

사료 내 일인산칼륨 수준이 Hybrid 바이오플락 아쿠아포닉 시스템 내 황쏘가리(*Siniperca scherzeri*) 및 엽채류 4종의 생산성과 수질변화에 미치는 영향

김동우 · 김진수* · 김정대* · 이상우** · 이동훈†
강원대학교(학생) · *강원대학교(교수) · **경기도해양수산자원연구소(소장) ·
†경기도해양수산자원연구소(연구사)

Effects of Dietary Monobasic Potassium Phosphate Levels on Water Quality and Growth of Gold Mandarin Fish, *Siniperca scherzeri* and Leafy Vegetables in a Hybrid BFT-Aquaponic System

Dong-Woo KIM · Jin-Soo KIM* · Jeong-Dae KIM* · Sang-Woo LEE** · Dong-Hoon LEE†
Kangwon National University(student) · *Kangwon National University(professor) ·
**Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(chief director) ·
†Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

This study investigated the effects of dietary monobasic potassium phosphate (MKP) on the growth of gold mandarin fish and four leafy vegetables in a hybrid biofloc technology aquaponic system (HBFT-AP). Fish were fed a type of a dough mixed with water and mash diet containing MKP (MKP 0.0%, 1.5% and 3.0%) for 8 weeks. The experiment was designed to stabilize water quality using diet without MKP for 1-4 weeks and examined the effect of the three diets on productivity of the fish and leafy vegetables in the HBFT-AP for 5-8 weeks. After the 8-week feeding trial, the growth factors of fish fed three diets were not significantly different ($P>0.05$), but hematological factors (hemoglobin, inorganic phosphorus and potassium) were significantly different ($P<0.05$). Inorganic nitrogen compounds and phosphate were measured six times a week using reagent measurements. The TAN (0.12-2.12 mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (9.0-23.7 mg/L) and $\text{PO}_4\text{-P}$ (6.12-25.80 mg/L) levels increased with time, while the $\text{NO}_2\text{-N}$ level remained below 0.1 mg/L. MKP 3.0% group had a higher leafy weight (g) in 3 kinds of cultivar (caipira, manchu perilla leaf, ezatrix) compared to those of other groups (MKP 0.0% and MKP 1.5%). The present results suggested that dietary MKP could improve growth of leafy vegetables in aquaponics.

Key words : *Siniperca scherzeri*, Monobasic potassium phosphate (MKP), Aquaponics, Vegetables, Hybrid biofloc technology (HBFT).

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

※ 본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농생명산업 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 118049-03-3-HD020).

I. 서론

쏘가리(mandarin fish)는 동아시아의 중국, 한국, 베트남에 주로 서식하며 상업적으로 이용성이 높은 내수면 어종으로 알려져 있다(Deng et al., 2010; Peng et al., 2020). 쏘가리는 단단한 육질을 가지고 있어 주로 회, 매운탕으로 소비되고 있으며, 다른 내수면 품종에 비해 고가로 유통되어 양식 전망성이 높은 품종이다. 2020년 기준으로 국내 쏘가리 생산량은 어로 생산이 134톤, 양식 생산은 3톤 정도로 다른 담수 어종에 비해 양식 생산량은 극히 미미한 실정(MOF, 2020), 이러한 이유는 쏘가리 어종 특성상 육식성이 아주 강하여 배합사료 순치가 쉽지 않기 때문이다. 현재 국내 대다수 쏘가리 양식장에서는 붕어, 빙어 등 소형 민물고기를 살아있는 형태 또는 냉동 보관하여 이를 공급하고 있다. 최근에는 충청북도 내수면산업연구소에서 쏘가리를 배합사료에 순치하는 기술을 개발하였으나(Kim, 2015) 국내 정착까지는 다소 시일이 소요될 것으로 사료된다. 황쏘가리는 쏘가리의 알비노(albino) 현상으로 생겨난 자연생태계의 돌연변이종으로, 한강의 황쏘가리는 현재 천연기념물 제190호로 지정되어 보호 받고 있다. 외형이 황금색으로 되어 있어 식용 외 관상 가치가 높아 일반 쏘가리와 더불어 향후 내수면의 유망 양식 대상 종으로 기대된다.

최근 기후변화에 따른 물 부족 현상 증가와 자연 수계의 영양염 및 오염 물질에 대한 환경 수용능력 저감으로 수산양식업(aquaculture)에서 발생하는 환경오염 문제에 대해 엄격한 규제를 적용하고 있으며(NIFS, 2013), 이와 함께 양식장 환경개선을 위한 직불제 도입, 인증기준 마련, 생태통합양식 활성화 및 오염원 관리 책임 규정 마련 및 강화 등 다양한 방안이 제시되고 있다(Ma et al., 2018). 현재 물의 사용량을 줄이며 지속적으로 양식이 가능하도록 하고, 이와 더불어 양식 생산성을 높이며 환경문제를 최소화하기 위한 친환경적인 양식 기술에 대한 요구가 증대되고 있

다. 이러한 양식방법으로 순환여과식양식(recirculating aquaculture system, RAS), 바이오플락 양식(biofloc technology, BFT), 아쿠아포닉스(aquaponics)가 대표적이다(Rakocy et al., 2006; Mariscal-Lagarda et al., 2012; Rijn, 2013; Avnimelech et al., 2015).

아쿠아포닉스는 수산양식(aquaculture)과 농업의 수경재배(hydroponics)가 결합된 복합 재배 시스템으로, 수산양식과 수경재배 생산 사이에 공유되는 자원을 활용하여 1차 생산물을 친환경적으로 지속 가능하게 생산하기 위한 방법으로 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 양어 수질의 안정화와 식물 성장을 이루어지게 하여 사육수의 교환없이 지속적으로 농·수산물을 생산할 수 있는 친환경 생산방법이다(Endut et al., 2010; Rakocy, 2012; FAO, 2014).

인(P)은 동물이나 식물의 성장, 번식 그리고 건강에 관련된 정상적인 생명현상 유지를 위한 필수 영양소의 하나이다. Lampila(2013)은 현재 이용하고 있는 인산염 종류에 있어 인산칼륨(potassium phosphates)이 인산칼슘과 인산나트륨에 비해 용해도가 높다고 하였으나, 현재 국내에 판매되고 있는 상업용 배합사료는 어종에 따라 일인산칼슘, 이인산칼슘, 삼인산칼슘을 다양하게 혼합하여 제조하고 있다. 현재 시판되는 상업용 배합사료의 경우 아쿠아포닉스에서 식물이 필요로 하는 13종류 영양소(N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Al) 중 9종류는 식물이 성장할 수 있는 적정량을 제공하나, P, Ca, K 및 Fe와 같은 영양소는 부족 현상이 발생되어 인위적으로 추가되고 있다(Bailey and Ferrarezi, 2017). Lee et al.(2019a,b)은 어류 양식에 사용되는 배합사료만으로 식물에 공급하는 영양소를 충당할 수 있도록 기존 상업용 사료에 사용되는 인 공급제(일인산칼슘, 이인산칼슘, 삼인산칼슘)를 일인

산칼륨(monobasic potassium phosphate, MKP)으로 대체하였고, 중속 및 독립영양미생물이 혼합된 유용미생물을 활용한 HBFT-AP (hybrid biofloc technology aquaponics) 생산 방식을 적용하여 아쿠아포닉스 운영 시 식물 생산성을 향상시켰음을 보고하였다.

