

HBFT-아쿠아포닉 시스템 내 독립 및 종속 미생물의 적용에 따른 시베리아 철갑상어 (*Acipenser baerii*), 바질 (*Ocimum basilicum*) 및 엽채류 4종류의 성장과 수질변화

이 동 훈[†][†]경기도해양수산자원연구소(연구사)

Water Quality Change and Growth of Siberian Sturgeon (*Acipenser baerii*), Basil (*Ocimum basilicum*) and 4 Types of Leafy Vegetables through the Application of Auto- and Heterotrophic Microorganisms in the HBFT Aquaponic system

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 water quality changes and growth of fish (siberian sturgeon) and leafy vegetables (basil and four leafy vegetables) through the use of nitrifying autotrophic bacteria alone (Auto+CO₂) and the mixed use of heterotrophic and autotrophic microorganism (Hetero+HBFT) in operation of aquaponic system. After basil stocking (5-8 weeks) in EXP1, Auto+CO₂ experimental groups showed rapid water quality stabilization for about 2 weeks compared to Hetero+HBFT groups, but the latter groups showed significantly higher growth of both fish and basil ($P < 0.05$). In EXP2 (9-12 weeks), the growth factors of fish and 4 kinds of european lettuce cultivars in Hetero+HBFT experimental groups were higher than Auto+CO₂ groups. In hematological analysis [hematocrit (PCV, %), hemoglobin (g/dL), GOT (U/L), GPT (U/L), ALB (g/dL), GLU (mg/dL), plasma Na, K, Cl (mEq/L) and inorganic phosphorus (mg/dL)] between two experimental groups, all items were not significantly different at the end of the experimental period ($P > 0.05$). This study shows that for aquaponics water quality management, it is more effective to use it in combination with heterotrophic bacteria rather than autotrophic bacteria alone to stabilize water quality.

Key words : Aquaponics, Basil, Lettuce cultivars, Microorganism, Siberian sturgeon.

I. 서론

철갑상어는 백악기 시대부터 현존하는 고대 원시 어류로 북반구의 중위도 이북(유럽, 아시아, 북미 등)의 하천, 기수지역 및 바다에 분포하고

있으며, 1목 2과 26종이 서식하고 있다 (Hochleithner and Gessner, 1999). 국내 철갑상어 양식은 1996년부터 시작되었으며, 주요 대상종은 스텔렛 철갑상어 (*Acipenser ruthenus*), 시베리아 철갑상어 (*A. baerii*), 러시아 철갑상어 (*A.*

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

gueldenstaedti), 잡종 생산된 베스테르 (*beluga female × sterlet male*) 등이 있다(Lee et al., 2012). 2020년도 12월 기준 국내 철갑상어 생산량은 33톤으로, 뱀장어 양식생산량인 9,681톤, 무지개송어 2,414톤, 메기 3,833톤에 비해서는 매우 적은 편이다(MOF, 2022).

국내 철갑상어의 경우 CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora) 품목으로 지정된(1998년) 후, 환경부의 법적 제재(양도·양수, 폐사·질병신고 대상)하에서 판매·유통관리되어 기존 양식업을 영위하는 어업인의 사업 중단이 지속되어 왔고, 신규 창업을 도전하는 사람도 감소 되었으며, 이에 따라 생산량 감소로 이어졌다. 그러나 2021년도에 환경부고시 「양도·양수, 폐사·질병신고 제외대상 국제적 멸종위종」의 개정에 따라 철갑상어도 신고 제외 대상에 들어가게 되어 향후 국내 철갑상어 양식산업 발전에 긍정적 요인으로 작용할 것으로 전망되고 있다.

시베리아 철갑상어의 양식은 1997년 국립수산과학원 소속 양양 내수면연구소에서 처음 도입하였으며, 이후 각 지자체 연구소 및 민간 양식장에서 사육하여 현재는 국내 철갑상어의 주종을 이루고 있으며, 타 철갑상어 품종에 비해 종묘생산과 사육이 용이하고, 비교적 짧은 기간에 성숙이 이루어져 캐비어 생산에도 유리하다(Park 2018).

물의 사용량을 줄이며 지속적으로 양식이 가능하도록 하고, 이와 더불어 양식 생산성을 높이며 환경문제를 최소화하기 위한 친환경적인 양식 기술에 대한 증대 요구가 이어져 오고 있다. 현재까지 수산양식에서 사육수의 재순환을 통한 양식 방법으로 recirculating aquaculture system (RAS)와 biofloc technology (BFT)가 대표적이다(FAO, 1986; Avnimelech et al., 2015).

국내 새우 양식 방법을 개선하고 향상된 기술을 지속적으로 보급하기 위한 BFT 기술 적용은 2003년부터 적용되기 시작하여 외부로부터 질병

유입을 예방하고 생산량도 기존 축제식 방식에 비해 20배 이상 향상되는 효과를 보였다(NIFS, 2018). 이는 바이오플락을 이루는 미생물들이 수중에서 발생하는 독성 암모니아, 아질산을 제거하여 사육수 수질정화 효과를 증대시키고, 양식 생물의 보조 먹이로 이용되면서 양식 대상 종의 성장과 면역력 향상에 효과를 주기 때문이라 하였다(Kim et al., 2014). 그러나 최근에는 RAS가 초기 시설비 및 유지 비용은 BFT에 비해 높지만 생산성의 안정화와 수질관리에서 유리하여 규모화 할수록 생산량 증대가 높아 이러한 이유로 세계적 무환수 양식 생산방법의 추세가 BFT에서 다시 RAS 생산방법으로 전환되고 있다(Ray et al., 2016).

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 안전한 농·수산물을 생산할 수 있는 친환경 생산방법이다(FAO, 2014).

Lee et al.(2019a,b)은 어류 양식에 사용되는 배합사료만으로 식물에 공급하는 영양소를 충당할 수 있도록 기존 상업용 사료에 사용되는 인첨가제(일인산칼슘, 이인산칼슘, 삼인산칼슘)를 일인산칼륨(monobasic potassium phosphate, MKP)으로 대체하여 메기를 활용하여 아쿠아포닉스 생산에 이용하였으며, 종속 및 독립영양미생물이 혼합된 유용미생물을 활용한 hybrid biofloc technology aquaponics (HBFT-AP) 생산 방식을 적용하여 아쿠아포닉스 운영 시 식물 생산성을 향상시켰음을 보고하였다. 또한 같은 실험방법으로 적용된 황쏘가리(Kim et al., 2021), 뱀장어(Lee and Kim, 2021), 비단잉어(Lee, 2021)에서도 업체류 생산향상에 효과가 있음을 보고하였다.

현재 아쿠아포닉스 연구분야에서 생산성이 수경재배에 비해 떨어지지 않는 이유는 식물성장 촉진 미생물(PGPM, plant growth promoting microorganism)의 역할로 설명되고 있으며(Yep and Zheng, 2019), 특히 아쿠아포닉스내 유용미생물은 엽채류의 황백화 현상에 깊게 관여하는 Fe 등 부족한 미량원소의 활용성을 개선시키는 것으로 보고되고 있어 주기적으로 미생물 첨가가 추천되고 있다(Zou et al., 2016; Bartelme et al., 2018).

