

# 바이오플락기술 기반 아쿠아포닉스와 수경재배 시스템에서 사육한 메기와 피델 성장에 관한 연구

김나나 · 박준성\* · 이정호\*\* · 황주애 · 최지용 · 김형수†

국립수산과학원(연구사) · \*국립수산과학원(연구원) · \*\*국립수산과학원(연구관)

## A Study on the Growth Performance of Far Eastern Catfish *Silurus Asotus* and Vegetable *Lactuca Sativa* L. c. Fidel in an Aquaponics System Based on Biofloc Technology (BFT) and Hydroponic System

Na Na KIM · Jun Seong PARK\* · Jeong-Ho LEE\*\* · Ju-ae HWANG · Ji Yong CHOI · Hyeong su KIM†

†National Institute of Fisheries Science(senior researcher) · National Institute of Fisheries Science(researcher) · \*\*National Institute of Fisheries Science(director)

### Abstract

The present study investigated the effect on the growth performance derived from far eastern catfish *Silurus asotus* and vegetable *Lactuca sativa* L. cv. fidel and the change of water quality in biofloc technology (BFT) system, aquaponics system based on BFT (BFT-AP), and hydroponics system (HP) for 4 weeks. The weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and feed conversion ratio (FCR) of *S. asotus* was more effective in BFT-AP (136.5%, 2.72% and 1.14) than in BFT (115.6%, 2.45% and 1.34). The total weight, leaf weight, total leaf length and leaf width of *L. sativa* was higher (154.5±3.98 g, 118.7±2.31 g, 198.2±2.49 mm and 156.8±3.29 mm) in BFT-AP than in HP (120.8±3.94 g, 94.6±3.47 g, 148.7±4.62 mm and 117.8±1.87 mm). The context of inorganic ions in breeding water and fidel were lower in BFT-AP than in HP. We suggested that a large amount of nitrogen compounds and inorganic ions contained in BFT not only enhances the growth of cultivated fidel, but also improves the water quality, thereby creating an environment suitable for growth and feed effect of *S. asotus*.

**Key words :** Biofloc technology (BFT), Aquaponics, *Silurus asotus*, fidel, Nitrogen

### I. 서론

전통적인 양식업은 노동집약적이며 자연환경의 영향을 많이 받거나, 많은 양의 물을 사용한다. 또한 수산생물을 양식하는 과정에서 발생하는 사료찌꺼기, 수질악화, 질병감염, 폐사체 축적, 수산물 의약품 남용 등 심각한 환경문제를 동반한다

(Buhmann et al., 2015). 이에 최근에는 지속가능한 양식기술 개발에 대한 요구가 높아지고 있다. 특히, 바이오플락기술(biofloc technology, BFT)은 미생물을 이용하여 사육수 내 질산화 물질을 빠르게 제거하는 방식으로 대표적인 친환경 양식방법이다. 또한 순환여과식 양식시스템(recirculating aquaculture system, RAS)은 물리적, 생물학적 여

† Corresponding author : 055-540-2720, kimk2k@korea.kr/orcid.org/0000-0003-3189-3844

\* 이 논문은 2022년도 국립수산과학원 수산시험연구사업 바이오플락을 이용한 담수양식 기술개발(R2022015)의 지원에 의해 수행되었음

과장치를 이용하여 사육수를 재사용함으로써 에너지 낭비를 줄이고 환경문제를 감소시키는 양식 방법으로 알려져 있다(Mariscal-Lagarda et al., 2012; Avnimelech et al., 2015).

BFT는 양식생물을 사육하는 동안 사육수 내 존재하는 유용 미생물로 사육수 교환 없이 사료 잔여물이나 양식생물의 배설물에서 발생하는 암모니아성 질소( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )를 적정 탄질비(C:N ratio) 조절을 통해 바이오플라크(biofloc)으로 동화시켜 제거할 수 있는 양식기술이다(Avnimelech et al., 2015). 특히 바이오플라크는 양식생물의 먹이로써 이용될 수 있어 안정적인 수질 유지와 더불어 사료효율을 높여줄 수 있고 BFT는 비용적인 측면에서도 RAS보다 효과적인 것으로 알려져 있다(Rijn, 2013). 바이오플라크는 양식생물에게 소화되면 면역력 증가, 성장 촉진 등 장점이 있다고 보고되었다(Kim et al., 2014). 그러나 BFT는 장기간에 걸쳐 사육수를 거의 환수하지 않기 때문에  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 아질산성 질소( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ), 질산성 질소( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )가 축적되어 양식생물에게 부정적인 영향을 미치는 문제점을 가지고 있다(Michael and Morgan, 1983; Hargreaves, 2006; Crab et al., 2012; Bossier and Ekasari, 2017). 최근에는 사육수에 축적되는 질소와 인 성분이 사육수를 부영양화시키는 원인을 제공할 수 있어 축적되는 질소화합물을 제거하고 양식생물을 안전하게 사육하는 방법으로 아쿠아포닉스(aquaponics)가 알려져 있다(Buhmann et al. 2015).

