로 농·수산물을 생산할 수 있는 친환경 생산방법이다(FAO, 2014).

Lee et al.(2019a,b)은 어류 양식에 사용되는 배합사료 만으로 식물에 공급하는 영양소를 충당할 수 있도록 기존 상업용 사료에 사용되는 인첨가제(일인산칼슘, 이인산칼슘, 삼인산칼슘)를 일인산칼륨(monobasic potassium phosphate, MKP)으로 대체하였고, 종속 및 독립영양미생물이 혼합된 유용미생물을 활용한 hybrid biofloc technology aquaponics (HBFT-AP) 생산 방식을 적용하여 아쿠아포닉스 운영 시 식물 생산성을 향상시켰음을 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 국내 내수면 어종 중 관상어 가치가 높은 황금 비단잉어를 대상으로 일인산칼륨이 첨가된 사료의 공급 및 어류의 배설에 따른 사육수내 수질과 영양염 발생 경향을 조사하고자 하였다. 이와 더불어 열채류 생산성에서 수경재배 생산방법과 비교하여 차이점을 확인하고 어떠한 차이를 나타내는지 살펴 향후 관상어를 이용한 아쿠아포닉스 6차 산업화를 위한 기

초자료로 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험사료 준비 및 분석

실험에 사용된 사료는 사조동아원(주) 당진사료공장(충청남도 당진시)에서 직경 6 mm 내외 부상 EP (extruded pellet) 사료로 제작된 것으로, Lee et al. (2019a)의 실험 결과에 보고된 MKP3 (monobasic potassium phosphate 3% in diet)를 제작하여 사용하였다(<Table 1>). 사료의 일반 성분 [수분(moisture), 조단백질(crude protein), 조지방(crude lipid), 조회분(crude ash), 조섬유(crude fiber)] Ca, P 및 광물질 성분은 부경대학교 사료영양연구소에 의뢰하여 분석하였다(<Table 2>).

2. 시스템 구성 및 운영

아쿠아포닉스 생산, 어류 양식 생산 및 수경재배 생산을 위한 실험 시스템은 [Fig. 1]과 같다 (Lee et al., 2019b). BFT 양식시설과 수경재배 시설이 결합한 아쿠아포닉스 실험구(hybrid biofloc technology-aquaponics, HBFT-AP)는 어류 원형수조(ø 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, 680 L 바이오헬릭스 여과기(Isan M Tech. Ltd., Korea) 1개, 원형수조와 식물베드지의 물 순환을 위한 펌프(1.5 HP) 1개, 어류 수조 BFT 유지를 위한 벤츄리 에어 공급 시스템 순환펌프(1.0 HP) 1개, 식물베드지 하단에 빛 공급을 위한 형광등 40개로 구성되었다. 식물 재배 포트는 베드지 당 44개로 총 880개의 재배지로 구성되었으며, 식물에 공급되는 물 주수 PVC 배관은 25 mm, 배수 배관은 40 mm를 사용하였고, 최종 집수되어 어류 사육조로 유입되는 배관은 100 mm를 사용하였다.

<Table 1> Ingredient composition of the experimental diets.

Ingredient	MKP 3%
Fish meal	37.00
Soybean meal	15.00
Corn gluten Meal	10.00
Blood Meal	5.00
Wheat flour	21.70
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(BHA) ⁴	0.05
Stay C	0.03
Organic Fe	0.50
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.

⁴BHA, butyl hydroxyl anisole.

대조구로 수경재배(hydroponics, HP) 실험구는 양액공급 시스템을 이용하였고, 기본 구성은 원수탱크 1개(1톤), 양액 자동공급기인 Nutrient system Agronic 54 model (HANGARAMPONICS Ltd., Korea) 1대, 양액통(0.1톤) 3개(A, B and C solution), 섬프수조(L 1.0 m × W 0.5 m × H 1.0

<Table 2> Chemical composition of the experimental diets¹

Composition	MKP ² 3%
Moisture (%)	6.24
Crude protein (%)	45.56
Crude lipid (%)	7.21
Crude ash (%)	10.64
Crude fiber (%)	1.98
Ca (%)	2.38
P (%)	2.24
Mg (ppm)	2,125.60
Fe (ppm)	462.30
Cu (ppm)	15.40
Mn (ppm)	39.20
Zn (ppm)	98.30
K (ppm)	15,548.70