따라서 본 연구는 철갑상어를 이용한 아쿠아포닉스 생산에서 초기 수질 안정화를 위해 사용되는 유용미생물 중 질산화 독립영양세균 단독 사용과 종속영양세균과 질산화 독립영양세균의 혼합사용에 대한 어류 및 엽채류의 성장효과에 대해 조사하고, 향후 아쿠아포닉스 전용 미생물 개발에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험사료 준비 및 분석

실험에 사용된 사료는 상업용 시판 해산어 사료 (Cargill Agri Purina Ltd., Korea) 7호(직경 5-6 mm)로, 사료의 일반 성분[수분(moisture), 조단백질(crude protein), 조지방(crude lipid), 조회분(crude ash), 조섬유(crude fiber)] 및 광물질 성분(Ca, P, K, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn)은 부경대학교 사료영양 연구소에 의뢰하여 분석하였다(<Table 1>).

2. 시스템 구성 및 운영

본 실험의 아쿠아포닉 시스템은 Lee et al. (2019a, 2020) 이 진행한 메기와 뱀장어를 이용한 아쿠아포닉스 실험시설 중 식물베드와 주배수관을 보수한 시설로(Fig. 1), 1 set의 실험구는 어류 사육수조(1.5 m × 1.5 m × 0.6 m) 2개, 식물베드 (L 5.2 m × W 1.5 m × H 0.4 m) 2개, 선프수조(L 0.5 m × W 0.7 m × H 0.4 m) 및 바이오

<Table 1> Proximate and mineral composition (as-is basis) of the experimental diets¹

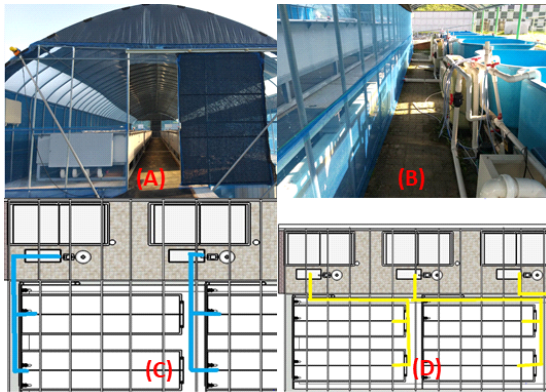
Composition	%
Moisture	2.92
Crude protein	53.31
Crude lipid	9.79
Crude ash	13.42
Crude fiber	0.94
Ca	3.66
P	2.00
K	0.73
Mg	0.20
Fe	0.05
Zn	0.04
Composition	ppm
Cu	24.62
Mn	46.09

¹Manufactured by Cargill Agri Purina Ltd., Korea.

헬릭스 여과기(Isan M Tech. Ltd., Hwaseong, Korea) 1개로 구성되었고, 총 4개조의 실험 시설을 이용하였다. 아쿠아포닉 시스템 내 물 순환은 2원화된 순환 흐름으로 어류의 경우 어류 사육수조, 선프수조, 여과기를 거쳐 어류 사육수조로 다시 순환되는 형태이며, 식물의 경우 선프수조, 여과기, 식물베드를 거쳐 선프수조로 순환되는 구조로 구성되었다(Fig. 1). 식물베드의 측면에는 유해 곤충의 침입방지를 위해 모기망이 설치되었다. 또한, 상부에는 광이 잘 투과되는 비닐을 설치하여 우천 시 대비하였고, 여름철 폭염기 및 성장 측정 시 식물의 수분감소 방지를 위해 차광막 개폐장치도 설치하여 운영되었다.

3. 실험어 배치 및 관리

시베리아 철갑상어(*Acipenser baerii*)는 경기도 해양수산연구소에서 자체 인공치어 생산 후 양성



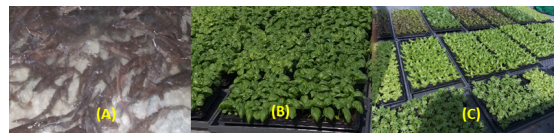
[Fig. 1] Compartments and water flow of the experimental design. (A) aquaponics plant culture building (L 5.2 × W 1.5 m × H 0.4 m per bed), (B) fish rearing tanks (L 1.5 m × W 1.5 m × H 0.6 m per tank), (C) vegetable beds injection water flow chart, (D) vegetable beds drainage water flow chart.

한 개체로([Fig. 2]), 각 실험구별 수조당 650-800 g인 개체 16마리를 수용하였다. 시베리아 철갑상어는 개체간 어체중에 편차가 다소 있어 개체를 대, 중, 소로 나눈 후, 평균 어체중 740-745 g 범위를 설정하여 실험 수조에 배치하였다. 실험 수조 입식 전 24 h 절식한 후 어류의 체중 측정이 수행되었으며, 4반복 2개 실험구(Auto+CO₂구, Hetero+HBFT구) 8개 실험 수조에 각각 수용되었다. 실험 수조에 배치된 어류들은 스트레스에 따른 안정상태 유지를 위해 2일간 절식 되었고, 실험어 배치 3일 후부터 기존 사양 관리에 사용된 상업용 시판사료가 공급되었다. 사료 공급은 미접취 사료에 의한 수중 영양염 및 식물생산성의 오차 배제를 위해 어체중 당 0.5% 이내로 제한하여 1일 1회 공급하였다. 각 실험수조에서 4주간의 수질 안정화 기간과 8주간 본 실험을 진행하였으며, 최종 어체중 측정은 12주에 수행되었다.

4. 엽채류 생산

엽채류 생산 실험은 어류를 입식하여 4주간의

적응기간을 거친 후, 5-12주에 걸쳐 2회 생산실험을 진행하였다. 엽채류 생산 실험1(EXP1)은 바질(*Ocimum basilicum*)을 이용하였고, 생산 실험 2(EXP2)는 유럽산 상추류(*Lactuca sativa*) 4품종 [오비레드(ovired lettuce), 페어리(fairly lettuce), 이자벨(ezabel lettuce), 샤로마(xaroma lettuce)]을 선택하여 이용하였다([Fig. 2]). 엽채류는 품종당 284개체가 입식되었으며, 엽채류의 성장 사진 촬영은 1주 간격으로 수행하였다. 입식 후 4주 뒤 성장을 측정하였고, 측정된 시점은 오전 일출 후 바로 실시하였다.



[Fig. 2] Fish and leafy vegetables used in the experiment. (A) siberian sturgeon (*Acipenser baerii*), (B) basil (*Ocimum basilicum*), (C) four cultivars of european leafy vegetables.

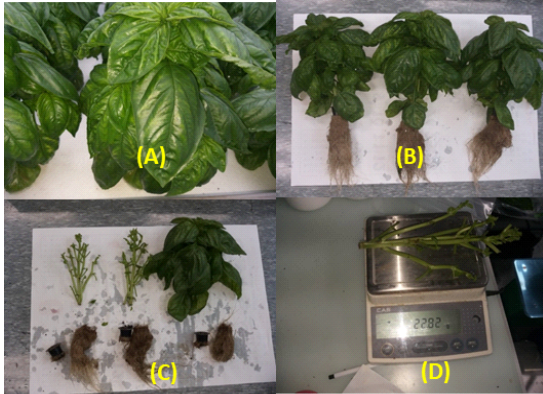
5. 시료측정

본 실험에서 EXP1의 바질 측정은 각 실험구별 40 개체의 엽수(No), 엽채 무게(g), 뿌리 무게(g) 및 줄기 무게(g)를 세분하여 측정하였고([Fig. 3]), EXP2의 유럽산 상추류 4품종은 품종별 뿌리 부분을 제외한 전체 엽채 무게(g)와 뿌리 무게(g)를 측정하여 총무게(g)를 산출하였다([Fig. 4]). 어체중 측정은 EXP1 및 EXP2 실험 종료 시점에 실험어를 24 h 사료 절식한 후, 어류마취제인 clove oil (C8392-100ml, Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA) 50 ppm으로 마취하여 각 수조별 총어체 중량을 측정하였다.