아쿠아포닉스는 양식(aquaculture)과 수경재배(hydroponics)가 융합된 형태이며, 사육수에서 발생한 배설물이 미생물에 의해 질소화합물로 분해되고, 이는 식물의 영양분으로 이용되어 식물 성장과 사육수의 수질 안정화가 동시에 가능한 물 질순환 방식의 양식시스템이다(Endut et al., 2010; Tyson et al., 2011; Rakocy, 2012; Liang and Chien, 2013; FAO, 2014). 아쿠아포닉스는 농·수산물물을 동시에 생산할 수 있는 친환경 양식이라는 점에서 많은 연구가 진행되었지만 양식과정에서

발생하는 무기질과  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 식물의 영양분으로 사용될 수 있을 만큼 충분히 공급되지 못해 식물 성장을 위해서는 추가적인 양액(nutrient solution)의 주입이 필요하다는 한계가 있다(Mamat et al. 2016; Pinho et al. 2017). 그러나 양액에 포함된 영양염은 농도가 높아 자연 수계에 유출될 경우 환경오염을 발생시킬 수 있어(Ahn and Son, 2011) 양액을 공급하지 않으며 식물 생산성을 높이기 위한 기술이 개발 중이다(Gieling et al., 2005; Gutierrez et al., 2008).

본 연구는 양식생물과 식물의 성장에서 BFT 방식과 아쿠아포닉스가 결합한 BFT 기반 아쿠아포닉스(aquaponics system based on biofloc technology, BFT-AP) 시스템의 양식산업 적용가능성을 확인하고자 수행하였다. BFT 기반의 아쿠아포닉스는 식물을 키우기 위한 영양염을 인공적인 양액이 아닌 어류 사육수로부터 충분히 획득할 수 있으며, 수조 내 질산화과정의 최종 산물인 질산염을 식물이 영양염으로 활용함으로써 제거가 가능한 시스템이다. 이는 최근 친환경 먹거리에 대한 세계적 관심이 높아지는 추세에서 안전하고 지속가능한 농수산물 제공이 가능한 융복합 시스템의 구현이 가능할 것으로 기대되고 있다. 이를 확인하기 위해서 첫째, BFT 적합 어종으로 알려져 있는 메기(*Silurus asotus*)와 엽채류 중 피델을 이용하여 BFT 시스템과 BFT-AP 시스템에서 메기의 성장도와 수질변화를 비교분석하였고 둘째, BFT-AP 시스템과 일반적인 수경재배(hydroponics, HP) 시스템에서 사육한 피델의 성장도와 수질변화를 비교분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험어 및 사육환경

양식생물 사육실험은 BFT 실험구와 BFT-AP 실험구로 나누었고 1T ( $\varnothing$  1.2 m × H 0.6 m) 수조에 각 실험구당 메기(체중  $67.4 \pm 3.9$  g) 85마리

총 5.7~5.8 kg (단위 면적 5 kg/m<sup>2</sup>)를 수용하여 1 반복 수행하였다. BFT 시스템을 유지하기 위하여 수조 측면과 바닥에 에어스톤을 설치하고 공기를 주입하여 사육수 내 바이오플락 및 유기물의 침전을 방지하였고, 용존산소(dissolved oxygen, DO)는 7.0±1.0 mg/L, pH는 6.6±0.5, 수온은 23.0±1.0 °C에서 유지관리하였다.

사료 공급은 (주)사조동아원 메기스프링(사료지대 제공, 조단백 44%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 1.8%, 조섬유 5%, 조회분 17%)을 매일 어체중의 3%로 9시, 17시로 2회에 걸쳐 나누어 공급하였는데 4주 동안 동일한 양의 사료를 공급하였다. 메기의 성장도 분석을 위해 실험 종료 후 실험어 전체를 포획하였고 마취제(MS-222, Sigma-Aldrich, St. Louis, USA)를 이용하여 100 mg/L의 농도로 마취시킨 후 체중을 0.01 g까지 전자저울(MW-200, CAS, Korea)을 사용하여 측정하였다. 실험 시작 체중(initial weight), 실험 종료 체중(final weight)과 사료공급량을 확인하여 증체율(weight gain rate, WGR), 일간성장률(specific growth rate, SGR), 사료계수(feed conversion ratio, FCR)를 산출하였고 실험기간 동안 생존율(survival rate)을 분석하였다.

## 2. 양식시스템 실험구

BFT-AP 실험구는 메기 사육을 위한 IT (∅ 1.2 m × H 0.6 m) 수조와 엽채류 피델 재배를 위한 식물재배배드(nutrient film technology, L 4.8 m × W 0.6 m × H 0.3 m)로 구성하였고 시스템을 유지하기 위하여 산소발생기, 순환펌프, LED 조명 등을 설치하였다. 식물재배배드는 동일 간격으로 총 200포기의 식물재배가 가능하며, 실험기간 동안 광주기(12L:12D)와 기온(23±1.0 °C)을 유지하였고, BFT-AP 실험구 사육수는 1일 1회전 순환이 가능하도록 순환펌프의 속도를 조절하며 관리하였다. BFT와 BFT-AP 실험구의 경우 과도한 유기물이 발생하는 것을 방지하기 위해서 추

가적인 물리적 여과 필터(망목 10 um)를 사용하였고 매일 필터를 청소하여 관리해주었다.