따라서 본 연구의 목적은 국내 내수면 어종 중 식용 외 관상어 가치가 높아 향후 배합사료 순치 등 일부 기술 문제가 해결될 경우 유망 대상 품종으로 주목받을 수 있는 황쏘가리를 대상으로 일일산칼륨이 첨가된 사료의 공급 및 어류의 배설에 따른 사육수내 수질과 영양염 발생 경향을 조사하고, 식물생장에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험사료 준비 및 분석

실험에 사용된 3종류 사료(MKP 0.0%, MKP 1.5%, MKP 3.0%)는 상업용 시판 뱀장어 분말 사료 (Cargill Agri Purina Ltd., Seongnam, Korea)를 MKP가 첨가된 증류수와 일정 비율(2:1)로 혼합한 후 수제면 제조기(Sutaking MC-N186, HausElec Co. Ltd., Korea)를 이용하여 직경 8 mm, 길이 2-3 cm 크기로 절단하여 제작하여 사용하였다. 상업용 시판 뱀장어 분말 사료의 일반 성분[수분(moisture), 조단백질(crude protein), 조지방(crude lipid), 조회분(crude ash), 조섬유(crude fiber)], 광물질 및 수제면 제조기를 통해 제조된 3종의 실험 사료(MKP 0%, MKP 1.5%, MKP 3.0%)의 P와 K 성분은 부경대학교 사료영양연구소에서 분석되었다(<Table 1, 2>).

2. HBFT-AP (hybrid biofloc technology aquaponics) 시스템 구성

HBFT-AP 시스템은 Lee et al. (2019a, 2020) 이 진행한 메기와 뱀장어를 이용한 아쿠아포닉스 실

험과 동일한 시설로, 실험구는 어류 사육수조(1.5 m×1.5 m×0.6 m) 2개, 식물베드(1.5 m×1.5 m×0.1 m) 2개, 펌프(0.5 HP) 1개 및 바이오헬릭스 여과기 (Isan M Tech. Ltd., Hwaseong, Korea) 1개로 구성된 총 3개조의 실험구를 이용하였고, 아쿠아포닉 시스템 내 물 순환은 어류 사육수조, 섬프수조, 여과기, 식물베드지를 거쳐 다시 어류 사육수조로 순환되었다(Fig. 1). 식물베드 상단에는 광이 잘 투과되는 비닐을 설치하여 우천 시 대비하였다.

<Table 1> Chemical composition of commercial mash diet¹ for Japanese eel (as-is basis)

Composition	%
Moisture	8.22
Crude protein	59.07
Crude lipid	5.18
Crude ash	13.42
Crude fiber	0.40
Ca	2.72
Total phosphorus	1.85
Composition	ppm
Mg	2,788
Fe	490
Cu	16
Mn	38
Zn	410
K	5,295

¹Manufactured by Cargill Agri Purina Ltd., Korea.

<Table 2> Total phosphorus and potassium contents in the experimental diets¹

Composition	MKP 0.0%	MKP 1.5%	MKP 3.0%
Total phosphorus (%)	1.54	1.71	1.97
K (ppm)	3,900	5,800	8,200

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

사료 내 일인산칼륨 수준이 Hybrid 바이오플락 아쿠아포닉 시스템 내 황쏘가리(*Siniperca scherzeri*) 및 엽채류 4종의 생산성과 수질변화에 미치는 영향

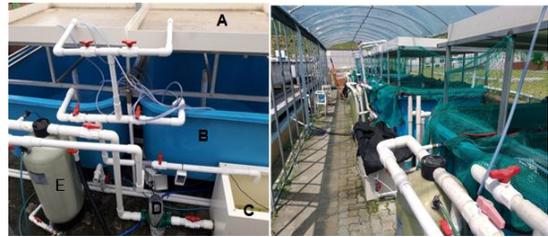
3. 실험어 배치 및 관리

황쏘가리(*Siniperca scherzeri*)는 경기도에 위치한 크로바수산(용인시)에서 180-250 g인 개체 45 kg을 구입한 후, 5개월간 뱀장어 분말 사료를 이용하여 펠릿 형태로 제작된 사료에 적응시켜 본 실험에 사용되었다. 구입된 황쏘가리는 개체간 어체중에 편차가 다소 있어 개체를 대, 중, 소로 나누는 후, 평균 어체중 230-235 g 범위를 설정하여 실험 수조에 배치하였다. 실험 수조 입식 전 24 h 절식한 후 어류의 체중 측정이 수행되었으며, 2반복 3개 실험구 6개 실험 수조에 평균 233 g 내외 개체 17마리가 각각 수용되었다. 실험 수조에 배치된 어류들은 스트레스에 따른 안정상태 유지를 위해 3일간 절식 되었고, 실험어 배치 4일 후부터 기존 사양 관리에 사용된 사료가 1-4 주 동안 공급되었고, 식물 입식 후부터 MKP(0.0%, 1.5% 및 3.0%)가 첨가된 실험 사료가 5-8주 동안 공급되었다. 사료 공급은 미섭취 사료에 의한 수중 영양염 및 식물생산성의 오차 배제를 위해 어체중 당 0.5%로 제한하여 1일 1회 공급하였다. 각 실험수조에서 4주간의 수질 안정화 기간과 4주간 본 실험을 진행하였으며, 총 8주간의 실험 종료 후 어체중을 측정하였다.

4. HBFT-AP (hybrid biofloc technology aquaponics) 엽채류 생산

엽채류 생산 실험은 어류를 입식하여 4주간의 적응기간을 거친 후, 5-8주에 걸쳐 진행하였다. 본 실험에 사용된 엽채류는 상추(*Lactuca sativa*) 품종 중 카이피라(caipira), 이자트릭스(ezatrix) 및 버터헤드(butterhead)와 만추잎들깨(Manchu, *Perilla frutescens*) 4품종으로, 경기도농업기술원 육묘용 온실에서 육묘한 개체를 입식하여 사용하였다. 엽채류는 각 실험구별 109 개체가 입식되었으며, 품종별 카이피라 26개, 만추잎들깨 28개, 이자트릭스 28개 및 버터헤드 27개씩 입식되었다. 엽채류의 성장 사진 촬영은 1주 간격으로 수행하였

다. 실험 종료 후 성장을 측정하였고, 측정된 시점은 오전 일출 후 바로 실시하였다.



[Fig. 1] Compartments of the experimental design (left). (A) two vegetable beds(L 1.5×W 1.5 m×H 0.6 m per bed), (B) two fish rearing tanks(L 1.5 m×W 1.5 m×H 0.6 m per tank), (C) sump tank, (D) pump (0.5HP), (E) biohelix filter tank (80 L). Water flow, (A)→(B)→(C)→(D)→(E)→(A). Three experimental groups were composed of two replicates each (right). Lee et al. (2019a; 2020).

5. 시료측정

본 실험의 엽채류 측정은 각 실험구별 모든 개체의 엽수(No), 엽채 무게(g), 뿌리 무게(g) 및 엽채 길이(cm)를 세분화하여 측정하였으나, 이자트릭스(Exatrix)의 경우 엽수의 분화가 불명확하여 엽수 측정이 수행되지 않았다. 어체중 측정은 실험어를 24 시간 사료 절식 후, 어류마취제인 clove oil (C8392-100ml, Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA) 50 ppm으로 마취하여 1마리씩 개별 측정하였다.