6. 수질관리

현재 실험에서 Hetero+HBFT 실험구의 수질 관리에 Lee et al.(2019a,b; 2020)이 보고한 수질관리 방법에 준하여 실시하였다. 어류 수용과 함께

HBFT-아쿠아포닉 시스템 내 독립 및 종속 미생물의 적용에 따른 시베리아 철갑상어 (*Acipenser baerii*), 바질 (*Ocimum basilicum*) 및 엽채류 4종류의 성장과 수질변화



[Fig. 3] Growth measurement of basil (*Ocimum basilicum*) in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 5-8 weeks. (A) Basil grown in the field for 4 weeks, (B) Whole view of basil, (C) Separation of basil for growth measurement, (D) The weight of basil stem per one individual during 4 weeks experiment period.



[Fig. 4] Growth measurement of four leafy vegetables in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 9-12 weeks. (A) Four leafy vegetables grown for 4 weeks, (B) Weighing leafy vegetables excluding the root part

유용미생물 10종(*Bacillus subtilis*, *B. amuloliquefaciens*, *B. licheniformis*, *Cellulomonas sp.*, *Cellulomonas biazotea*, *Pseudomonas stutzeri*, *P. denitrificans*, *Rhodospseudomonas palustris*, *Nitrobacter winogradskyi* 및 *Nitrosomonas europaea*)의 혼합 시판 제품 BFT-ST(EgeeTech, Ltd., Irvine, CA, USA) 3.8 L를 선프수조에 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 선프수조에 공급하였다. 실험 3주 시점부터 유기탄소의 공급을 중단하고, 무기탄소원으로 CO₂(탄산가스)를 2주일간 선프수조에 연속하여 투입한 후, pH 7.0 이하에서 공급을 중단하였다. Auto+CO₂ 실험구는 어류 입식 2주 전 독립영양미생물 2종(*Nitrosomonas europaea*, *Nitrobacter winogradskyi*)이 혼합된 시판제품 Eco-Nit (EgeeTech Ltd., Irvine, CA, USA) 7.6 L를 선프수조에 투입하였고, 어류 입식과 더불어 CO₂의 공급이 이루어졌으나, 실험 3주 후부터 pH 수치가 6.5이하로 하강함에 따라 CO₂의 공급을 중단하였다. Auto+CO₂구 및 Hetero+HBFT구 모두 실험 6주부터 pH 6.0 내외의 값을 나타냄에 따라 6.0±0.2 범위에서 수질을 유지하기 위해 격일로 KOH (Samchun Ltd., Pyeongtaek, Korea) 25 g 및 Ca(OH)₂ (Samchun Ltd., Pyeongtaek, Korea) 15 g 을 선프수조에 투입하여 관리되었다.

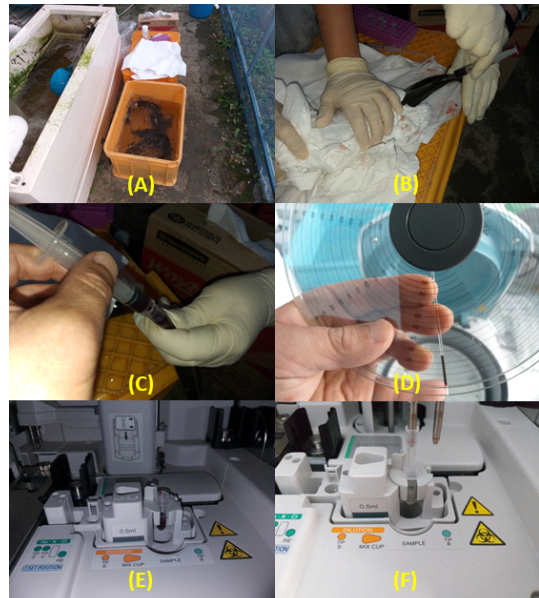
7. 수질분석

수질 측정은 1주 6회 진행하였으며, 수온(°C), 용존산소(DO, mg/L), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC; $\mu\text{s/cm}$), 탁도(Turbidity; NTU), TAN ($\text{NH}_3^+\text{NH}_4^+$) (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. EXP1 및 EXP2 실험 종료 시점의 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) 분석은 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

12주간의 어류 사육 실험 종료 후, 각 실험구의 시베리아 철갑상어 혈액성상 분석을 위하여 24시간의 절식을 진행하였다(Fig. 5). 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. Ltd., Tokyo, Japan)와 혈액분석기(DRI-CHEM NX500 I, Fujifilm Ltd., Tokyo, Japan)를 이용하여 분석하였다.



[Fig. 5] Blood analysis of siberian sturgeon in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT groups). (A) Siberian sturgeon anesthesia operation, (B) Blood sampling at the fish caudal arrhythmia, (C) Blood sample collection (1.5 mL) (D) Hematocrit analysis, (E) Hemoglobin analysis using whole blood, (F) Blood plasma analysis.

Ⅲ. 결과 및 고찰

실험구(Auto+CO₂구, Hetero+HBFT구)별 12주간 사육된 시베리아 철갑상어의 성장 결과는 <Table 2>와 같다. Hetero+HBFT 실험구에서 증체율(weight gain, WG), 사료효율(feed efficiency, FE) 및 일간성장률(specific growth rate, SGR)이 Auto+CO₂ 실험구에 비해 유의적 높은 값을 보였으나(P<0.05), 생존율(Survival rate)은 2 실험구 간 유의적인 차이가 없었다(P>0.05).

어류 입식 후부터 수질 안정화 기간(1-4주)과 염채류 성장실험 EXP1(5-8주) 및 EXP2(9-12주)의 기간 동안 수질을 조사한 결과는 [Fig. 6, 7, 8, 9]

에 나타내었다.

<Table 2> Growth performance of siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) reared in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 12 weeks (EXP2)¹

Growth performance	Culture method	
	Auto+CO ₂ -(A,B)	Hetero+HBFT -(A,B)
Initial average weight of total fish (g)	744.4±5.3	743.8±9.7ns
Final average weight of total fish (g)	1,001.6±15.8	1,037.9±14.5*
WG (%) ²	34.6±3.1	39.5±0.5*
FE (%) ³	58.9±4.9	66.1±3.7*
SGR (%) ⁴	0.35±0.03	0.40±0.01*
Survival rate (%) ⁵	100	100ns

¹Values (means ± SE of four replicate tank) with * letters in the same row are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).

²Weight gain (%) = [final weight (g) - initial weight (g)] × 100 / initial weight (g).

³Feed efficiency (%) = wet weight gain (g) / dry feed intake × 100.

⁴Specific growth rate (%/d) = (Ln final weight (g) - Ln initial weight (g)) / experimental days × 100.