HP 실험구는 BFT-AP 실험구와 동일한 크기의 수조와 식물재배배드를 사용하였다. 다만, 메기 사육이 필요하지 않기 때문에 수조는 식물에게 양액을 공급하기 위해 자동 공급시스템으로 연결하여 수용량을 맞추었고, 본 실험 구성품으로 원수탱크 1개(200 L), 양액자동조절기 1대(Insung Technology, Korea), 양액통(20 L) 3개(혼합액 A, B, C), 순환펌프 1개로 이루어졌다.

## 3. 식물재배배드 실험구

실험구에 따른 식물 성장을 비교하기 위해서 피델 종묘(*Lactuca sativa* L. cv. Fidel)를 구매하여 BFT-AP 실험구와 HP 실험구의 식물재배배드에 식재하고 관리하였다. BFT-AP 실험구는 메기를 사육한 BFT 사육수를 식물재배배드로 유입시킨 후 다시 사육수조로 돌아오는 순환시스템으로 구성하였고, HP 실험구는 BFT 사육수 대신 양액이 식물재배배드를 거쳐 순환하는 시스템으로 구성하였다. BFT-AP 실험구와 HP 실험구는 피델을 각각 200 포기씩 재식하였고 성장도는 4주간 사육 후 식물의 총중량(total weight), 엽중량(leaf weight), 총엽장(total leaf length), 엽폭(leaf width)을 측정하고 분석하였다.

## 4. 수질환경 분석

수질측정 항목인 DO, pH, 수온, 전기전도도(electrical conductivity, EC), 총 용존고형물(total dissolved solid, TDS), 총 부유성 고형물(total suspended solids, TSS), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (ammonia nitrogen), NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N (nitrite nitrogen), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N (nitrate nitrogen), 인산염 인(PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P)는 2회/주 오후 1시경에 채수하여 측정하였다. DO, pH, 수온, EC, TDS는 휴대용 다항목수질측정기(YSI Inc., Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 사용하여 측정하였고, TSS는 사육수를 필터로 거른 후 오븐에

건조시켜 건중량으로 측정하였다.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 는 분석시약(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)과 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)을 이용한 비색법으로 분석하였다.

BFT-AP 실험구와 HP 실험구의 사육수 내 미량원소(mg/L) 분석 중 K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn는 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES Optima 8300, Perkin Elmer Co., Waltham, USA)로, Cl,  $\text{SO}_4$ 는 이온크로마토그래피(930 Comact IC Flex, Metrohm Co., Herisau, Switzerland)를 사용하여 분석하였다.

### 5. 식물체내 원소 분석

BFT-AP 실험구와 HP 실험구에서 재배한 식물체내 미량원소 함유량(mg/L)을 분석하기 위해 식물체 100 g을 건조시킨 후, 총 질소(total nitrogen, T-N)는 질소분석기(Kjeltec 2300, Foss, Sweden)로,

총 인(total phosphorus, T-P)은 UV spectrophotometer (UV2450, Shimadzu Co., Japan)를 이용하여 470 nm에서 흡광도를 측정하였다(Vanadate법). 또한 K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn는 유도결합플라즈마 분광광도계로 분석하였다.

### 6. 통계분석

본 실험은 실험구 당 1반복 실험만 수행하였다. 이에 메기성장과 식물 성장의 실험구 내에서 개체별 측정결과 값을 블록으로 설정하여 3개의 구역으로 나누어 평균과 표준편차를 제시하였다. 다만, 실험 결과로부터 얻어진 자료의 유의성 검증은 SYSTAT 소프트웨어 (Systat version 18.0, SPSS INC., Chicago, IL., USA)를 이용하여 BFT 실험구와 BFT-AP 실험구 간 분석, BFT-AP 실험구와 HP 실험구 간 분석은 두 집단 간 평균을 비교할 수 있는 t-test로 통계처리하였고, 통계학적 유의수준은  $P < 0.05$ 로 설정하였다.

<Table 1> The growth performance of *Silurus asotus* in BFT and BFT-AP groups for 4 weeks

Groups	Survival Rate (%)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Initial total weight (g)	Final total weight (g)	WGR <sup>3</sup> (%)	SGR <sup>4</sup> (%)	FCR <sup>5</sup>
BFT <sup>1</sup>	95.2	67.5±4.7 <sup>ns</sup>	151.7±7.2*	5,742	12,440	115.6±5.2*	2.4±0.2	1.3±0.2
BFT-AP <sup>2</sup>	96.4	67.3±3.1	164.5±11.0	5,721	13,686	136.5±5.3	2.7±0.3	1.1±0.3

<sup>1</sup>BFT : biofloc technology

<sup>2</sup>BFT-AP : aquaponics based on biofloc technology

<sup>3</sup>WGR (weight gain rate) = (final weight - initial weight) / initial weight × 100%

<sup>4</sup>SGR (specific growth rate) = (ln final weight - ln initial weight) / days × 100%

<sup>5</sup>FCR (Feed coefficient rate) = Feed consumption / unit weight of increase

\* : superscripts in the same column are significantly different ( $P < 0.05$ ), ns : no significant ( $P > 0.05$ )

<Table 2> The growth of *Lactuca sativa* L. cv. Fidel in BFT-AP and HP groups for 4 weeks

Groups	Total weight (g)	Leaf weight (g)	Total leaf length (mm)	Leaf width (mm)
BFT-AP <sup>1</sup>	154.5±3.98*	118.7±2.31*	198.2±2.49*	156.8±3.29*
HP <sup>2</sup>	120.8±3.94	94.6±3.47	148.7±4.62	117.8±1.87