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



[Fig. 1] Compartments and water flow of the experimental design: (A), HBFT-AP (hybrid biofloc technology-aquaponics) system: fish tank (ø 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; (B), HP (Hydroponics): 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. Lee et al. (2019b).

m) 1개 및 식물베드지로 양액을 공급하기 위한 순환펌프(1.5 HP) 1개로 구성하였고, 양액통 별 배양액 구성은 <Table 3>과 같다.

<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
C solution tank (0.1 ton)	NaCl	16.4
	NH ₄ H ₂ PO ₄	1,380

¹HP, hydroponics.

3. 실험어 배치 및 사료공급

실험에 사용된 황금 비단잉어는 경기도해양수산자원연구소에서 사육 관리한 품종으로 어체중 310-785 g(평균 어체중 568 g)의 범위를 갖는 개체 176마리 100 kg을 HBFT-AP 생산 실험구에 배치하여 아쿠포닉생산에 이용하였다. 사료공급은 수질관리의 안정화 유도를 위해 어체중 당 1.0%로 제한하여 1일 2회 공급하여 10주간 진행되었다.

4. 엽채류 배치

실험에 사용된 엽채류는 경기도 여주시 여주아쿠아포닉스 농장에서 발아된 2종류의 유럽산 상추(*Lactuca sativa*) 품종인 오비레드(ovired lettuce)와 볼라레(volare lettuce)가 사용되었다. 엽채류 입식은 HBFT-AP 실험구의 NO₃-N의 농도가 25 mg/L 이상 상승하는 시점(어류입식 후 7주)에 두

실험구(HBFT-AP구, HP구)의 엽채류 입식이 동시에 이루어졌다. HBFT-AP구와 HP구 모두 품종별 440개체를 입식하여 총 실험구별 880개체가 이용되었다. 상단(태양광) 및 하단(형광등)의 광량 차이(상단 15,000 lux, 하단 9,000 lux)로 엽채류는 각 품종별 상·하단을 교차하여 광량 차이에 의한 생산성 오차를 배제토록 배치하였다.

5. 수질관리

HBFT-AP 실험구의 수질관리는 Lee et al. (2019a)이 보고한 수질관리 방법을 적용하였다. 물만들기 초기 미생물은 시판용 유용미생물 제품인 BFT-ST (EgeeTech, Ltd., USA) 7.6 L을 사용하였으며, 어류 입식 후 1주 간은 Emerenciano et al. (2017)의 방법에 준하여 사료 공급에 따른 수중의 TAN 발생 농도에 맞추어 유기탄소원인 정제 포도당을 계산한 후, C:N(6:1)비를 맞추어 선포수조에 공급하였다. 2주부터 유기탄소의 공급은 중단하였고 무기탄소원으로 CO₂(탄산가스)를 pH가 6.5이하로 떨어질 때까지 지속적으로 사육수조에 투입하였으며, 어류 입식 4주 후 중단되었다. 엽채류 입식 후 pH가 6.0 이하로 하강함에 따라 굴폐각으로 가공된 패화석 비료(Hae Gwang Co., Korea) 10 kg을 60 L 물에 24 h 동안 우려내어 각 수조당 1.5 L씩 첨가하여 pH 6.0 내외 범위를 유지하였다.

6. 수질분석

수질측정은 1주 6회 용존산소(DO, mg/L), pH, 수온(°C), 전기전도도(electrical conductivity, EC; $\mu\text{s/cm}$), 탁도(NTU), TAN (NH₃ + NH₄⁺) (mg/L), NO₂-N (mg/L), NO₃-N (mg/L)와 PO₄-P (mg/L)를 측정하였다. DO, pH, 수온, EC와 탁도는 현장 수질측정기 YSI PRODSS (YSI Inc., USA)를 사용하였고, TAN, NO₂-N, NO₃-N와 PO₄-P는 분석시약 (NitroVer[®]X Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia Reagent Set 2604545-KR, NitriVer[®]3

Reagent Set 2608345-KR, PhosVer[®]3 Phosphater Reagent, HACH Ltd., USA)과 다목적 수질측정기인 DR5000 (HACH Ltd., Love land, USA)을 이용한 비색법으로 분석하였다. 또한 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., USA)로, Cl (mg/L) 및 SO₄ (mg/L)는 이온크로마토그래피 930 Comact IC Flex (Metrohm Co., Switzerland)를 사용하여 분석하였다.