6. 수질관리

현재 실험의 수질 관리는 Lee et al.(2019a,b; 2020)이 보고한 수질관리 방법에 준하여 실시하였으며, 기초 환경인 수온은 23℃, 용존산소(dissolved oxygen, DO)는 8.0 mg/L 이상으로 유지되었다. 1-4주 기간은 수질 안정화 및 어류 예비 적응기간으로, 어류 수용과 함께 유용미생물 10종(*Bacillus subtilis*, *B. amuloliquefaciens*, *B.*

licheniformis, *Cellulomonas* sp., *Cellulomonas biazotea*, *Pseudomonas stutzeri*, *P. denitrificans*, *Rhodopseudomonas palustris*, *Nitrobacter winogradskyi* 및 *Nitrosomonas europaea*의 혼합 시판 제품 BFT-ST(EgeeTech, Ltd., Irvine, CA, USA) 3.8 L를 섬프수조에 투입하였다. 실험 시작 2주간은 Emerenciano et al. (2017)의 방법에 따라 수중의 TAN 발생 농도에 맞추어 유기탄소원인 정제 포도당을 계산한 후 C:N(6:1)비를 맞추어 섬프수조에 공급하였다. 실험 3주 시점부터 유기탄소의 공급을 중단하고, 무기탄소원으로 CO₂(탄산가스)를 1주일간 각 실험구별 섬프수조에 연속하여 투입하였다. 또한, 실험 개시 4주차에 NO₂-N 수치 감소가 지연됨에 따라 질산화세균(*Nitobacter* spp. 및 *Nitrosomonas* spp.)이 혼합된 시판제품 Eco-Nit (EgeeTech Ltd., Irvine, CA, USA) 3.8 L를 섬프수조에 투입하였다. CO₂의 공급 중단은 엽채류 입식 후 pH의 급격한 하강에 따라 5주 후부터 중단하였으며, pH 5.5 이하로 떨어질 경우 굴패각으로 가공된 폐화석 비료(Hae Gwang Co., Goseong, Korea) 3kg을 20 L 물에 24 h 동안 우려내어 각 수조당 0.5 L 씩 첨가하여 pH 5.5-6.0 범위를 유지하고자 하였다.

7. 수질분석

수질 측정은 1주 6회 진행하였으며, 수온(°C), 용존산소(DO, mg/L), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC; μ s/cm), 탁도(Turbidity; NTU), TAN (NH₃+NH₄⁺) (mg/L), NO₂-N (mg/L), NO₃-N (mg/L) 및 PO₄-P (mg/L)를 측정하였다. 수온, DO, pH, EC 및 탁도는 수질측정기인 YSI PRODSS (YSI Inc., Yellow spring, Ohio, USA)를 이용하여 측정하였다. TAN (mg/L), NO₂-N (mg/L), NO₃-N (mg/L) 및 PO₄-P (mg/L)은 분석시약(NitraVer[®]X Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia Reagent Set 2604545-KR, NitraVer[®]3 Reagent Set 2608345-KR, PhosVer[®]3 Phosphater Reagent, HACH Ltd., Loveland, CO, USA)과 다목적 수질

측정기인 DR6000 (HACH Ltd., Loveland, CO, USA)을 이용하여 비색법으로 측정하였다. 식물 입식을 기점(5-8주)으로 2일, 19일 및 종료 후 익일 시점(27일)에 각 실험구별 사육수 내 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, MA, USA)를 이용하였으며, Cl (mg/L) 및 SO₄ (mg/L)는 이온크로마토그래피(930 Comact IC Flex, Metrohm Co., Herisau, Switzerland)를 이용하여 분석하였다.

8. 혈액분석

8주간의 어류 사육 실험 종료 후, 각 실험구의 쏘가리 혈액성상 분석을 위하여 24시간의 절식을 진행하였다. 절식 후 어류마취제인 clove oil (C8392-100 mL, Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA)를 이용하여 50 ppm 농도로 마취시킨 다음 헤파린(Heparin sodium salt from porcine intestinal mucosa, K3333-10KU, Sigma-Aldrich., Darmstadt, Germany)을 처리한 5 cc 주사기를 사용하여 실험구별 4마리의 개체에 대해 미부정맥에서 채혈하였다. 수집된 혈액 샘플 중 전혈(whole blood)은 hemoglobin (Hb, g/dL)과 hematocrit (PCV, %) 분석에 사용하였고, 이후 원심분리기(Centrifuge 5415 R, Eppendorf Ltd., Hamburg, Germany)에서 4°C, 12,000 rpm, 10분간의 조건이 설정하여 혈장(plasma)을 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., Tuttlingen, Germany)을 이용하였으며, Hb 등 다른 혈액 요소는 시판되는 임상진단키트(Fuji DRI-CHEM slide, Fuji photo film co.

사료 내 일인산칼륨 수준이 Hybrid 바이오플락 아쿠아포닉 시스템 내 황쏘가리(*Siniperca scherzeri*) 및 엽채류 4종의 생산성과 수질변화에 미치는 영향

Ltd., Tokyo, Japan)와 혈액분석기(DRI-CHEM 3500 I, Fujifilm Ltd., Tokyo, Japan)를 이용하여 분석하였다.

9. 통계분석

8주간의 어류의 성장 실험에서 얻어진 각 실험 구별(MKP 0.0%, MKP 1.5%, MKP3.0%) 개시 어체중, 종료 어체중 및 성장 항목(비만도, 증체율, 사료효율, 일간성장률, 단백질이용효율, 일간사료 섭취율 및 생존율)과 4주간(5-8주)의 엽채류의 성장 항목(엽수, 엽중량, 엽채길이)은 SPSS Version

10 프로그램의 일원분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 분석하였다. 통계분석의 유의수준은 5% ($P<0.05$)에서 결정되었다. 어류 및 엽채류 성장 항목 각 변수에 대한 유의차가 발견되었을 시, Duncan's multiple range test 분석을 이용하여 사후검정을 실시하였다(Duncan, 1955).

III. 결과 및 고찰

HBFT-AP 시스템에서 8주간 사육된 황쏘가리의 성장 결과는 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Growth performance of gold mandarin fish (*Siniperca scherzeri*) fed the experimental diets in HBFT-AP for 8 weeks¹

Growth performance	Diets			P-value
	MKP 0.0%	MKP 1.5%	MKP 3.0%	
Initial average weight of total fish (g)	231.9±37.9 ^{ns}	232.6±61.5	235.0±59.8	0.964
Final average weight of total fish (g)	257.3±61.5 ^{ns}	258.4±52.7	263.2±40.6	0.884
Initial average length of total fish (cm)	26.6±1.4 ^{ns}	26.5±2.0	26.4±2.4	0.896
Final average length of total fish (cm)	26.8±2.1 ^{ns}	26.8±1.8	26.9±1.4	0.961
Initial average CF ² of total fish (cm)	12.2±0.8 ^{ns}	12.4±1.0	12.6±1.9	0.419
Final average CF of total fish (cm)	13.2±1.9 ^{ns}	13.3±1.1	13.4±1.0	0.771
Feed intake(g, DM)	1,071	1,071	1,073	
WG (%) ³	10.97±0.98 ^{ns}	11.09±0.38	12.00±0.32	0.359
FE (%) ⁴	40.35±3.11 ^{ns}	40.92±0.88	44.65±0.51	0.184
SGR (%/d) ⁵	0.21±0.02 ^{ns}	0.21±0.01	0.23±0.01	0.385
PER ⁶	0.73±0.06 ^{ns}	0.77±0.03	0.81±0.01	0.422
DFI (%/d) ⁷	0.52±0.00 ^{ns}	0.51±0.01	0.51±0.01	0.270
Survival rate (%) ⁸	100 ^{ns}	100	100	

¹Values [values of fish weight (g) and fish length (cm) represent means ± SD of two replicate individuals. CF, WG, FE, SGR, PER, DFI and survival rate represent means ± SE of two replicate individuals] with ns superscripts are not significant ($P>0.05$).