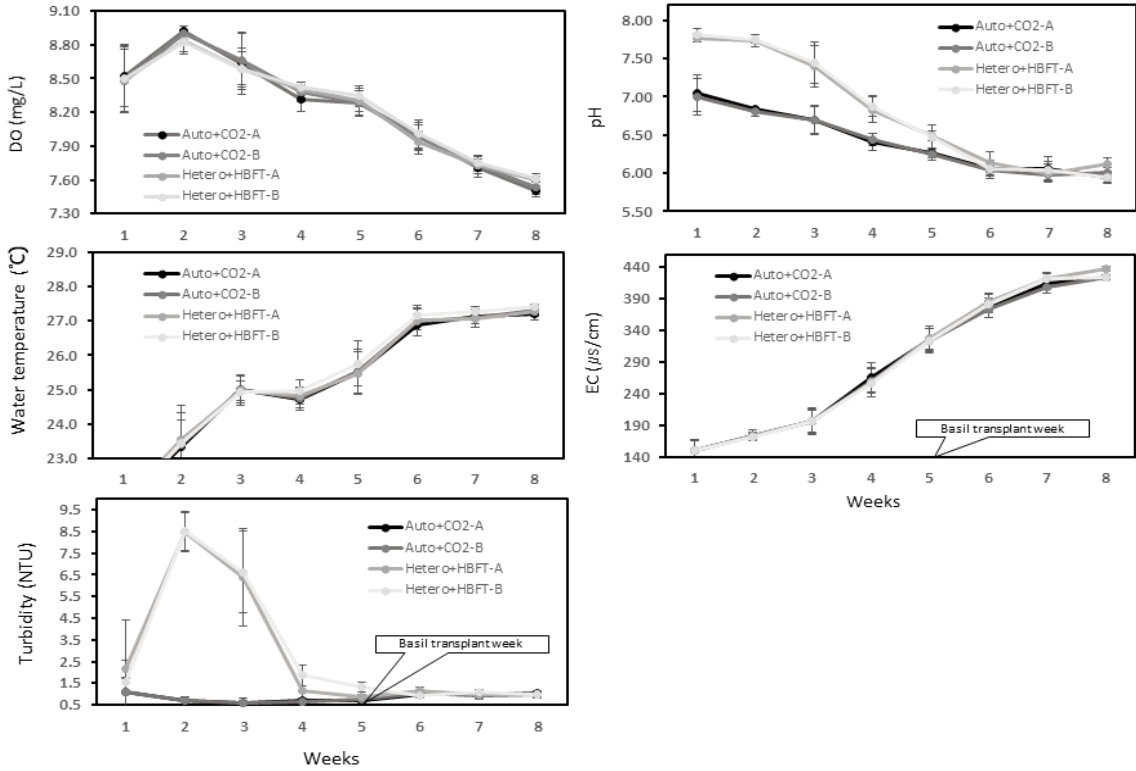
⁵Survival rate (%) = final fish number / initial fish number × 100.

HBFT-AP, hybrid biofloc technology-aquaponics.

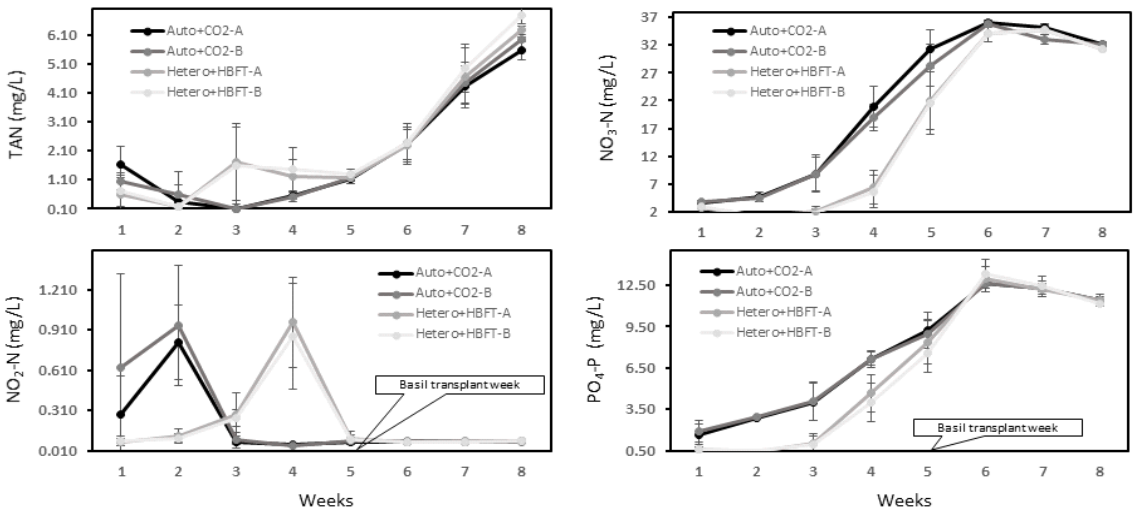
수질 안정화 기간부터 바질 입식에 따른 EXP1 실험 기간의 각 수질 항목(DO, pH, water temperature, EC, turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P)에 대해 분석한 결과 2개 실험구(Auto+CO₂ 구, Hetero+HBFT구) 사이에서 DO, 수온, EC 항목은 유사한 경향을 보였으나, 나머지 6항목은 차이를 나타내었다. 탁도의 경우 Hetero+HBFT구는 초기 BFT 수질 기술 적용에 따라 탁도가 2주까지 꾸준히 증가하였으나, 이후 유기탄소 중단과 무기탄소 CO₂의 공급에 따라 종속영양세균의 증식속도가 감소하여 탁도 수치가 낮아지기 시작하여 바질 입식 후 5주부터는 Auto+CO₂구와 유사

한 범위를 보였다. pH도 탁도의 경우와 같이 유사한 경향을 보였는데, 종속영양세균의 우점화된 Hetero+HBFT구의 경우 초기 2주 동안 pH의 변화성이 거의 없었으나 3주 시점부터 감소하기 시작하여 실험 6주부터는 Auto+CO₂구와 유사한 범위를 보였다. TAN (mg/L)와 NO₂-N (mg/L)의 경우 초기 1-2주 기간 동안은 Auto+CO₂구에서 Hetero+HBFT구에 비해 높은 값을 보였으나, 실험 3주 시점에는 낮은 값을 나타내었다. 실험 4주 시점에서 Auto+CO₂구의 TAN는 다시 상승하였고, Hetero+HBFT구의 TAN는 실험 3주부터 5주까지는 1.0-2.5 mg/L의 범위에서 다소 증감을 반복하다가 실험 6주부터는 Auto+CO₂구와 같이 상승하기 시작하였다. Auto+CO₂구의 NO₂-N는 Hetero+HBFT구에 비해 2주 정도 0.1 mg/L 이하 값을 갖는 안정화 기간이 단축되었고, 실험 5주 시점에서는 2 실험구 모두 0.1 mg/L 이하 값을 유지하였다. NO₂-N (mg/L)와 PO₄-P (mg/L)의 경우 Auto+CO₂구가 Hetero+HBFT구에 비해 실험 초기부터 실험 6주까지는 높은 값을 나타내었으나, 이후부터 유사한 범위의 값을 보였다.

유립산 상추 4품종을 입식한 EXP2 실험 기간의 각 수질 항목(DO, pH, water temperature, EC, turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N 및 PO₄-P)에 대해 분석한 결과, 2개 실험구(Auto+CO₂구, Hetero+HBFT구) 사이에서 질소화합물인 TAN, NO₂-N 및 NO₃-N를 제외한 6항목은 유사한 경향을 보였다. DO는 여름철 고수온(Auto+CO₂구 29.1℃, Hetero+HBFT구 29.2℃)의 지속에 따라 9주에 비해 12주에 감소되었고, 특히 Hetero+HBFT구의 감소 폭이 높았는데, 이러한 이유는 종속영양세균의 호흡 활동이 Auto+CO₂구의 우점화된 질산화세균에 비해 높았음을 추정할 수 있다. 또한 탁도의 경우도 Hetero+HBFT구가 Auto+CO₂구에 비해 낮은 값을 유지하였으며, 이 역시 종속영양세균의 유기물 분해 활동이 Auto+CO₂구에 높아 탁도를 감소시켰음을 유추할 수 있다.