7. 엽채류 조사

엽채류 2종의 생산성 파악을 위한 성장 측정은 뿌리와 엽채를 분리한 후 각각의 무게를 측정하였으며, 0.1 g의 측정 단위로 최대 12 kg까지 측정 가능한 저울 AND GP-12K (AND Korea Co., Korea)을 이용하였다.

8. 어류 혈액분석

10주간 황금 비단잉어를 이용한 HBFT-AP 사육실험에서 어류의 혈액성분 변화를 관찰하기 위해 수조 입식 전과 실험 종료 후, 어류 혈액성상 변화 조사를 위해 24시간 사료 절식이 이루어졌다. 어류마취제인 clove oil (C8392-100 mL, Sigma-Aldrich Co., USA)를 이용하여 50 ppm 농도로 마취시킨 다음 헤파린 약물 K3333-10KU (Merck KGaA Ltd, Germany)을 처리한 5 cc 주사기를 사용하여 실험구별 6마리의 개체에 대해 미부정맥에서 채혈하였다. 수집된 혈액 샘플 중 전혈(whole blood)은 hemoglobin (Hb, g/dL)과 hematocrit (PCV, %) 분석에 사용하였고, 이 후 원심분리기 Centrifuge 5415 R (Eppendorf Ltd., Germany)에서 4℃, 12,000 rpm으로 10분간 혈장을 분리하였다. 혈장은 glutamic oxaloacetic transaminase (GOT; U/L), glutamic pyruvic

transaminase (GPT; U/L), albumin (ALB; g/dL), glucose (GLU; mg/dL), inorganic phosphorus (Pi; mg/dL), Na (mEq/L), K (mEq/L)와 Cl (mEq/L) 분석에 사용되었다. PCV분석에는 HAEMATOKRIT 210 (Hettich Ltd., Germany)을 이용하였으며, Hb 등 다른 혈액 요소는 시판되는 임상진단키트 Fuji DRI-CHEM slide (Fuji photo film co. Ltd., Japan)와 혈액분석기 DRI-CHEM 3500 I (Fujifilm Ltd., Japan)를 이용하여 분석하였다.

9. 통계처리

어류 혈액분석에서 얻어진 실험 전과 실험 후의 자료들(평균체중, PCV, Hb, GOT, GLU, Pi, Na, K 및 Cl)은 SPSS Version 10 (SPSS, 1999) 프로그램의 일원분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 분석하였으며, 통계분석의 유의수준은 5% (P<0.05)에서 결정되었다.

III. 결과 및 고찰

HBFT-AP 시스템 및 HP 시스템 운영기간(HBFT-AP 1-10주, HP 7-10주) 동안 수질을 조사한 결과는 <Table 4, 5>에 나타내었다. HBFT-AP 구의 경우 DO는 실험 1주차에 8.67±0.32 mg/L에서 실험 종료(10주)에는 7.87±0.09 mg/L의 값을 보여 어류, 식물 및 미생물의 산소 소비에 따라 감소하는 경향이 나타난 것으로 사료된다. 수온은 평균 23.2-24.5℃의 값을 보여 일정하게 유지되었으며, 전기전도도는 실험 1주차에 평균 151.3±7.4 μs/cm의 값을 보였으나, 시간이 지남에 따라 상승하여 실험종료 기간(10주)에는 441.2±9.5 μs/cm의 값을 나타내었다.