²Condition factor = [fish body weight (g) / fish body length (cm)³] × 100.

³Weight gain (%) = [final weight (g) - initial weight (g)] × 100 / initial weight (g).

⁴Feed efficiency (%) = wet weight gain (g) / dry feed intake × 100.

⁵Specific growth rate (%/d) = (Ln final weight (g) - Ln initial weight (g)) / experimental days × 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) / 2] / experimental days × 100.

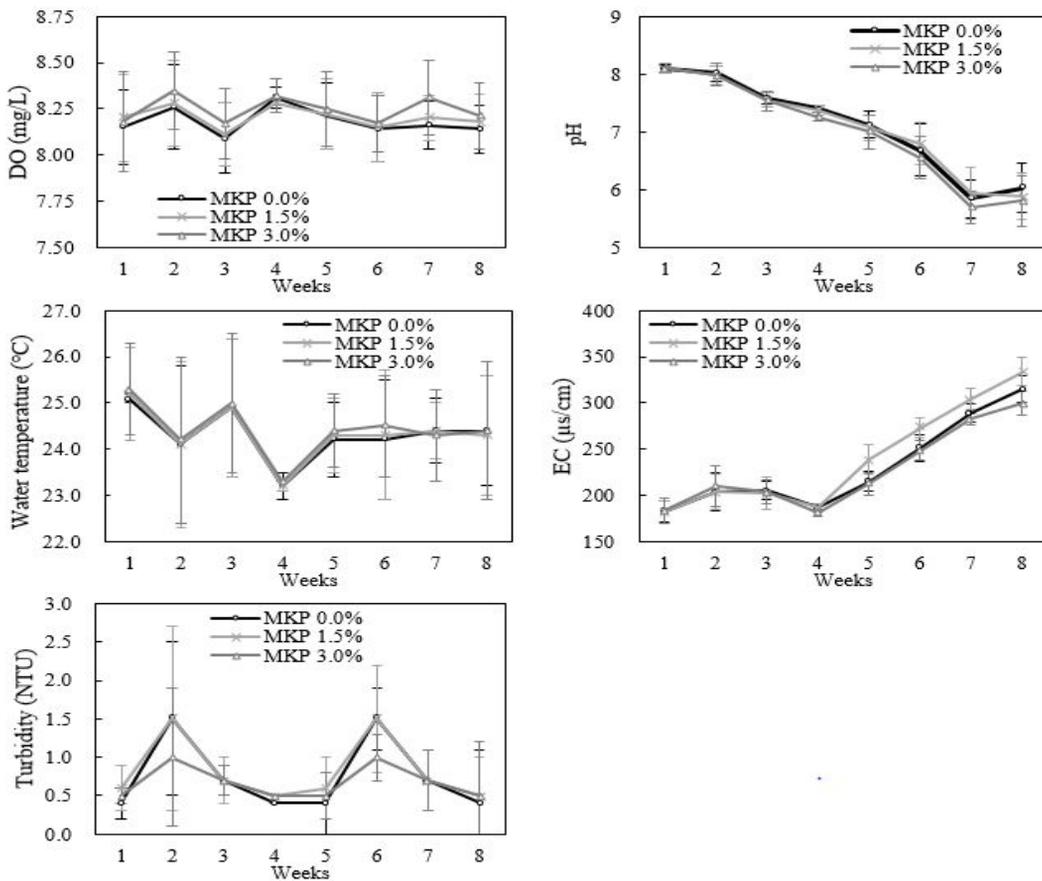
⁸Survival rate (%) = final fish number / initial fish number × 100.

HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. MKP, monobasic potassium phosphate

실험 종료 후, 비만도(condition factor, CF), 증체율(weight gain, WG), 사료효율(feed efficiency, FE), 일간성장률(specific growth rate, SGR), 단백질이용효율(protein efficiency ratio, PER), 일간사료섭취율(daily feed intake, DFI) 및 생존율(Survival rate)에서 실험구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다($P>0.05$). 쏘가리는 강한 육식성의 어종 특성으로 배합사료 순치가 매우 힘들어 양식 생산량이 다른 내수면 양식어종에 비해 극히 낮은 편이나 향후 국내 쏘가리 양식 증대를 통한 산업화 정착을 위해 사료 개발 분야에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Kim and Lee, 2016; Kim and Lee, 2017; Kim et al., 2020). 본 실험에 사

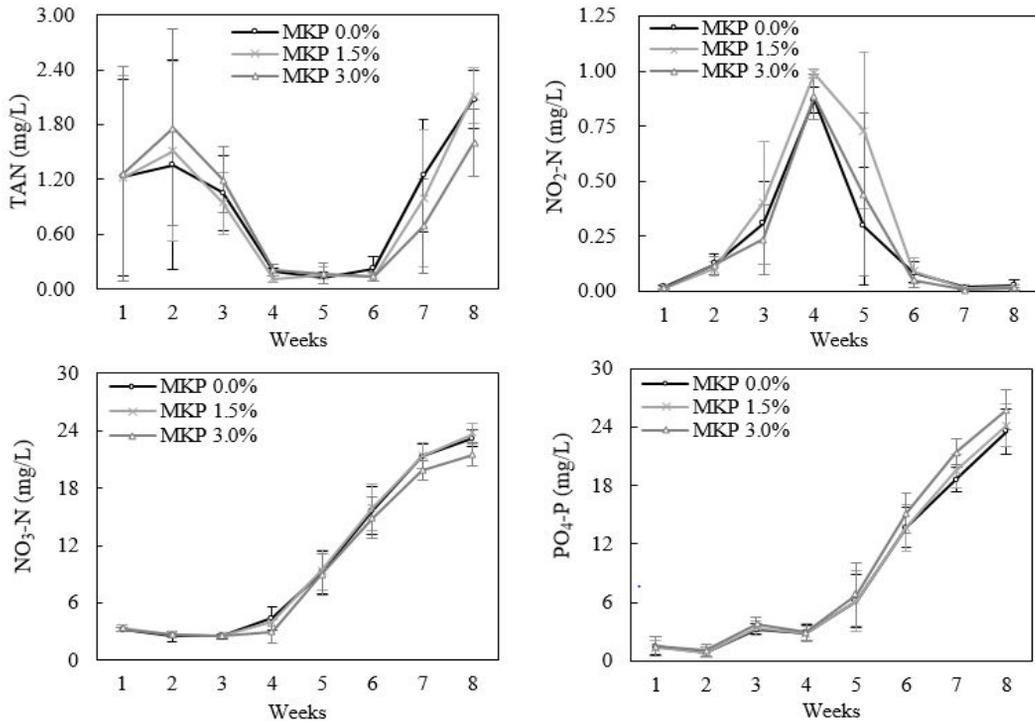
용된 황쏘가리의 경우 냉동 빙어에 순치된 개체로, 어류 구입 후 뱀장어 분말사료를 성형한 사료를 1주간은 먹지 않았으나, 이후 섭식하는 개체가 나타나 2주내 완전 순치가 되었다. Lee et al. (2019a)는 메기를 이용한 HBFT-AP 생산 실험에서 사료 내 MKP를 달리 첨가(1, 2, 3, 4%)한 결과 2% 및 3% 첨가구에서 메기 성장이 유의하게 높은 값을 나타내었으나, 본 실험에서는 뱀장어 분말사료 내 MKP 첨가 농도에 관계 없이 유의적인 성장 차이가 나타나지 않은 결과를 보였다.