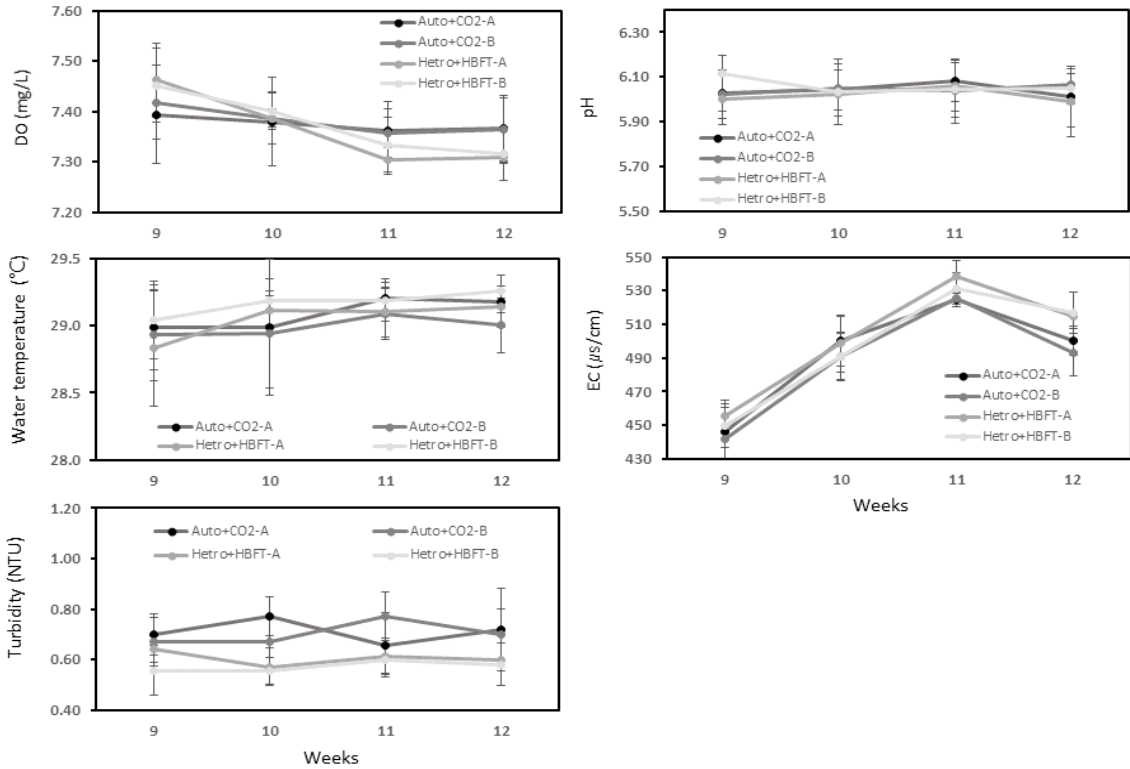


[Fig. 6] Change of water quality (DO; dissolved oxygen, pH, water temperature, EC; electric conductivity and turbidity) in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 1-8 weeks.

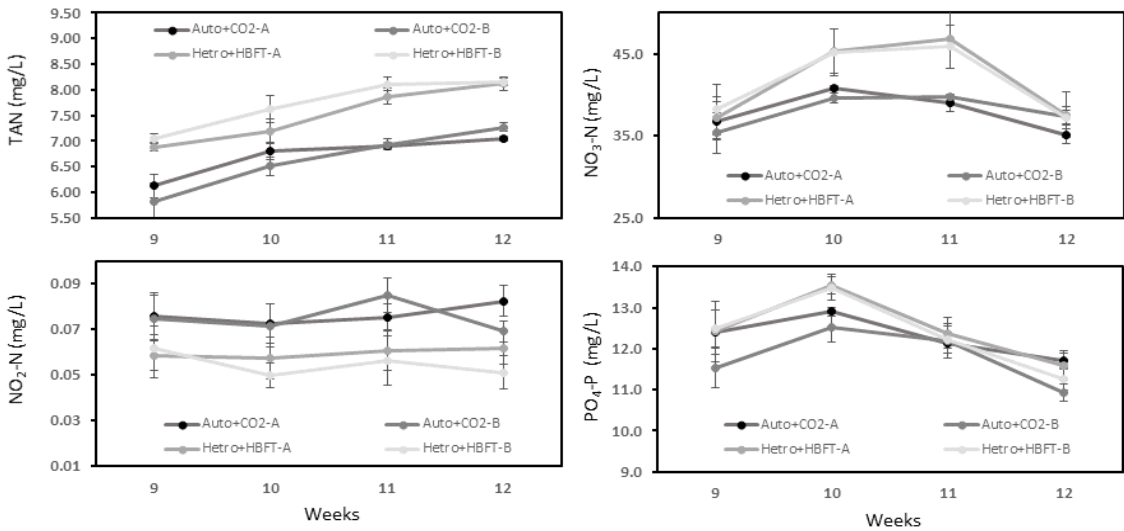


[Fig. 7] Change of water quality (TAN; total ammonium nitrogen, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 1-8 weeks.

HBFT-아쿠아포닉 시스템 내 독립 및 종속 미생물의 적용에 따른 시베리아 철갑상어 (*Acipenser baerii*), 바질 (*Ocimum basilicum*) 및 업체류 4종류의 성장과 수질변화



[Fig. 8] Change of water quality (DO; dissolved oxygen, pH, water temperature, EC; electric conductivity and turbidity) in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 9-12 weeks.



[Fig. 9] Change of water quality (TAN; total ammonium nitrogen, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 9-12 weeks.

pH는 2 실험구 모두 5.99-6.11의 유사한 범위를 유지하였고, 전기전도도는 2 실험구 모두 11주까지 상승(Auto+CO₂구 525 $\mu\text{s}/\text{cm}$, Hetero+HBFT구 539 $\mu\text{s}/\text{cm}$)하다가 12주에는 감소(Auto+CO₂구 493 $\mu\text{s}/\text{cm}$, Hetero+HBFT구 515 $\mu\text{s}/\text{cm}$)하는 경향을 보였다. 이는 실험 시점 투입되는 사료양에 비해 엽채류의 성장 속도가 빨라 사육수내 전기전도도가 감소되었음을 추론할 수 있다.

TAN의 경우 Hetero+HBFT구에서 6.88(9주)-8.15(12주) mg/L, Auto+CO₂구는 5.82(9주)-7.27(12주) mg/L의 범위를 보여 Hetero+HBFT구가 실험기간 동안 높은 값을 유지하였다. NO₂-N의 경우는 TAN와 달리 Hetero+HBFT구가 0.062(9주)-0.057(12주) mg/L, Auto+CO₂구는 0.084(9주)-0.076(12주) mg/L의 값을 나타내어 Hetero+HBFT구가 실험기간 동안 낮은 값을 유지하였으나, 2 실험구 모두 0.1 mg/L 이하의 안정적인 값을 보였다. NO₃-N의 경우 Hetero+HBFT구는 11주 까지 상승하다가 12주에 감소한 반면, Auto+CO₂구는 10주 시점부터 감소하여 사육수내 NO₃-N 농도 감소 기간이 빨랐다. 식물의 성장의 결과(<Table 4>)에서 Hetero+HBFT구의 엽채류가 Auto+CO₂구의 엽채류에 비해 성장이 잘된 것을 참고하여 유추해 보면 NO₃-N 흡수가 Hetero+HBFT구에서 빨랐음을 알 수 있고, 이에 따라 식물의 수중 내 NO₃-N 흡수는 Hetero+HBFT구가 빠름을 추측할 수 있다. PO₄-P의 경우 2 실험구 모두 10주까지 상승(Auto+CO₂구 12.4 mg/L, Hetero+HBFT구 13.5 mg/L)하다가 EC와 같이 12주에는 감소(Auto+CO₂구 10.9 mg/L, Hetero+HBFT구 mg/L)하는 경향을 보였다. 이러한 이유도 앞서 언급한 NO₃-N 농도와 같이 실험 12주 시점에 투입되는 사료양에 비해 엽채류의 성장 속도가 빨라 사육수내 전기전도도가 감소되었음을 추론할 수 있다.