<sup>1</sup>BFT-AP : aquaponics based on biofloc technology

<sup>2</sup>HP : hydroponics

\* : superscripts in the same column are significantly different ( $P < 0.01$ )

### Ⅲ. 연구 결과

#### 1. 메기 성장 분석

BFT 실험구와 BFT-AP 실험구에서 사육한 메기의 성장률을 비교한 결과는 <Table 1>과 같다. 생존율은 두 실험구에서 유사하였고, WGR은 BFT 실험구는 평균 어체중 5,742 g에서 12,440 g으로 115.6% 성장하였고, BFT-AP 실험구는 5,721 g에서 13,686 g으로 136.5% 성장하여 BFT-AP의 성장이 빠른 것으로 나타났다. SGR은 BFT 실험구는 2.4%, BFT-AP 실험구는 2.7%로 나타났고, FCR은 BFT 실험구는 1.3, BFT-AP 실험구는 1.1로 BFT-AP 실험구에서 메기의 생산성이 높은 것으로 확인되었다.

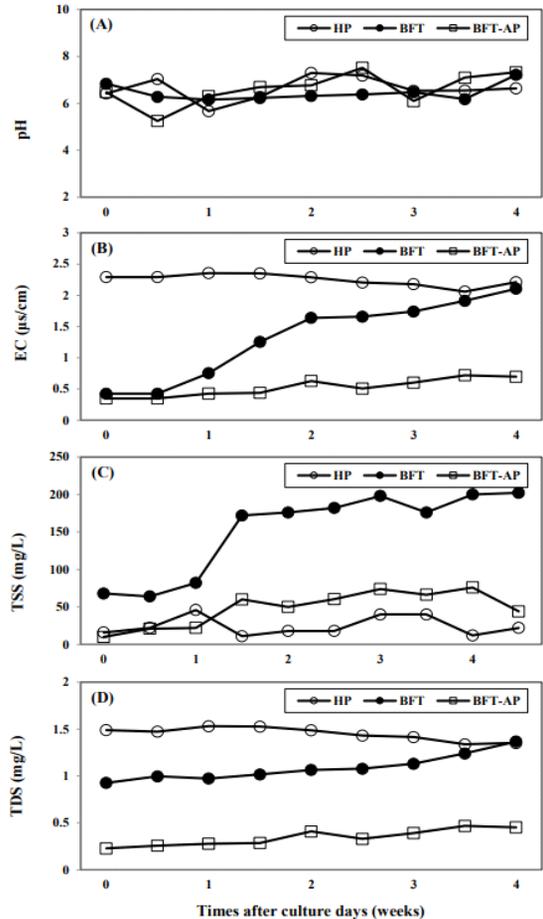
#### 2. 식물 성장 분석

BFT-AP 실험구와 HP 실험구 간 엽채류 피델의 생산성을 비교한 결과는 <Table 2>와 같다. 식재 4주 후 성장도를 측정된 결과 BFT-AP 실험구의 총중량과 엽중량은 154.5±3.98 g과 118.7±2.31 g으로 HP 실험구의 120.8±3.94 g과 94.6±3.47 g보다 25% 정도 중량이 유의적 수준에서 높게 나타났다(P<0.01). 피델의 총엽장과 엽폭을 측정된 결과 BFT-AP 실험구에서 198.2±2.49 mm과 156.8±3.29 mm로 HP 실험구의 148.7±4.62 mm과 117.8±1.87 mm 보다 33% 정도 유의적 수준에서 성장이 빠르게 나타났다(P<0.01).

#### 3. 수질환경 분석

실험 기간 동안 BFT, BFT-AP, HP 실험구의 주요 수질환경 요소인 DO는 6.58±0.38 mg/L, pH는 7.04±0.44, 수온 23.10±0.58 °C로 변동은 있었으나 3 실험구에서 모두 유사하게 유지되었다 ([Fig. 1]). BFT 실험구에서 EC는 0.42  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 에서 2.10  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , TSS는 68.00 mg/L에서 202.20 mg/L,

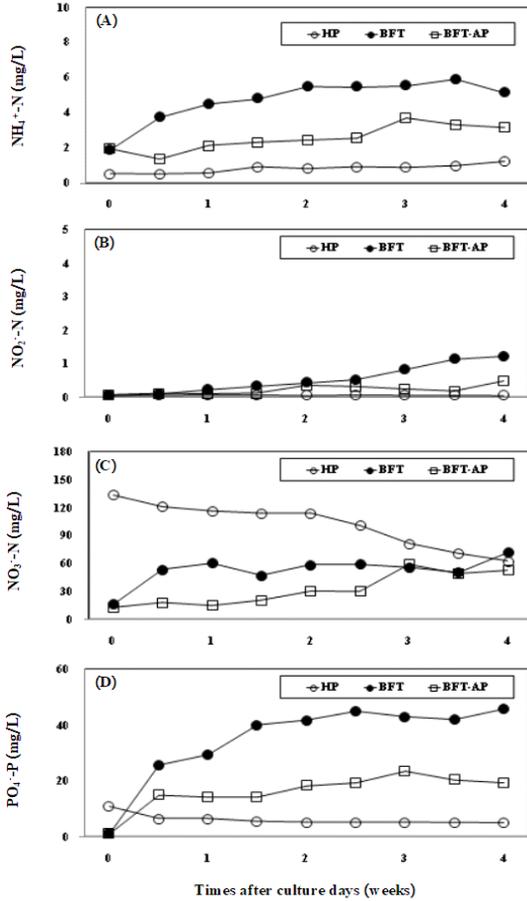
TDS는 0.92 mg/L에서 1.51 mg/L,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 1.92 mg/L에서 3.23 mg/L,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 는 0.06 mg/L에서 1.10 mg/L,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 15.82 mg/L에서 66.80 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 은 1.15 mg/L에서 45.80 mg/L로 4주 실험기간 동안 모두 증가하였다([Figs. 1 and 2]).