HBFT-AP 시스템 운영기간(1-8주) 동안 수질을 조사한 결과는 [Fig. 2]와 [Fig. 3]에 나타내었다.



[Fig. 2] Change of water quality (DO; dissolved oxygen, pH, water temperature, EC; electric conductivity and turbidity) in HBFT-AP for 8 weeks.

사료 내 일인산칼륨 수준이 Hybrid 바이오플라크 아쿠아포닉 시스템 내 황쏘가리(*Siniperca scherzeri*) 및 열채류 4종의 생산성과 수질변화에 미치는 영향



[Fig. 3] Change of water quality (TAN; total ammonium nitrogen, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in HBFT-AP for 8 weeks.

각 수질 항목에 대해(DO, pH, water temperature, EC, turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P) 3개 실험구(MKP 0.0%, MKP 1.5%, MKP 3.0%) 사이는 모두 유사한 증감 패턴을 나타내었으나, 각 항목별 증감 양상은 달랐다. 실험기간 동안 측정된 1주간 평균값은 DO의 경우 8.09-8.32 mg/L, 수온은 23.2-25.3℃, 탁도는 0.4-1.5 NTU 값을 보였다. 주간 평균값은 증감을 반복하는 양상을 나타내고 있으며, 수온의 경우 4주에 감소 폭이 큰 이유는 이 기간에 우천 및 흐린 날씨가 지속되어 기온이 낮았기 때문이다. pH 평균값은 BFT 유지 기간(1-2주) 동안 7.99-8.10의 값을 보였으나, 실험 3주부터 유기탄소를 중단하고 CO₂ 가스를 공급한 결과 지속적으로 감소되었다. EC 평균값은 181.7-334.0 μs/cm로 5주부터 지속적인 증가경향을 보였으나, 4주 기간에 감소된 이유는 이 기간에 NO₂-N 값이

급속히 증가하여 각 실험구별 전체 수량 3톤에서 1톤의 부분 환수가 이루어졌기 때문이다. TAN, NO₂-N, NO₃-N 및 PO₄-P 평균값은 0.11-2.12 mg/L, 0.011-0.988 mg/L, 2.5-23.7 mg/L, 0.83-25.80 mg/L의 값을 보였다.

TAN은 1-4주간 감소한 후 4-6주간은 일정한 값을 유지하다가 pH 5.5-6.0 범위가 지속되는 6주 이후부터 다시 증가하는 경향을 나타내었다. NO₂-N은 1-4주간 지속적인 증가 이후 감소하기 시작하여 pH가 급속히 하강하는 6주부터는 0.1 mg/L 이하의 값을 보였다. NO₃-N은 1-4주간은 증감 없이 일정하게 유지된 후 5주부터 지속적인 증가를 보였다. 및 PO₄-P는 BFT 유지 기간(1-2주) 동안은 감소한 후, 유기탄소 중단에 따라 서서히 증가하였다. 특히 pH가 급속히 하강하는 5-6주간 이후 PO₄-P 농도는 지속적으로 상승되는 경향을 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 저 pH 상태에서는 독립영양세균의 질산화 능력은 급격히 감소하고 종속영양세균이 질산화과정을 담당한 결과로 보고하였다. Robertson et al.(1988)은 종속영양세균인 *T. pantotropha*의 질산화과정은 독립영양세균의 질산화과정과 달리 NH₄⁺가 NO₂-N의 중간단계 없이 NO₃-N으로 직접 산화됨을 증명하였다. 본 실험에서도 5-8주 기간의 수질 변화(Fig. 3))를 살펴보면 TAN 및 NO₃-N은 지속적으로 상승하나 NO₂-N은 0.1 mg/L 이하로 유지되었는데, 이 기간의 저 산성 유지 상태와 외부의 유기탄소 공급이

없는 점을 감안하면 종속영양세균의 질산화과정에 따른 수질 변화로 추정할 수 있을 것이다. 또한 현재 실험의 모든 실험구에서 실험 6주 후부터 암모니아 농도가 상승하였음에도 황쏘가리가 사료섭취 및 생존에 변화가 없었던 것은 대다수 암모니아가 저 pH상태에서 비이온화된 암모니아보다 이온화된 암모늄(NH₄⁺-N) 형태로 전환(Purwono et al., 2017)되어 암모니아의 독성이 억제됐기 때문이라 사료된다.

HBFT-AP에서 5-8주간의 엽채류 생산 결과는 <Table 4>와 같다. 엽채류 4종(카이피라, 만추갯잎, 이자트릭스, 버터헤드)의 생산성은 MKP 3.0% 실험구에서 양호하게 나타났다.

<Table 4> Growth of four leafy vegetables in HBFT-AP for 26 days¹

Species	Growth factor	Diet			P-value
		MKP 0.0%	MKP 1.5%	MKP 3.0%	
Caipira lettuce <i>Lactuca sativa</i>	Leaf No.	27.0±4.1 ^{ns}	27.7±3.8	27.4±4.8	0.826
	Leaf weight (g)	98.5±21.6 ^{ab}	94.7±25.4 ^b	112.0±20.1 ^a	0.018
	Root mean weight (g)	6.5±1.5 ^{ns}	6.9±1.6	7.2±2.0	0.412
	Leaf length (cm)	17.5±0.9 ^{ns}	16.8±1.9	17.4±1.2	0.177
Manchu perilla leafy <i>Perilla frutescens</i>	Leaf No.	46.9±8.8 ^{ab}	49.9±8.9 ^a	42.0±8.3 ^b	0.004
	Leaf weight (g)	48.2±13.5 ^b	52.1±16.3 ^b	64.6±22.4 ^a	0.002
	Root mean weight (g)	20.1±6.9 ^b	19.4±5.9 ^b	34.5±32.4 ^a	0.006
	Leaf length (cm)	38.7±4.5 ^{ns}	38.8±4.9	41.4±5.6	0.083
Ezatrix <i>Lactuca sativa</i>	Leaf weight (g)	39.6±9.4 ^b	34.9±7.9 ^b	55.8±21.4 ^a	<0.001
	Root mean weight (g)	4.0±1.2 ^b	3.8±1.4 ^b	5.4±2.0 ^a	<0.001
	Leaf length (cm)	13.8±1.3 ^b	14.6±1.1 ^{ab}	15.1±1.7 ^a	0.002
Butterhead lettuce <i>Lactuca sativa</i>	Leaf No.	34.9±3.5 ^{ns}	33.1±3.8	32.5±3.9	0.053
	Leaf weight (g)	79.6±20.1 ^{ns}	76.2±13.6	85.4±20.1	0.178
	Root mean weight (g)	6.2±1.1 ^b	5.7±0.9 ^{ab}	6.6±1.5 ^a	0.013
	Leaf length (cm)	13.0±1.1 ^{ns}	13.3±0.8	13.0±1.1	0.345