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 유지

된다고 하였다. 이러한 이유는 저 pH 상태에서는 독립영양세균의 질산화 능력은 급격히 감소하고 종속영양세균이 질산화과정을 수행한 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 Hetero+HBFT구의 5-12주 기간에 대한 수질 변화([Fig. 7, 9])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. 물에서 NH₃(암모니아)와 NH₄⁺(암모늄)은 pH와 온도에 따라 평형을 이룬다. 두 가지 형태의 합계를 총 암모니아성 질소(TAN)라고 하며, NH₃와 NH₄⁺가 모두 어류에 독성을 가질 수 있지만, 비 이온화 된 암모니아(NH₃)가 더 독성이 강한 형태인데, 이는 전하를 띠지 않고 지용성이라서 이온화되어 전하를 띠는 NH₄⁺ 이온보다 쉽게 생물막을 통과하기 때문이다. 상업적으로 양식하는 어류에 있어 대부분의 경우 암모니아성 질소는 1.5 mg/L 이상의 농도에 독성을 지니는 것으로 인지되고 있으나, 대부분의 경우 이온화되지 않은 암모니아의 허용 수준은 0.025 mg/L에 불과하며, 독성 임계 값은 종, 크기, 미세한 고형물, 내화성 유기물, 표면 활성 화합물, 금속, 질산염, 염분 및 pH에 따라 크게 다를 수 있다(Avnimelech et al., 2015). 현재 EXP1 기간의 실험구에서 실험 5주 후부터 암모니아 농도가 상승하였음에도 시베리아 철갑상어가 사료 섭취 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.

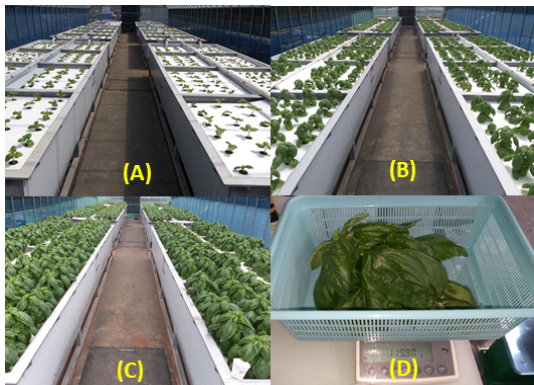
HBFT-아쿠아포닉 시스템 내 독립 및 종속 미생물의 적용에 따른 시베리아 철갑상어 (*Acipenser baerii*), 바질 (*Ocimum basilicum*) 및 엽채류 4종류의 성장과 수질변화

<Table 3> Growth of basil (*Ocimum basilicum*) in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 5-8 weeks. (EXP1)¹

Species (No. 40)	Growth factor	Culture methode	
		Auto+CO ₂ -(A,B)	Hetero+HBFT-(A,B)
Basil (<i>Ocimum basilicum</i>)	Root weight(g)	57.4±0.5	59.1±0.7ns
	Stem weight(g)	25.9±0.4	27.2±0.1*
	Leaf No.	98.3±0.2	102.9±0.1*
	Leaf weight(g)	95.0±1.6	102.7±1.0*

¹Values (means ± SD of 40 basil No. per each of experimental groups) with * letters in the same row are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).

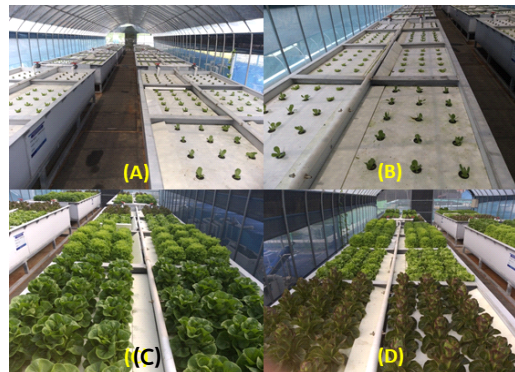
Auto+CO₂구와 Hetero+HBFT구에서 5-8주간 (EXP1)의 바질 생산 결과는 <Table 3> 및 [Fig. 10]와 같다. <Table 3>의 결과를 살펴보면, 바질의 생산성은 Hetero+HBFT구가 Auto+CO₂구에 비해 양호하게 나타났다.



[Fig. 10] Growth of basil (*Ocimum basilicum*) in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 5-8 weeks. (A) 1st week, (B) 2nd week, (C) 4th week, (D) Weight measurement of basil leaf per one individual

Hetero+HBFT구에서 성장한 바질의 엽중량은 각 반복구별 10개체 총 40개체를 샘플링하여 측정한 결과 평균 102.7±1.0 g이었으며, Auto+CO₂구는 95.0±1.6 g으로 나타났다. 엽수에서도 Hetero+HBFT구 102.9±0.1개, Auto+CO₂구 98.3±0.2

개로 측정되었다. 또한, Auto+CO₂구와 Hetero+HBFT구에서 9-12주간(EXP2) 재배된 유럽산 상추류 4품종에 대한 결과도 Hetero+HBFT구가 Auto+CO₂구에 비해 성장이 양호하게 나타났다 (<Table 4>, [Fig. 11]).



[Fig. 11] Growth of four leafy vegetables in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 9-12 weeks. (A) and (B) 1st week, (C) and (D) 4th week.

각 품종별 실험구당 142개체가 입식되어 총 실험구별 568개체가 재배되었다. 4주간 재배 후 Hetero+HBFT구는 4품종 전체 엽중량은 98,791 g 이었고, Auto+CO₂구는 88,471 g이었다. 뿌리 무게는 Hetero+HBFT구는 11,713 g, Auto+CO₂구는 11,340 g으로 나타나 유사한 무게를 보였다. 각

품종별 가식부인 엽중량 측정 결과에서 Auto+CO₂ 구는 fairly lettuce (29,897 g), ezabel lettuce (22,105 g), xaroma lettuce (21,097 g), ovired lettuce (15,372 g) 순서로 성장이 잘되었으며, Hetero+HBFT구는 fairly lettuce (32,884 g), xaroma lettuce (24,080 g), ezabel lettuce (22,986 g), ovired lettuce (18,841 g) 순서로 성장이 양호하였다. 두 실험구 모두 fairly lettuce가 같은 기간에 가장 엽중량이 많이 증대되었고, ovired lettuce가 낮은 중량을 갖는 공통된 경향을 보였다.