탁도는 초기 0.4 NTU 값을 나타내었으나, 실험 1주기간의 BFT 적용 시기 동안은 상승(2.13±0.56 NTU)하였다. 이후 유기탄소 중단과 함께 CO₂ 공급에 따라 4주 기간까지 감소하였으나, 5주부터 사료공급의 지속에 따라 상승하기 시작

<Table 4> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in HBFT-AP for 1-10 weeks¹

Culture method	Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (°C)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
HBFT (Fish)	initial	9.14	7.69	22.6	138.7	0.4	0.11	0.063	2.49	1.05
	1	8.67±0.32	7.81±0.11	23.2±1.6	151.3±7.4	2.13±0.56	1.56±0.64	0.087±0.021	1.25±0.48	0.72±0.24
	2	8.43±0.21	7.63±0.12	23.3±1.2	187.8±14.5	1.62±0.42	0.68±0.18	0.405±0.214	4.25±1.97	2.48±0.84
	3	8.56±0.18	7.14±0.31	23.8±1.1	229.7±12.4	0.88±0.26	0.59±0.09	0.742±0.115	8.57±2.21	6.44±2.49
	4	8.27±0.15	6.71±2.45	24.3±0.9	267.9±18.8	0.69±0.19	1.01±0.39	0.258±0.187	13.70±2.19	9.49±0.56
	5	8.34±0.18	6.38±2.16	23.7±0.6	294.5±11.9	1.01±0.34	1.25±0.11	0.074±0.012	18.45±2.12	11.42±0.24
HBFT-AP (Fish + Leafy vegetable)	6	8.29±0.17	6.04±0.09	24.5±1.1	332.4±14.3	1.07±0.17	1.43±0.13	0.058±0.009	26.34±3.11	14.57±1.59
	7	8.11±0.11	6.08±0.05	23.4±0.8	367.1±10.4	1.12±0.08	1.74±0.18	0.028±0.008	29.24±2.41	16.21±1.23
	8	7.98±0.09	5.94±0.12	23.9±0.7	396.5±12.7	1.21±0.11	2.15±0.21	0.034±0.007	31.69±1.99	17.14±0.72
	9	7.94±0.04	6.01±0.08	24.1±0.8	427.3±10.4	1.54±0.17	3.07±0.62	0.022±0.004	35.42±1.57	18.54±0.38
	10	7.87±0.09	5.98±0.09	23.8±0.6	441.2±9.5	1.69±0.08	3.68±0.19	0.031±0.011	37.48±1.12	18.57±0.16

¹Values represent the means±SD of the values for 7 days: HBFT, hybrid biofloc technology; HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

<Table 5> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in HP for 7-10 weeks¹

Culture method	Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (°C)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
HP (Leafy vegetables)	7	9.60±0.24	6.31±0.12	23.2±0.4	1,021.4±8.5	0.77±0.11	3.28±0.06	0.026±0.005	68.21±3.11	20.26±1.05
	8	9.34±0.11	6.18±0.11	23.1±0.7	1,109.3±54.4	0.84±0.09	2.71±0.50	0.010±0.004	65.13±1.22	19.88±1.75
	9	9.29±0.26	6.04±0.07	23.0±0.5	1,161.8±14.3	0.95±0.07	0.42±0.35	0.005±0.001	71.18±3.63	22.86±1.38
	10	9.24±0.39	5.64±0.35	23.1±0.3	1,197.3±21.5	1.23±0.12	0.14±0.10	0.007±0.001	70.43±1.14	20.49±0.29

¹Values represent the means±SD of the values for 7 days: HP, hydroponics; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

하여 실험종료 10주에는 1.69 ± 0.08 NTU 값을 나타내었다. pH는 초기 7.69의 값을 나타내었으나, 실험 1주기간의 BFT 적용 시기 동안은 소폭 상승하여 7.81 ± 0.11 의 값을 보였으나, 이후 CO₂ 공급, 어류 및 미생물 호흡활동에 따른 CO₂ 발생 및 질산화과정에서 발생하는 수소이온(H⁺) 생성으로 감소하여 실험 6주부터는 6.0범위 내에서 유지되었다.

TAN은 실험 1주에는 1.56 ± 0.64 mg/L의 값을 보였으나, 2주부터 감소하다가 4주 이후 pH가 7 이하로 떨어짐에 따라 다시 상승하여 실험 종료 10주에는 3.68 ± 0.19 mg/L의 값을 나타내었다. NO₂-N은 실험 1주 0.087 ± 0.021 mg/L의 값에서 실험 3주까지 높은 값(0.742 ± 0.115 mg/L)을 보였으나, 이 후 질산화과정의 안정화에 따라 감소하기 시작하여 실험 5주부터는 0.1 이하의 값을 유지하였다.