[Fig. 1] The Change of water quality by the HP (hydroponics), BFT (biofloc technology), and BFT-AP (aquaponics based on BFT) system for 4 weeks (A, pH; B, EC; C, TSS; D, TDS).

BFT-AP 실험구에서 EC는 0.35  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 에서 0.69  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로, TSS는 10.00 mg/L에서 44.00 mg/L, TDS는 0.22 mg/L에서 0.46 mg/L으로,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 1.97 mg/L에서 3.14 mg/L,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 는 0.07 mg/L에서

0.75 mg/L, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N는 12.90 mg/L에서 52.80 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P은 1.24 mg/L에서 18.50 mg/L로 4주 실험기간 동안 증가하는 경향을 보였다.



[Fig. 2] Change of water quality by the HP (hydroponics), BFT (biofloc technology), and BFT-AP (aquaponics based on BFT) system for 4 weeks (A, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N; B, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N; C, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; D, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P).

HP 실험구에서 EC는 2.29 μs/cm에서 2.21 μs/cm, TSS는 16.00 mg/L에서 22.00 mg/L, TDS는 1.49 mg/L에서 1.35 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N는 0.52 mg/L에서 1.21 mg/L, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N는 0.06 mg/L에서 1.24 mg/L로 나타났고, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N는 133.20 mg/L에서 62.50 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P는 10.80 mg/L에서 4.95 mg/L로 나타

났다.

#### 4. 사육수 내 이온함량 분석

BFT-AP 실험구에서 사육수 내 이온함량 분석 결과 K는 16.75 mg/L, Ca는 115.21 mg/L, Mg는 18.95 mg/L, Fe는 1.15 mg/L, Cu는 0.13 mg/L, Mn는 0.05 mg/L, Cu는 1.28 mg/L, SO<sub>4</sub>는 90.33 mg/L로 확인되었다([Fig. 3]).

HP 실험구에서 사육수 내 이온함량 분석 결과 K는 118.10 mg/L, Ca는 332.01 mg/L, Mg는 50.56 mg/L, Fe는 3.84 mg/L, Cu는 0.28 mg/L, Mn는 1.11 mg/L, Zn는 1.28 mg/L, SO<sub>4</sub>는 171.06 mg/L로 확인되어 HP 실험구가 BFT-AP 실험구보다 이온함량이 전반적으로 높은 것으로 분석되었다.

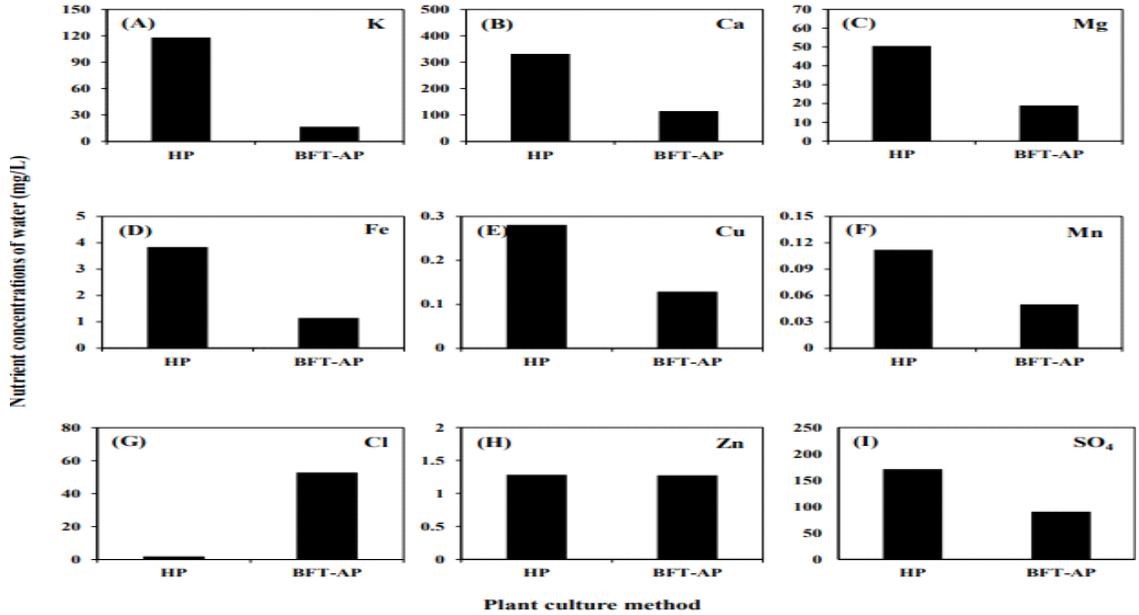
#### 5. 식물의 이온성분 분석

4주간 재배된 피델의 건조중량 1 g을 기준으로 이온성분 분석 결과 BFT-AP 실험구에서 T-N은 3.42 mg/L, P은 0.96 mg/L, K은 1.51 mg/L, Ca은 1.51 mg/L, Mg은 0.34 mg/L, Fe은 48.78 mg/L, Cu는 0.99 mg/L, Mn은 156.77 mg/L, Zn은 160.20 mg/L로 확인되었다([Fig. 4]).