앞서 서론에서 언급했듯이 현재 아쿠아포닉스 연구 분야에서 엽채류 생산성이 수경재배에 비해 떨어지지 않는 이유는 식물성장 촉진 미생물 (PGPM, plant growth promoting microbes)의 역할로 설명되고 있다(Yep and Zheng, 2019; Zou et al., 2016; Bartelme et al., 2018). 본 실험의 Hetero+HBFT구에서는 초기 유용미생물 10종류와 함께 시간이 경과함에 따라 다양한 미생물이 번

식하였음을 추정할 수 있으며, 이러한 미생물의 역할이 엽채류의 성장에 영향을 미쳐 Auto+CO₂구 보다 생산성이 높은 것으로 추정된다.

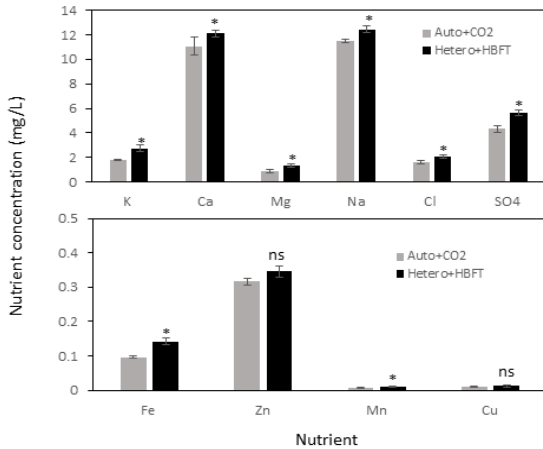
실험 기간(EXP1, EXP2) 동안 Auto+CO₂구와 Hetero+HBFT구 사육수 내 영양염(Na, Mg, K, Ca, SO₄, Cl, Fe, Zn, Mn 및 Cu) 분석 결과는 [Fig. 12, 13]에 나타내었다.

다량광물질(macro nutrient) 6종 중 Auto+CO₂구와 Hetero+HBFT구의 사육수 내 K 및 Ca의 농도는 엽채류 생산 EXP2 기간(9-12주)이 EXP1 기간(5-8주)에 비해 상승 폭이 증가하였으며, 이러한 이유는 pH 6.0 내외 범위를 유지하기 위해 KOH 및 Ca(OH)₂를 2 실험구에 지속적으로 투입한 결과로 사료된다. 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 조정할 수 있다. 결핍 시 식물은

<Table 4> Growth of four leafy vegetables in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) for 9-12 weeks (EXP2)¹

Culture method		Growth factor			
Auto+CO ₂ -(A,B)	Individual No.	Initial mean leaf weight (g) (No. = 30 individuals)	Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf weight (g)
Ovired lettuce	142	2.72±0.32	18,257	2,885	15,372
Fairly lettuce	142	2.84±0.28	32,924	3,027	29,897
Ezabel lettuce	142	2.16±0.14	24,839	2,734	22,105
Xaroma lettuce	142	2.69±0.37	23,792	2,695	21,097
Sum	568		99,811	11,340	88,471
Hetero+HBFT-(A,B)	Individual No.	Initial mean leaf weight (g) (No. = 30 individuals)	Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf weight (g)
Ovired lettuce	142	2.86±0.27	21,856	3,016	18,841
Fairly lettuce	142	2.77±0.19	35,948	3,064	32,884
Ezabel lettuce	142	2.14±0.11	25,923	2,938	22,986
Xaroma lettuce	142	2.72±0.26	26,776	2,695	24,080
Sum	568		110,504	11,713	98,791

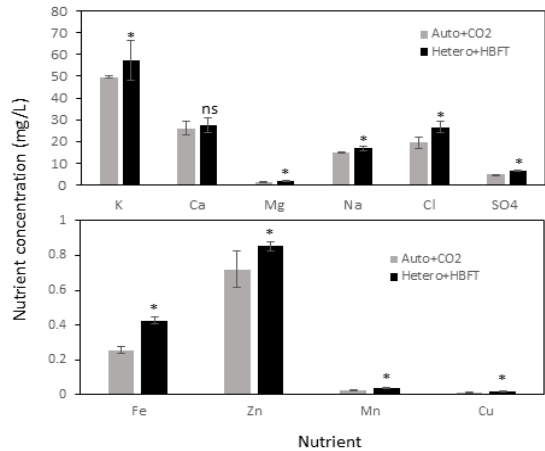
성장이 둔화되고 뿌리 발달이 불충분하고 곤충이나 질병에 대한 저항력이 떨어지며, 특히 시각적으로 잎이 노랗고, 갈색으로 변하거나 가장자리가 타거나 갈색 또는 자주색 반점이 생길 수 있다고 하였다(Thorarinsdottir, 2015).



[Fig. 12] Macro and micro nutrient concentrations in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) at the end of EXP1 (5-8 weeks). Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).

다른 다량광물질 Mg, Na, Cl, SO₄ 및 미량광물질 Fe, Zn, Mn, Cu은 Hetero+HBFT구가 Auto+CO₂구에 비해 EXP1과 EXP2의 실험기간 동안 높은 농도로 유지되었다. Hetero+HBFT구의 경우 초기 풍부한 종속영양미생물에 의해 Auto+CO₂구보다 무기물화 과정이 빨랐음을 알 수 있으며, Auto+CO₂구에 비해 Hetero+HBFT구가 엽채류 성장이 양호한 것에 대한 이유를 제시하는 결과로 사료된다. 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 함

께 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).



[Fig. 13] Macro and micro nutrient concentrations in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) at the end of EXP2 (9-12 weeks). Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).

아쿠아포닉스 시스템 내 Fe와 Mn 부족 시 현재까지 킬레이트 철(Fe)과 MnSO₄를 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 Fe²⁺ 및 Mn²⁺ 형태로 환원이 잘 일어난다(Soetaert et al., 2007). 본 실험에서 EXP1의 바질 입식 시기인 5주 후부터 pH가 6.5 이하로 하강하였고(Fig. 5), EXP2 실험기간 동안 pH는 Auto+CO₂구와 Hetero+HBFT구 모두 안정적으로 6.0 범위내에서 유지되었으며, 이러한 pH 관리에 의해 사육수 내 Fe와 Mn의 농도도 EXP1에 비해 지속적으로 상승한 것으로 사

료된다. 더불어 엽채류의 영양염 흡수 과정에서 K는 앞서 언급한 Fe 및 Mn 미량원소의 흡수능력을 높이는 시너지 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Maucieri et al., 2019).

Auto+CO₂구와 Hetero+HBFT구의 시베리아 철갑상어 사육실험(1-12주) 종료 후, 24시간 사료 절식을 진행한 후, 혈액을 분석한 결과는 <Table 5>와 같다.

동일한 아쿠아포닉스 시스템 시설 내 유용미생물 종류를 달리하여 사육된 시베리아 철갑상어의 혈액학적 차이는 현재 실험에서 나타나지 않았다. 그러나 pH 6.0 범위 내외에서 운영된 아쿠아포닉스에서 사육된 메기, 뱀장어 및 비단잉어의 경우 혈액 성분 분석 결과 전혈 부분의 PCV (%)와 Hb (g/dL)는 pH 6.5 이상의 유수식 및 순환식 방식에서 양식된 개체에 비해 높은 수치를 보였는데, PCV와 Hb의 두 항목은 주로 어체 내 산소 운반능력과 영양학적 빈혈의 판단이 되는 지표로 폐쇄된 환경의 저 pH 상태에서 이들 어류의 생

체 대사과정에 필요한 산소 운반 능력을 증대시키기 위해 환경에 적응된 결과라 밝혔다(Lee et al., 2019a,b; Lee and Kim, 2021; Lee, 2021). 철갑상어는 현재 27종이 서식하는 것으로 보고되고 있으며, 이 중 국내 주 품종인 시베리아 철갑상어에 대한 PCV와 Hb의 평균 수치는 20-30 % 및 3.5-11 g/dL로 보고되고 있으며(Docan et al., 2011; Gorjipour, 2014), 또한 Lee et al, (2012)는 반순환 여과 방식으로 사육된 스텔렛 철갑상어의 경우 PCV와 Hb의 수치는 25.4±1.67 % 및 11.4±0.56 g/dL 범위에 있음을 보고하였다. 현재 아쿠아포닉스에서 사육된 시베리아 철갑상어는 앞서 언급한 시베리아 및 스텔렛 철갑상어의 PCV와 Hb에 비해 다소 높은 수치를 보이고 있는데, 이러한 이유는 앞서 설명한 바와 같이 pH 6.0 부근의 저 pH에서 지속적으로 사육된 결과에 따라 산소 운반 능력을 높이기 위해 수중 환경에 적응된 결과로 사료된다.