NO₃-N은 초기 2.49 mg/L의 값에서 실험 1주기간의 BFT 적용 시기 동안은 오히려 감소하다가 유기탄소 중단과 CO₂ 공급에 따라 2주 후부터 다시 상승하여 실험종료 시기인 10주에는 37.48 ± 1.12 mg/L의 값을 나타내었다. PO₄-P은 NO₃-N (mg/L)과 유사한 증감 패턴을 보였으며, 실험 초기 1.05 mg/L에서 실험종료 시기인 10주에는 18.57 ± 0.16 mg/L의 값을 나타내었다.

Lee et al.(2019a, 2019b)은 HBFT-AP 시스템 내 질산화 과정의 특징으로 TAN 및 NO₃-N은 지속적으로 상승하나, NO₂-N은 0.1 mg/L 이하로 유지된다고 하였다. 이러한 이유는 낮은 pH 상태에서는 독립영양세균의 질산화 능력은 급격히 감소하고 중속영양세균이 질산화과정을 담당한 결과로 보고하였다. Robertson et al. (1988)은 중속영양세균인 *T. pantotropha*의 질산화과정은 독립영양세균의 질산화과정과 달리 NH₄⁺가 NO₂-N의 중간단계 없이 NO₃-N으로 직접 산화됨을 증명하였다. 본 실험에서도 5-10주 기간의 수질 변화 (<Table 4>)를 살펴보면 TAN 및 NO₃-N은 지속적으로 상승하나 NO₂-N은 0.1 mg/L 이하로 유지되었는데,

이 기간의 낮은 산성 유지 상태와 외부의 유기탄소 공급이 없는 점을 고려하면 중속영양세균의 질산화과정에 따른 수질 변화로 추정된다. 또한 식물 입식 시점인 실험 7주 후부터 암모니아 농도가 높음에도 황금 비단잉어의 사료섭취 및 생존에 변화가 없었던 것은 대다수 암모니아가 낮은 pH 상태에서 비이온화된 암모니아 보다 이온화된 암모늄(NH₄⁺-N) 형태로 전환되어 암모니아의 독성이 억제됐기 때문이라 사료된다(Purwono et al., 2017).

HP구의 경우 양액 자동공급기에 의한 지속적인 비료 첨가 및 환경조절로 모든 환경 요소들이 식물 입식 후 1주 동안은 일정하게 유지되었으나, 식물 입식 후 2주부터 DO (mg/L), NO₃-N (mg/L) 및 PO₄-P (mg/L)을 제외하고 증감 현상이 나타났다. pH의 경우 식물 입식 1주차의 6.31 ± 0.12 값에서 실험종료 시기에 5.64 ± 0.35 의 값을 보여 감소하는 경향이 있었고, EC는 1주차 $1,021.4 \pm 8.5$ μ s/cm 값에서 실험종료 시에 $1,197.3 \pm 21.5$ μ s/cm 값으로 증가하는 경향을 나타내었다. 탁도는 1주차 0.77 ± 0.11 NTU에서 실험종료 4주차에 1.23 ± 0.12 NTU 값을 보여 증가하는 경향을 보였다. TAN와 NO₂-N은 3.28 mg/L(1주차)에서 0.14 mg/L(4주차), 0.026 mg/L(1주차)에서 0.007 mg/L(4주차)의 값을 나타내어 실험 기간에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

HBFT-AP구와 HP구의 엽채류 생산성 비교 결과는 <Table 6> 및 [Fig. 2]와 같다. 엽채류 2종에 대한 4주간 전체 총중량에서 HBFT-AP구는 91,320 g, HP구는 86,440 g으로 생산되어 HBFT-AP구가 높은 생산성을 보였다. 부분적으로 살펴보면 엽중량에서는 HBFT-AP구가 생산성이 높았으나, 뿌리의 중량에서는 HP구가 높은 경향을 나타내었다. 수산생물과 식물이 함께 양식 및 재배되는 아쿠아포닉스 시스템에서 양쪽의 수질 환경을 생물학적 한계 내 적정 범위로 유지하는 것은 중요하며(FAO, 2014), 특히 pH는 식물성장에 있어 가장 중요한 요소 중 하나로 식물의 영

양염(macro nutrient 및 micro nutrient) 흡수 능력에 직접적으로 영향을 미친다(FAO, 2014). 수경재배에서 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)는 pH 6.5 이하에서 흡수가 잘 되는 것으로 알려져 있다(FAO, 2014; Thorarinsdottir

RI, 2015).