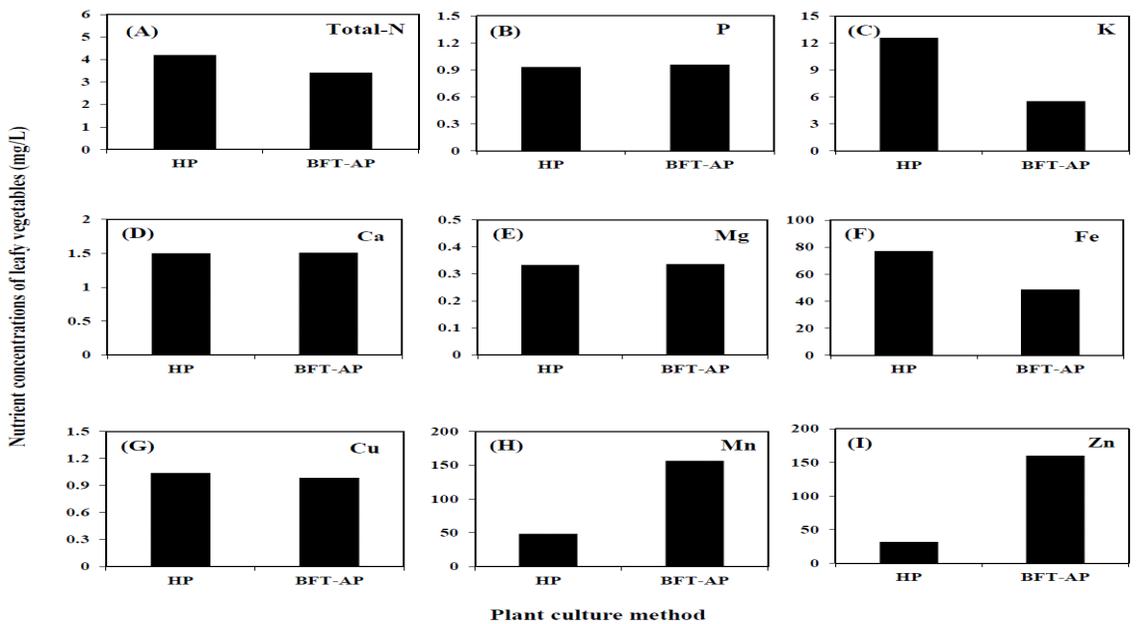
HP 실험구에서 피델의 이온성분 분석 결과 T-N은 4.20 mg/L, P은 0.93 mg/L, K은 12.57 mg/L, Ca은 1.50 mg/L, Mg은 0.33 mg/L, Fe은 77.21 mg/L, Cu는 1.04 mg/L, Mn은 48.65 mg/L, Zn은 31.99 mg/L로 분석되었다.

### IV. 결론

본 연구는 BFT에 아쿠아포닉스를 접목한 BFT-AP과 BFT, HP 실험구 조건에서 메기와 피델의 성장도 및 수질환경 분석 연구를 수행하였다. 연구 결과 BFT-AP 조건에서 메기는 10% 이상, 피델은 30% 정도의 생산성이 향상됨을 확인하였다. 특히, 수경재배에서 식물재배를 위해 필



[Fig. 3] The nutrient concentration in the water between HP (hydroponics) and BFT-AP (aquaponics based on BFT) system for 4 weeks (A, K; B, Ca; C, Mg; D, Fe; E, Cu; F, Mn; G, Cl; H, Zn; I, SO<sub>4</sub>).



[Fig. 4] The nutrient concentration in the leafy vegetables (fidel) between HP (hydroponics) and BFT-AP (aquaponics based on BFT) system for 4 weeks (A, K; B, Ca; C, Mg; D, Fe; E, Cu; F, Mn; G, Cl; H, Zn; I, SO<sub>4</sub>).

요한 양액 대신 천연의 BFT 사육수를 영양물질로 활용할 수 있고, 식물은 생물학적 여과재로 사용함으로써 양식생물 생산성과 수질개선의 효과를 융합한 BFT-AP의 양식산업 적용 가능성을 확인하였다.

Luo et al. (2014)는 틸라피아를 대상으로 BFT와 RAS 방식으로 사육한 결과 BFT에서 생산량은 22%, 성장률은 28%, 사료효율은 18% 향상되었다고 보고하였다. 또한 BFT에서 사육한 메기의 성장은 지수식 방식(continuous replacement system, CRS) 보다 성장률과 사료효율이 15% 정도 향상되었다고 하였다(Park et al., 2021). 본 연구의 BFT-AP 실험구에서 사육된 메기는 BFT 실험구보다 증체율과 사료계수에서 약 5% 정도 생산성이 향상된 것으로 나타났는데 식물의 영양염 흡수와 BFT 사육수의 안정적 수질관리로 인한 것으로 추정된다. 그러나 본 실험이 1반복으로만 진행된 부분과 더불어 양식대상종인 메기의 경우 성별에 따라 암컷의 성장이 빠르기 때문에 향후 대상종의 성장도에 따른 추가적인 실험이 시행되어야 할 것으로 사료된다.