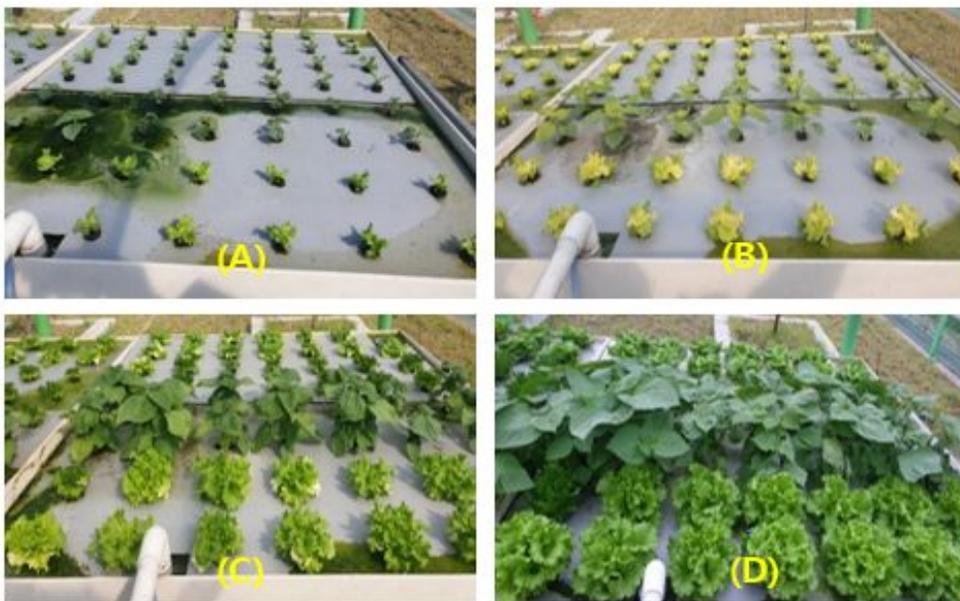
¹Values (means ± SD of individuals) with different superscripts in the same line are significantly different (P<0.05); ns, nonsignificant (P>0.05); HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics. MKP, monobasic potassium phosphate.

사료 내 일인산칼륨 수준이 Hybrid 바이오플락 아쿠아포닉 시스템 내 황쏘가리(*Siniperca scherzeri*) 및 엽채류 4종의 생산성과 수질변화에 미치는 영향

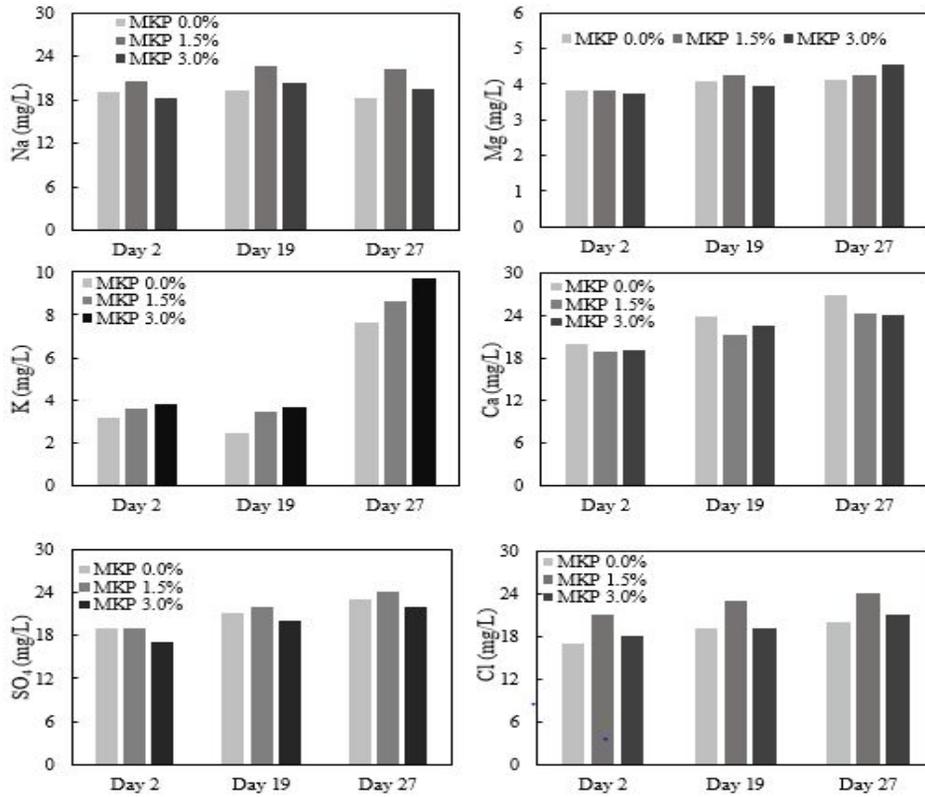
<Table 4>의 결과를 살펴보면, 카이피라의 경우 엽중량은 MKP 3.0% 실험구가 유의적으로 높은 성장이 나타났으나($P<0.05$), 엽수, 뿌리 무게 및 엽채 길이에서는 유의한 차이가 없었다($P>0.05$). 만주깻잎의 경우 MKP 3.0% 실험구가 엽수에서 다른 실험구(MKP 0%, MKP 1.5%)에 비해 낮은 값을 나타내었으나, 엽중량 및 엽채 길이에서는 유의적인 높은 값을 보였다($P<0.05$). 이자트릭스는 MKP 3.0% 실험구가 모든 성장요인에서 유의적인 높은 값을 나타내었으며($P<0.05$), 버터헤드는 뿌리 무게를 제외하고 모든 실험구에서 유의한 차이를 보이지 않았다($P>0.05$). 수산생물과 식물이 함께 양식 및 재배되는 아쿠아포닉스 시스템에서는 양 쪽의 수질 환경을 생물학적 한계 내 적정 범위로 유지하는 것은 중요하며(FAO, 2014), 특히 pH는 식물 성장에 있어 가장 중요한 요소 중 하나로 식물의 영양염(macro nutrient 및 micro nutrient) 흡수 능력에 직접적으로 영향을 미친다(FAO, 2014). 본 연

구에서 pH는 유기탄소를 중단하고 무기탄소원인 CO_2 를 공급한 3주부터 지속적으로 감소하여 실험 7주부터는 모든 실험구에서 6.0 내외의 값을 나타내었다. 엽채류 4종 모두 입식 초기 황백화 현상과 낮은 성장을 보였으나 pH가 감소함에 따라 엽채색은 정상으로 회복되는 것을 볼 수 있으며, 성장도 향상되고 있음을 확인할 수 있다([Fig. 4]).

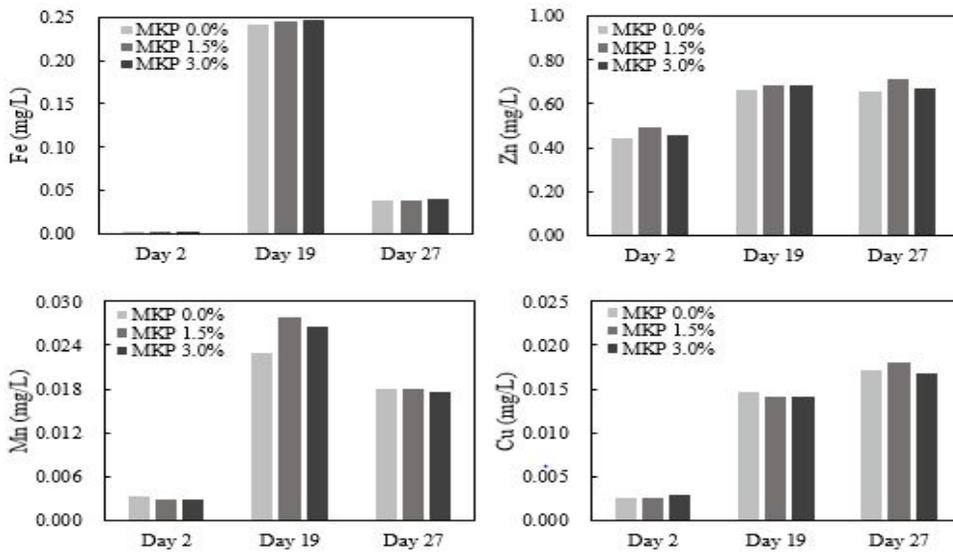
엽채류 성장 기간(5-8주) 동안 HBFT-AP 시스템 내 영양염(Na, Mg, K, Ca, SO_4 , Cl, Fe, Zn, Mn 및 Cu) 분석 결과는 [Fig. 5, 6]에 나타내었다. 다량광물질(macro nutrient) 6종 중 K는 엽채류 생산 시험 종료 후(8주) 초기(5주)에 비해 시스템 내 농도가 3배 이상 상승한 반면 나머지 5종은 증감 폭이 적음을 볼 수 있다([Fig. 5]). 미량광물질 Fe 및 Mn은 pH 6.0 범위에서 유지되는 7주에 농도가 올라간 후 감소하는 경향을 나타내었고, Zn 및 Cu는 실험 종료까지 서서히 증가되는 경향을 보였다([Fig. 6]).