일반적으로 배양액의 pH는 5.5에서 6.5가 좋으며, pH가 4.5이하로 떨어지면 Ca, Mg, K 등과 같은 알칼리성 염류가 불용화되고, 반대로 pH가 7 이상일 때에는 제2철(Fe³⁺)같은 것이 침전되어 식물이 이용할 수 없게 된다(Moore, 1974; Islam et al., 1980).

<Table 6> Growth of two leafy vegetables in HBFT-AP and HP for 4 weeks¹

Culture method		Growth factor			
HBFT-AP	Individual No.	Initial mean weight (g) (No. = 12 individuals)	Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf weight (g)
Ovired lettuce	440	1.78±0.32	44,120	1,144	42,976
Volare lettuce	440	2.01±0.27	47,200	1,276	45,924
Sum	880		91,320	2,420	88,900
HP	Individual No.		Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf weight (g)
Ovired lettuce	440	1.81±0.24	41,360	1,364	39,996
Volare lettuce	440	2.04±0.19	45,080	1,496	43,584
Sum	880		86,440	2,860	83,580

¹HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics; HP, hydroponics



[Fig. 2] Growth of four leafy vegetables in HBFT-AP and HP system during 7-10 weeks. (A) HBFT-AP 1st week, (B) HP 1st week, (C) HBFT-AP 4th week, (D) HP 4th week.

HBFT-AP구와 HP구의 엽채류 입식은 두 실험 구 모두 최적의 pH 환경조건에서 수행되었고, 더불어 HBFT-AP구의 경우 아쿠아포닉스 식물성장을 위한 EC 추천 농도인 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이상 값의 조건을 갖추었을 때 입식되었다(Rakocy et al., 2006). 식물성장 기간(7-10주) 동안 측정된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 경우 AP구에서 높은 값을 보였으며, 또한 최종 실험종료 시 분석된 10종류의 영양소 분석에서도 AP구가 모든 영양소에서 높은 값을 나타내었다(<Table 7>).

<Table 7> Nutrient concentrations in HBFT-AP and HP at the end of the trial

Water quality parameter	Culture method	
	HBFT-AP	HP
K (mg/L)	9.8	23.6
Ca (mg/L)	45.6	67.4
Mg (mg/L)	5.0	7.5
Na (mg/L)	13.6	16.8
Cl (mg/L)	12.0	17.0
SO4 (mg/L)	20.0	27.0
Fe (mg/L)	0.0610	1.0743
Zn (mg/L)	0.3320	0.6900
Mn (mg/L)	0.0090	0.0100
Cu (mg/L)	0.0130	0.0170

¹HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics; HP, hydroponics.

그러나, 최종 엽채류 생산성에서 HBFT-AP구가 다소 높았던 이유는 일반 수경재배에 비해 많은 용수를 사용하는 아쿠아포닉스의 특성 때문으로 사료된다. 본 실험에서는 HBFT-AP구 16톤, HP구에서 4톤의 용수가 사용되었다. 비록 HBFT-AP구가 모든 영양소에서 HP구에 비해 상대적 농도가 낮았으나, 전체 양으로 환산 시 HP구 보다 높았다(<Table 7>). 또한 현재 아쿠아포닉스 연구분야에서 생산성이 수경재배에 비해 떨어지지 않는 이유는 식물성장 촉진 미생물(PGPM, plant growth promoting microbes)의 역할로 설명되고 있다(Yep and Zheng, 2019). 특히 아쿠아포닉스 내 존재하

는 유용미생물들은 Fe 등 부족한 미량원소의 활용성을 증대시키는 것으로 알려져 있어, 주기적으로 미생물 첨가가 추천되고 있다(Zou et al., 2016; Bartelme et al., 2018). 본 실험의 HBFT-AP구에서는 초기 유용미생물 10종류와 함께 시간이 경과함에 따라 다양한 미생물이 번식하였음을 추정할 수 있으며, 이러한 미생물의 역할이 엽채류의 성장에 영향을 미쳐 HP구 보다 다소 생산성이 높은 것으로 추정된다.