양식생물과 식물이 함께 생산되는 아쿠아포닉스에서는 두 품종의 성장을 위해서는 양식종과 식물에 적합한 수질 환경을 제공하는 것이 중요하다(FAO, 2014). 특히 pH는 식물 성장에 있어 가장 중요한 요소 중 하나로 식물의 영양염(N, P, K, Ca, S, Mg 등) 흡수 능력에 직접적으로 영향을 미치며, pH 범위를 5-8 내외로 유지하여야 한다(FAO, 2014; Thorarinsdottir, 2015). 본 연구 BFT-AP 실험구에서 pH는 1회 5.25까지 감소한 부분을 제외하고는 6.10-7.52로 유지되어, 아쿠아포닉스 시스템에서 두 품종의 성장이 가능했던 것으로 사료된다(Rakocy et al., 2006; Rakocy, 2007).

본 연구의 BFT-AP 실험구에서 EC 분석 결과는 0.69  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이하로 유지되어 일반적으로 수경재배에서 권고하는 EC 범위(0.5~1.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )였고(FAO, 2014), 식물 뿌리를 둘러싸아 식물의 생육

을 방해하는 바이오 필름 현상은 관찰되지 않았다(Fig. 1). EC는 식물이 사육수 내 영양염류를 간접적으로 나타내는 지표로 식물의 성장을 위해 필수 조건인데 BFT-AP 실험구에서 EC는 BFT 실험구보다 낮게 나타났다. 이는 식물이 사육수 내 무기질이 뿌리로부터 흡수하여 식물 영양분으로 활용되어 소모되었기 때문으로 판단된다(Pinho et al., 2017).

본 연구에서 BFT 실험구에서  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 실험기간 동안 지속적 증가하였으나, 2주 후부터 일정한 수준을 유지하였다. 또한  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 은 실험 초기부터 지속적으로 1 ppm 이하의 수준을 유지한 반면, BFT-AP 실험구에서  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 식물이 성장에 따라 감소하였고,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 은 실험 시작 후부터 지속적으로 증가하는 경향이 나타났다(Fig. 2). 하지만 BFT-AP 실험구는 BFT 실험구에 비하여  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  농도는 50%,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 과  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 은 지속적으로 일정한 수준이 유지되었다. FAO (2014)에 따르면 아쿠아포닉스 시스템에서는 양식생물의 먹이로써 공급된 사료가 종속 및 독립 영양 미생물에 의해 각종 무기물과 질산염으로 분해되는데 이를 식물이 영양분으로 활용함으로써 수질의 안정화와 더불어 식물성장을 촉진시킨다고 보고한 바 있다. 본 연구결과 또한, BFT-AP 실험구는 양식장에서 발생한 질소산화물과 인의 제거에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 수질변화의 변동폭이 일부 구간에서 크게 나타난 부분은 시스템의 안정화 및 BFT 사육수의 사육관리의 어려움을 보여주고 있는 결과로 판단되어 산업화를 위한 표준화 및 많은 사례집이 필요할 것으로 생각된다. 또한 수질변화에 관여하는 미생물에 대한 종 조성 및 우점도에 관한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다(Li et al., 2006).

수경재배 시스템에서 식물의 성장을 위해서는 다량광물질(N, P, K, Ca, S, Mg)과 미량광물질(Fe, B, Cu, Zn, Mn, Mo)을 첨가해주어야 한다(FAO, 2014; Thorarinsdottir, 2015). 본 연구에서 BFT-AP

실험구의 사육수 내 식물 성장에 필요한 미량원소(P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn)를 분석한 결과, HP 실험구에 비해 20~50% 수준으로 나타났지만 미량원소가 부족하면서 나타나는 현상들은 확인되지 않았다([Fig. 3]). 아쿠아포닉스 시스템에서 양식생물에 공급되는 사료에는 식물이 필요로 하는 13종류 영양소(N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Al) 중 10종류는 식물이 성장할 수 있기에 적당한 양이지만, Ca, K, Fe는 매우 부족하기 때문에 식물의 정상적인 성장을 위해서는 추가적으로 공급되어야 한다고 보고되었다(Rakocy, 2007; Bittsanzky et al., 2016).

수경재배 대비 생산성이 낮은 아쿠아포닉스 시스템의 식물생산 문제점을 보완하기 위하여 전용 배합사료를 제조하여 사육수 내 P와 K의 수치를 상승시켜 수경재배와 유사한 업체류 생산성이 가능함을 보고한 바 있다(Lee et al., 2018, 2019). 하지만 본 연구에서는 수경재배 시스템에 비해 낮은 미량원소의 함량에도 인위적으로 미량원소의 첨가 없이도 재배식물의 성장이 충분히 이루어졌는데 이는 BFT 사육수가 재배식물의 양분 공급적인 측면에서 보완이 이루어진 것으로 판단된다([Fig. 4]). 식물 영양학 분야에서는 가장 부족한 영양소에 의해 식물성장이 통제된다는 리비히의 법(Liebig's law)이 정설이었으나 현재에는 개별 영양소의 상호작용에 의한 복잡한 상호관계를 이룬다는 이론으로 대체되고 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 의미로 해석되며, 성장요인에 대한 세밀한 연구가 필요하다고 생각된다.