[Fig. 4] Growth of four leafy vegetables in HBFT-AP during 5-8 weeks. (A) 1st week, (B) 2nd week, (C) 3rd week, (D) 4th week



[Fig. 5] Changes of macro nutrient concentrations in HBFT-AP 2, 19 and 27 days after transplanting leafy vegetables.



[Fig. 6] Changes of micro nutrient concentrations in HBFT-AP 2, 19 and 27 days after transplanting leafy vegetables.

K는 식물 건강과 발달에 중요한 역할을 하는 필수 영양소로 식물 세포 사이의 신호 전달 및 성장에 사용되며, 뿌리 발달, 줄기 강도, 종자 발달 및 꽃 또는 과일 성장을 포함하여 성장을 조절할 수 있다. 결핍 시 식물은 성장이 둔화되고 뿌리 발달이 불충분하고 곤충이나 질병에 대한 저항력이 떨어지며, 특히 시각적으로 잎이 노랗고, 갈색으로 변하거나 가장자리가 타거나 갈색 또는 자주색 반점이 생길 수 있다고 하였다(Thorarinsdottir, 2015). 이러한 결과는 pH와 더불어 사육수 내 K는 Lee et al. (2019a, 2019b)이 보고한 HBFT-AP 엽채류 생산성에 중요 요소로 지목한 미량 원소인 Fe와 더불어 가장 중요한 영양소 중 하나임을 다시 한번 상기시키는 중요한 증거로 볼 수 있다.

Thorarinsdottir(2015)은 아쿠아포닉 시스템 내에서 Fe는 엽록체와 전자전달 사슬에 이용되는 미량원소로 광합성에 있어 매우 중요한 제한 요소로 작용하며 Fe 부족 시 잎과 식물 전반에 황색으로 변하며 결국 괴사하게 되므로 인위적인 첨가가 필요하다고 하였다. Mn은 Fe와 함께 엽록체의 전자전달 사슬에 이용되는 미량원소로 많은 조효소를 형성한다. 또한 뿌리 세포의 확장과 병원균에 대한 저항성을 가지게 하며, 결핍 시 정맥 사이 부위가 함몰하는 것을 제외하고 Fe와 같은 증상을 보인다(Maucieri et al., 2019). 아쿠아포닉스 시스템 내 Fe와 Mn 부족 시 현재까지 킬레이트 철(Fe)과 $MnSO_4$ 를 용액 형태로 보충하고 있으나, pH를 낮추어 가용성을 높이는 방안도 제안되고 있다(Sonneveld and Voogt, 2009). pH는 수중의 C, N 사이클 외 Fe, Mn 및 S의 무기물화 과정에 영향을 미치며, 낮은 pH에서는 식물이 이용할 수 있는 Fe^{2+} 및 Mn^{2+} 형태로 환원이 잘 일어난다(Soetaert et al., 2007)

본 실험에서 6주 후부터 pH가 6.5 이하로 하강하였고([Fig. 4]), 이에 따라 HBFT-AP 시스템 내 Fe와 Mn의 농도도 상승하여 엽채류 입식 후 2일(실험 5주 기간)에 측정된 Fe 및 Mn의 농도에 비

해 19일 농도가 급격히 상승하였으며, 또한 7-8주 기간에 엽채류의 채색이 정상화([Fig. 3]) 된 것을 감안하면 이들 미량원소의 흡수가 잘 일어났음을 알 수 있다. 결과적으로 엽채류 입식 후 19일 측정된 Fe 및 Mn의 농도는 실험 종료 시 감소된 것을 볼 수 있다([Fig. 6]). 더불어 엽채류의 영양 흡수 과정에서 K는 앞서 언급한 Fe 및 Mn 미량원소의 흡수능력을 높이는 시너지 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Maucieri et al., 2019). 이러한 이유로 HBFT-AP 시스템 내 K 농도가 가장 높은 MKP 3.0% 실험구에서 엽채류 성장이 가장 양호하였던 것으로 사료된다.

HBFT-AP 에서 8주간의 어류 사육실험 종료 후, 24시간 사료 절식을 진행한 후, 황쏘가리의 혈액을 분석한 결과는 <Table 5>와 같다.

사료내 MKP 농도를 달리하여 HBFT-AP 시스템에서 사육된 황쏘가리의 혈액학적 특징 중 가장 두드러지는 것은 전혈 부분의 Hb (g/dL)와 혈장 내 Pi (mg/dL) 및 K (mEq/L) 요소이다(<Table 5>). Lee et al. (2019a,b, 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 MKP 3.0% 실험구에서 다른 2 실험구(MKP 0.0%, MKP 1.5%)에 비해 높은 값을 나타내었다. 이러한 이유는 PCV와 Hb의 두 항목은 주로 어체 내 산소 운반 능력과 영양학적 빈혈의 판단이 되는 지표로, 폐쇄된 환경의 저 pH 상태에서 황쏘가리의 생체 대사과정에 필요한 산소 운반 능력을 증대시키기 위해 환경에 적응된 결과라 사료된다. Pi와 K의 경우 사료 내 높은 MKP 함량은 혈액에 다소 축적됨을 알 수 있으며, MKP 첨가 실험구(MKP 1.5%, MKP3.0%)의 경우 미첨가 실험구(MKP 0.0%)에 비해 사육수 내 높은 PO_4-P 및 K 농도를 유지하고 있어 체내 삼투현상 유지에는 문제가 없을 것으로 사료되나 향후 추가 연구가 필요할 것이다.

<Table 5> Hematological analysis of gold mandarin fish (*Siniperca scherzeri*) fed the experimental diets in HBFT-AP for 8 weeks¹

Blood parameters	Diet			p-value
	MKP 0.0%	MKP 1.5%	MKP 3.0%	
Average Fish weight (n=4)	265.53±9.8 ^{ns}	267.43±4.74	256.65±10.43	0.229
PCV (Hematocrit) (%) ²	42.00±2.94 ^{ns}	46.50±2.89	45.75±4.79	0.228
Hb (g/dL) ³	11.30±0.37 ^b	11.75±0.29 ^b	12.63±0.40 ^a	0.002
GOT (U/L) ⁴	35.75±7.89 ^{ns}	34.50±5.57	36.75±6.24	0.892
GPT (U/L) ⁵	14.00±2.94 ^{ns}	13.00±3.16	16.00±4.40	0.505
ALB (g/dL) ⁶	0.90±0.18 ^{ns}	0.98±0.15	0.98±0.22	0.811
GLU (mg/dL) ⁷	78.75±8.26 ^{ns}	78.50±3.70	75.00±5.48	0.639
Pi (mg/dL) ⁸	9.50±0.55 ^c	11.88±0.40 ^b	12.93±0.46 ^a	<0.001
Na (mEq/L)	129.75±2.22 ^{ns}	131.25±2.22	130.50±1.73	0.608
K (mEq/L)	5.90±0.70 ^c	8.75±0.74 ^b	12.48±1.62 ^a	<0.001
Cl (mEq/L)	77.50±3.42 ^{ns}	80.50±3.11	81.00±4.69	0.408

¹Values (means ± SD of four individuals) with different superscripts in the same line are significantly different (P<0.05); ns = nonsignificant.