HBFT-AP구에서 사육관리된 황금 비단잉어의 생리적 건강상태 파악을 위해 혈액분석을 수행한 결과는 <Table 8>과 같다. 초기 유수식 관리에 비해 전혈 부분에서는 PCV (%) 및 Hb (g/dL)의 수치가 유의한 차이를 보이며 상승되는 경향을 나타내었고($P<0.05$), 혈장 부분에서는 inorganic phosphorus (mg/dL) 및 K (mEq/L)의 수치가 유의한 차이를 나타내었다($P<0.05$). Lee et al.(2019a,b)와 Lee et al.(2020)는 메기와 뱀장어를 이용한 HBFT-AP 생산 시험에서 어류 혈액 변화의 가장 큰 특징으로 전혈의 Hb (hemoglobin) 및 PCV (hematocrit)의 수치 상승을 밝혀 왔다. 본 실험의 결과도 이전 결과와 유사하게 HBFT-AP구에서 사육 관리된 황금비단잉어의 경우 초기에 비해 높은 값을 보였다. 이러한 이유는 PCV와 Hb의 두 항목은 주로 어체내 산소 운반능력과 영양학적 빈혈의 판단이 되는 지표로, 폐쇄된 환경의 낮은 pH 상태에서 황금 비단잉어의 생체 대사 과정에 필요한 산소운반 능력을 증대시키기 위해 환경에 적응된 결과인 것으로 사료된다.

실험 전 사육 관리된 황금 비단잉어의 공급 사료는 일반 시판용 담수어 사료이나 현재 실험에서 공급된 사료는 MKP가 첨가된 자체 제작 사료로, 이러한 사료 구성분이 변함에 따라 혈액 내 P와 K의 성분이 유의적인 차이를 나타낸 것 ($P<0.05$)으로 보이며, 또한 외부 수중 환경의 높은 영양염 농도가 이온 평형 유지에 영향을 미친 것으로 추정되나 지속적인 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

<Table 8> Hematological analysis of yellow carp in HBFT-AP¹

Blood parameters	Experimental period (10 weeks)	
	Initial	Final
Average Fish weight (n=6)	634.12±28.96 ^{ns}	665.32±18.05
PCV (%) ²	27.45±3.16 [*]	36.26±2.47
Hb (g/dL) ³	12.19±0.74 [*]	14.52±1.23
GOT (U/L) ⁴	26.87±5.47 ^{ns}	28.50±4.35
GPT (U/L) ⁵	9.14±2.58 ^{ns}	11.34±3.98
GLU (mg/dL) ⁶	74.40±10.48 ^{ns}	84.12±14.05
Pi (mg/dL) ⁷	6.39±1.92 [*]	11.21±1.37
Na (mEq/L)	141.24±3.17 ^{ns}	142.12±2.14
K (mEq/L)	1.87±0.34 [*]	1.02±0.37
Cl (mEq/L)	139.24±1.82 ^{ns}	140.10±1.67

¹Values (means±SD of six individuals) with *superscripts in the same line are significantly different (P<0.05): HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics; ns, nonsignificant. ²Hematocrit. ³Hemoglobin. ⁴Glutamic oxaloacetic transaminase.

⁵Glutamic pyruvic transaminase. ⁶Glucose. ⁷Inorganic phosphorus.