내수면 양식산업에서 메기, 틸라피아 등을 대상으로 RAS 기반 아쿠아포닉스 시스템에 대한 연구가 증가하고 있지만, 미량원소 등 영양분 부족 등으로 인해 어류와 식물의 성장저해와 같은 문제점이 나타나고 있고 RAS는 초기시설 비용이 많이 드는 한계점을 가지고 있다. 본 연구결과

BFT 사육수에 함유된 다량의 질소화합물과 무기염은 재배식물의 성장을 높임과 동시에 사육수 내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  및  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 을 감소시켜 수질조건을 개선시킴으로써 메기가 성장하는데 상호보완 작용을 한 것으로 사료된다. 따라서 BFT-AP 시스템은 메기의 안정적인 성장과 식물의 영양분 부족으로 인한 성장저해 등 기존의 아쿠아포닉스 시스템의 문제점을 해결하는 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- 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 annum* L. Fiesta). *Koran J Hort Sci Technol*, 29: 29~35.
- 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.
- 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>.
- Bittsanzky 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>.
- Bossier P and Ekasari J(2017). Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. *Microb Biotechnol*, 10: 1012~1016.  
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.12836>.
- Buhmann AK, Waller U, Wecker B and Papenbrock J(2015). Optimization of culturing conditions and selection of species for the use of halophytes as biofilter for nutrient-rich saline water. *Agric Water Manage*, 149: 102~114.

- <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.001>.
- Crab R, Defoirdt T, Bossier P and Verstraete W(2012). Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356: 351~356.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.046>.
- 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.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040>.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2014. Small-scale aquaponic food production integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and aquaculture technical paper, 1~19.
- Gieling TH, Straten GV, 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 Valle MD(2008). Nutrient solution monitoring in greenhouse cultivation employing a potentiometric electronic tongue. *J Agric Food Chem*, 56: 1810~1817.  
<https://doi.org/10.1021/jf073438s>.
- Hargreaves JA(2006). Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquac Engin*, 34: 344~363.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.009>.
- Kim SK, Pang Z, Seo HC, Cho YR, Samocha T and Jang IK(2014). Effect of bioflocs on growth and immune activity of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* Postlarvae. *Aquac Res*, 45: 362~371.  
<https://doi.org/10.1111/are.12319>.
- Lee DH, Kim JY, Lim SY and Kim SG(2018). Environment friendly complex aquaculture technology study. In: 2017 Test research project report. Dongyang printing office. Incheon, Korea, 135~150.
- 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>.
- Li H, Yang M, Zhang Y, Yu T and Kamagata Y(2006). Nitrification performance and microbial community dynamic in a submerged membrane bioreactor with complete sludge retention. *J Biotechnol*, 123:60~70.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2005.10.001>.
- Liang JY and Chien YH(2013). Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. *Int Biodet Biodeg*, 693~700.  
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.03.029>.
- Luo G, Gao Q, Wang C, Liu W, Sun D, Li L and Tan H(2014). Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. *Aquaculture*, 422, 1~7.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.023>
- Mamat NZ, Shaari MI and Wahab NAAA(2016). The production of catfish and vegetables in an aquaponic system. *Fish Aquac J*, 7: 181.  
<https://doi.org/10.4172/2150-3508.1000181>.
- Mariscal-Lagarda MM, Pérez-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>.
- Michael CS and Morgan RP(1983). Acute toxicity of nitric acid to fingerling rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Comp Biochem Physiol*, 76: 227~229.  
[https://doi.org/10.1016/0742-8413\(83\)90069-5](https://doi.org/10.1016/0742-8413(83)90069-5).
- 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](http://www.gemstone.umd.edu/team-sites/classof2014/mega/documents/Rakocy_RAS.PDF) on May 16, 2018.
- Rakocy JE(2007). Ten guidelines for aquaponics systems. 10 th Anniversary Issue. *Aquaponics J*, 46: 1417.
- 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>.
- 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>.
- Park JS, Lee JH, Kim NN, Hwang JA and Kim HS(2021). A study on growth performance and water quality of far eastern catfish (*Silurus asotus*) using biofloc technology (BFT) aquaculture. *The Korea Society for Fisheries and Marine Education*, 33: 367~375.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.4.33.2.367>.
- Pinho SM, Molinari D, Mello GL, Fitzsimmons KM and Emerenciano MGC(2017). Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecol Eng*, 103: 146~153.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.009>.
- Rijn J(2013). Waste treatment in recirculation aquaculture systems. *Aquac Eng*, 53, 49~56.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>.
- Thorarinsdottir RI(2015). *Aquaponics guidelines*. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33~39.
- Tyson RV, Treadwel DD and Simonne EH(2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *Horttechnology*, 21: 6~13.  
<https://doi.org/10.21273/horttech.21.1.6>.
- 
- Received : 27 February, 2022
  - Revised : 29 March, 2022
  - Accepted : 05 April, 2022