²PCV, packed cell volume. ³Hemoglobin. ⁴Glutamic oxaloacetic transaminase. ⁵Glutamic pyruvic transaminase.

⁶Albumin. ⁷Glucose. ⁸Inorganic phosphorus. HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics.

국내 일반적인 쏘가리의 혈장 조성 중 GOT (U/L)는 18.5-131.5, GPT (U/L)는 4.0-7.7, ALB은 (g/dL) 0.5-0.7 범위의 값을 나타낸다고 알려져 있으며, 사육 조건인 수온(Kim and Lee, 2016), 사육밀도(Lee and Kim, 2017) 및 사료공급 횟수(Kim et al., 2020)에 따라서도 혈액 값의 편차가 있음이 보고되고 있다. 이러한 이유는 혈액 샘플 수집 시 어류의 마취 시간, 어류 취급방법, 혈액 채취 시간 등이 결국 어체의 스트레스 등에 영향을 미쳐 혈액 분석치를 변화시키는 것으로 추정할 수 있다. 본 실험에서도 개체간 혈액 분석치는 다소 편차가 존재하나 이전 연구 결과에서 언급한 GOT, GPT, ALB의 값과 비교 시 GPT, ALB는 다소 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다 (<Table 5>). 본 실험의 경우 사육 환경의 pH 조건(pH 6.0 내외)을 감안한다면 현재 황쏘가리는 일반적인 쏘가리 사육방법에 비해 다소 스트레스적인 요소로 작용할 수 있음을 추측할 수 있으나 향후 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

본 실험 결과에서 사료 내 MKP수준에 따라 아쿠아포닉스에서 생산되는 엽채류의 성장은 차이를 나타내었으며, 또한 사육수 내 pH가 6.0 범위에서 유지될 경우 엽채류 성장을 위해 인위적인 추가 영양염 투입은 필요하지 않을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 현재까지 무환수 양식 방법에서 지속적으로 감소되는 pH를 상승시키기 위해서는 중탄산(HCO₃⁻) 및 수산화(OH⁻) 계열의 약품을 사용하고 있으나 이는 어업 비용의 상승으로 이어질 수 있으므로, 수중의 CO₂를 쉽게 제거할 수 있는 양식용 탈가스 장치(degas machine)의 개발이 필요할 것으로 사료된다. 또한 사육수 내 pH 자동 측정기를 도입하고 이와 연계되어 CO₂ 공급 및 제거 장치를 도입한다면 스마트한 HBFT-AP 생산이 이루어질 것으로 사료된다.

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.
- Bailey DS and Ferrarezi RS(2017). Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. *Aquaculture Reports* 7, 77~82.
<https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002>.
- Deng Y, Zhao J, Lu G, Wu X and Tao Y(2010). Cloning, characterization and expression of the pepsinogen C from the golden mandarin fish *Siniperca scherzeri* (Teleostei: Perciformes). *Fisheries Science*, 76, 819~826.
<https://doi.org/10.1007/s12562-010-0275-x>.
- Duncan DB(1955). Multiple range and multiple 'F' tests. *Biometrics* 11, 1~42.
<http://garfield.library.upenn.edu/classics1977/A1977DM02600001.pdf>.
- 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>.
- Endut A, Jusoh A, Ali N, Nik WBW and Hassan A(2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresour Technol* 101, 1511~1517.
<https://doi:10.1016/j.biortech.2009.09.040>.
- 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.
- Kim YO(2015). The study aquaculture of *Siniperca scherzeri*. The research report of Chungcheongbuk-do Inland Fisheries Research Institute, Munhwa Publishing Co., Chungju, Korea, 7~15.
- Kim YO and Lee SM(2016). Effect of water temperature on growth and body composition of juvenile mandarin fish *Siniperca scherzeri*. *Korean J Fish Aquat Sci* 49, 607~611.
<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0607>.
- Kim YO and Lee SM(2017). Growth and body composition of mandarin fish, *Siniperca scherzeri* reared at high water temperature. *Korean J Fish Aquat Sci* 50, 756~761.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0756>.
- Kim YO, Oh SY and Lee SM(2020). Influence of different feeding frequency on the growth and body composition of juvenile mandarin fish *Siniperca scherzeri* reared in a recirculating aquaculture system (RAS). *Korean J Fish Aquat Sci* 53, 538~543.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0538>.
- Lampila LE(2013). Applications and functions of food-grade phosphates. *Ann NY Acad Sci* 1301, 37~44.
<https://doi.org/10.1111/nyas.12230>.
- Lee SM and Kim YO(2017). Effect of Stocking Density on the Growth and Body Composition of the Mandarin Fish *Siniperca scherzeri*. *Korean J Fish Aquat Sci* 50, 762~769.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0762>.
- 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, 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, 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, 606~619.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0606>.
- Ma CM, Lee SC, Kim SI and Yun MG(2018). A Study on Environmental Improvements of Aquaculture Farms. The research report of Korea maritime institute, Hyomin D&P Publishing Co., Busan, Korea, 113~140.
- 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>.
- Maucieri C, Nicoletto C, Os EV, Anseeuw D, Havermaet RV and Junge R(2019). Chapter 4 hydroponic technologies. In: *Aquaponics food production systems*. Goddek S, Joyce A, Kotzen B and Burnell GM. eds. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 77~110.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4.
- MOF(2020). Ministry of Oceans and Fisheries. Fisheries statistics. Retrieved from <https://www.fips.go.kr/p/S020304/on> January 03, 2021.
- NIFS(2013). National Institute of Fisheries Science. 2012 FAO world fisheries trends. In: Myeong JI, Min BH, Park NB, Park MS, Park JJ, Shin YK, Lee KA, Lee JH, Jeon JC and Hwang HG. eds. Hanguel Graphic, Busan, Korea, 194~205.
- Peng M, Zhu W, Zeng D, Yang C and Chen X(2020). The complete mitochondrial genome of *Siniperca fortis* (Perciformes: Sinipercaidae). *Mitochondrial DNA Part B Resources*, 5, 1857~1858.
<https://doi.org/10.1080/23802359.2020.1750997>.
- 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.
- Rakocy JE(2012). "Chapter 14: aquaponics-integrating fish and plant culture," in *Aquaculture Production Systems 1st Edn* ed. Tidwell J. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons;) 343~386.
<https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch14>.
- 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.
- Soetaert K, Hofmann AF and Middelburg JJ.(2007). The effect of biogeochemical processes on pH. *Marine Chemistry* 105, 30~51.
<https://doi:10.1016/j.marchem.2006.12.012>.
- Sonneveld C and Voogt W(2009). Plant nutrition in future greenhouse production. In: *Plant nutrition of greenhouse crops*. Sonneveld C and Voogt C. eds. Springer. 393~403.
https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_17.
- Thorarinsdottir RI. 2015. *Aquaponics Guidelines*. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland., 33~39. ISBN: 978-9935-9283-1-3.

-
- Received : 28 May, 2021
 - Revised : 23 June, 2021
 - Accepted : 01 July, 2021