국내 아쿠아포닉스 산업은 현재 도입 및 태동 시기로 고부가가치 산업화로 도약하기 위한 사료, 유용 미생물 및 시스템 등의 다양한 분야에서 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- 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.
- Bartelme RP, Oyserman BO, Blom JE, Sepulveda-Villet, OJ and Newton RJ(2018). Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. *Front Microbiol* 9, 1~7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008>.
- Emerenciano MGC, Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M and Miranda-Baeza A(2017). Biofloc technology(BFT) : A tool for water quality management in aquaculture. *INTECH*, 91~109. <http://dx.doi.org/10.5772/66416>.
- FAO(2014). Food and Agriculture Organization. Small-scale aquaponic food production integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and aquaculture technical paper 589, 1~19.
- Islam AKS, Edwards DG and Asher CJ(1980). pH optima for crop growth. *Plant Soil* 54, 339~357.
- Kim SR, Lee CR. and Lee SM(2006). Effects of dietary supplementation of Paprika and Spirulina on pigmentation of swiri *Coreoleuciscus splendidus*. *J Aquacult* 19, 261~266.
- Kim YO and Lee SM(2014). Effect of dietary carotenoids source on growth and skin color of red- and white-colored fancy carp *Cyprinus carpio* var. *koi*. *Kor J Fish Aquat Sci* 47(6), 790~795. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2014.0790>.
- Kim YO and Lee SM(2015). Influence of spirulina level in diet on skin color of red- and white-colored fancy carp *Cyprinus carpio* var. *koi*. *Journal of Fishiers and Marine Sciences Education* 27(2), 414~421. <http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.2.414>.
- Mariscal-Lagarda MM, Páez-Osuna F, Esquer-Méndez JL, Guerrero-Monroy I, Vivar AR and Félix-Gastelum R(2012). Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: management and production. *Aquaculture* 366, 76~84. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.09.003>.
- 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.
- Lee CR and Lee SM.(2008). Effect of dietary supplementation of pigment sources on pigmentation of the round tailed paradise fish *Macropodus chinensis* and pale chub *Zacco platypus*. J Aquacult 21, 213~217.
- Lee CR, Pham MA. and Lee SM.(2010). Effects of dietary paprika and lipid levels on growth and skin pigmentation of pale chub (*Zaccoplatus*). Asian-Aust J Anim Sci. 23, 724~732. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.90462>.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim JM, Shin SJ and Kim JD(2019a). 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(2), 159~172. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0159>.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim KB, Kim JM and Kim JD(2019b). Comparative study on growth and yield of far eastern catfish *Silurus asotus* and leafy vegetables grown in hybrid BFT-aquaponics, semi-RAS and hydroponics. Korean J Fish Aquat Sci. 52(5), 482~495. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0482>.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim KB, Kim JM, Hariati AM and Kim JD(2020). Effects of crude protein levels in diets containing MKP on water quality and the growth of Japanese eels *Anguilla japonica* and leafy vegetables in a hybrid BFT-aquaponic system. Korean J Fish Aquat Sci. 53(4), 606~619. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0606>.
- Purwono AR, Hibbaan M and Budihardjo MA(2017). Ammonia-nitrogen (NH₃-N) and ammonium-nitrogen (NH₄⁺-N) equilibrium on the process of removing nitrogen by using tubular plastic media. J Mater Environ Sci 8, 4915~4922. Retrieved from https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol8/vol8_NS/522-JMES-2876-Purwono.pdf. on October 10, 2018.
- Rakocy JE, Masser MP and Losordo TM(2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Retrieved from http://www.gem-stone.umd.edu/team-sites/classof2014/mega/documents/Rakocy_RAS.PDF on May 16, 2018.
- Rijn J(2013). Waste treatment in recirculation aquaculture systems. Aquac Eng 53, 49~56. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>.
- Robertson, LA, Van Niel EW, Torremans RA and Kuenen, JG. 1998. Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thisphaera pantotropha*. Appl Environ Microbiol 54, 2812~2813. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC204378/pdf/aem00116-0224.pdf>. on October 15, 2020.
- Thorarinsdottir RI(2015). Aquaponics guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33~39.
- Yep B and Zheng Y(2019). EAquaponic trends and challenges-A review. Journal of Cleaner Production 228, 1586~1599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>.
- Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Liang S, Wang J and Yan R(2016.) Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation. Environ. Sci Pollut Res 23, 6671~6679. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5898-0>.
-
- Received : 12 July, 2021
 - Revised : 27 August, 2021
 - Accepted : 02 September, 2021