<Table 5> Hematological analysis of siberian sturgeon in two experimental groups (Auto+CO₂ and Hetero+HBFT) at the end of experimental trial (1-12 weeks)¹

Blood parameters (No. = 4 fish)	Culture method			
	Auto+CO ₂ -A	Auto+CO ₂ -B	Hetro+HBFT-A	Hetro+HBFT-B
PCV (%) ²	30.4±1.2 ^{ns}	31.2±2.8	30.8±3.1	32.6±2.6
Hb (g/dL) ³	13.8±1.5 ^{ns}	14.1±2.1	12.7±0.9	13.6±1.8
GOT (U/L) ⁴	438.4±57.4 ^{ns}	462.7±62.7	482.4±49.8	477.3±71.4
GPT (U/l) ⁵	132.4±16.2 ^{ns}	128.3±11.8	125.3±9.6	142.6±21.4
ALB (g/dL) ⁶	0.84±0.05 ^{ns}	0.87±0.06	0.81±0.03	0.85±0.05
GLU (mg/dL) ⁷	67.4±4.6 ^{ns}	68.6±3.2	65.6±3.9	64.3±4.5
Pi (mg/dL) ⁸	11.7±0.2 ^{ns}	11.9±0.5	12.3±1.4	11.5±0.8
Na (mEq/L)	134.3±2.1 ^{ns}	137.2±3.2	136.4±6.4	136.7±4.5
K (mEq/L)	3.4±0.5 ^{ns}	3.1±0.2	3.3±0.9	3.2±0.5
Cl (mEq/L)	92.8±2.7 ^{ns}	90.5±1.4	92.3±2.4	91.4±2.2

¹Values represent means±SD of four siberian sturgeon fish. ²Hematocrit. ³Hemoglobin. ⁴Glutamic oxaloacetic transaminase.

⁵Glutamic pyruvic transaminase. ⁶Albumin. ⁷Glucose. ⁸Inorganic phosphorus.

HBFT-아쿠아포닉 시스템 내 독립 및 종속 미생물의 적용에 따른 시베리아 철갑상어 (*Acipenser baerii*), 바질 (*Ocimum basilicum*) 및 엽채류 4종류의 성장과 수질변화

본 실험 결과에서 아쿠아포닉스 사육수 내 초기 접종된 미생물 종류에 따라 초기 1개월 간 사육수 내 질소화합물(TAN, NO₂-N, NO₃-N), pH 및 탁도의 수치는 각기 다른 양상을 보였으며, 실험 기간이 경과한 12주에는 TAN 및 NO₂-N을 제외하고 유사한 수질 경향을 보였다. 또한 시베리아 철갑상어 성장과 엽채류 생산성은 Hetero+HBFT 구에서 높은 경향을 나타내었는데, 이러한 종합적 사항을 고려할 시 아쿠아포닉스 수질관리를 위해서는 초기 미생물 접종 시 독립영양세균 단독 처리에 의한 수질 안정화 도모보다 종속영양세균과 함께 복합적으로 사용함이 효과적임을 알 수 있다.

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>.
- Docan A, Dediu L and Cristea V(2011). Effect of feeding with different dietary protein level on hematological indices of juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baeri* reared under recirculating systems condition. AACL Bioflux 4(2), 181~186.
<http://www.bioflux.com.ro/aac>.
- 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(1986). Food and Agriculture Organization. Flow-through and recirculation systems. Report of the working group on terminology, format and units of measurement. EIFAC Technical paper 49, 1~27.
- 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.
- Gorjipour E(2014). Effects of water type (river and well) on hematological parameters in juvenile siberian sturgeon (*Acipenser baeri*). J Fish Aquat Sci 9(4), 213~220.
<http://doi.org/10.3923/jfas.2014.213.220>.
- Hochleithner M. and Gessner J(1999). The sturgeon and paddlefish (*Acipenseriformes*) of the world. Biology and Aquaculture. AquaTech publications, Austria., 1~72.
- Kim SK., Pang Z, Seo HY, Cho YR, Samocha T and Jang IK(2014). Effect of bioflocs on growth and immune activity of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* postlarvae. Aquaculture Research 45, 362~371.
<https://doi.org/10.1111/are.12319>.
- Kim DW, Kim JS, Kim JD, Lee SW and Lee DH(2021). Effects of dietary monobasic potassium phosphate levels on water quality and growth of gold madarin fish, *Siniperca scherzeri* and leafy vegetables in a hybrid BFT-aquaponic system.. JFMSE 33(4), 844~858.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.8.33.4.844>.
- Lee DH, Lim SR, Ra CS and Kim JD(2012). Effects of dietary garlic extracts on whole body amino acid and fatty acid composition, muscle free amino acid profiles and blood plasma changes in juvenile sterlet sturgeon, *Acipenser ruthenus*. Asian-Aust J Anim Sci 25(10), 1419~1429.
<http://dx.doi.org/10.5713/ajas.2012.12184>.
- 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>.
- Lee DH and Kim JD(2021). Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using Japanese eel, *Anguilla japonica* and hydroponics. Fish Aquat Sci 24(7), 260~275. <https://doi.org/10.47853/FAS.2021.e26>.
- Lee DH(2021). Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using yellow koi fish, *Cyprinus carpio* and hydroponics. JFMSE 33(5), 1027~1037. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.10.33.5.1027>.
- 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(2021). Ministry of Oceans and Fisheries. Fisheries statistics. Retrieved from <https://www.fips.go.kr/p/S020304/> on Jan. 06, 2022.
- NIFS(2018). National Institute of Fisheries Science. Extension of biofloc technology for marine shrimp farming. Report of National Institute of Fisheries Science, 1~74. <https://doi.org/10.23000/TRKO201800037865>.
- Park CH(2018). Artificial seedling propagation and caviar production in farmed siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) and Russian sturgeon (*A. gueldenstaedtii*). Published doctoral dissertation, Pukyong National University. Pusan, Korea. 1~5. Retrieved from <http://www.riss.kr/link?id=T14729016>. on Jan. 08, 2022.
- 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.
- Ray AD, Drury T and Cecil A(2017). Comparing clear-water RAS and biofloc systems: Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production, water quality, and biofloc nutritional contributions estimated using stable isotopes. Aquacultural Engineering 77(3), 9~14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.02.002>.
- 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.
- 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.
- Thorarinsdottir RI(2015). Aquaponics guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33~39. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4975.6880>.
- 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 : 20 January, 2022
 - Revised : 07 February, 2022
 - Accepted : 10 February, 2022