KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 54(4), 418-425, 2021

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 54(4),418-425,2021

바이오플락 기반 아쿠아포닉스 시스템 개발에 의한 뱀장어(*Anguilla japonica*)와 재배작물의 성장에 미치는 영향

황주애 · 이정호[1] · 박준성 · 최종렬 · 이동길 · 김형수*

국립수산과학원 첨단양식실증센터, [1]어류육종센터

Effect on Eel *Anguilla japonica* and Crop Growth by the Development of a Biofloc Technology (BFT) Aquaponic System

Ju-Ae Hwang, Jeong-Ho Lee[1], Jun Seong Park, Jong Ryeol Choe, Donggil Lee and Hyeongsu Kim*

Advanced Aquaculture Research Center, National Institute of Fisheries Science, Changwong 51688, Korea
[1]Fish Genetics and Breeding research Center, National institute of Fisheries Science, Geogero 53334, Korea

The effects of an aquaponic system based on biofloc technology (BFT-AP) were analyzed for eel *Anguilla japonica* as aquaculture species and caipira *Lactuca sativa* as the cultivated crops. The rate of weight gain rate by the eels was 178% (BFT-AP 200 head) > 136% (BFT-AP 100 head) > 100% (BFT). The eel body weight in the BFT-AP (200 head) significantly increased when compared to the BFT only eel group ($P<0.05$). The weight of the upper layer of caipira was 91±8.5 g (200 head) > 90±8.9 g (100 head) > 48±8.3 g (Hydroponic crop, HP). The crop growth in all BFT-AP groups was higher than the control, the hydroponic group. The total ammonia nitrogen (TAN) and NO_2^--N concentrations decreased in the BFT-AP group when compared to the BFT group. It was possible to remove nitric acid from the aquaponics system and reuse it as eel rearing water. Although some nutrient concentrations were low in BFT when compared to HP, the nutrient concentration was sufficient for plant growth. The results show that BFT has the potentially to provide a sustainable aquaponic system.

Keywords: Biofloc technology, *Anguilla japonica*, Aquaponics, Caipira

서 론

세계양식생산량은 매년 증가하여 약 8,200만톤으로 보고되어 있으며 수산물소비량 또한 매년 증가하는 추세이다(FAO, 2020). 양식어류의 생산성을 높이기 위해 행해지는 고밀도 양식은 과도한 사료의 투입과 폐기물 처리에 대한 경제적 비용을 증가시킨다. 또한 어분의 생산과 사용에 따른 환경오염문제, 해상 가두리에서 이루어지는 자연환경으로의 무분별한 폐기물 방출, 항생제 남용은 소비자들의 안전한 먹거리에 대한 요구를 증가시킴과 동시에 지속 가능한 양식의 필요성을 증대시키고 있다(Amirkolaie, 2008; Davidson et al., 2012). 최근에는 이러한 문제점들을 해결하면서 양식생산성을 높일 수 있는 방법으로 사육수의 배출이 거의 없는 순환여과시스템(recirculating aquaculture system, RAS)과 바이오플락(biofloc)을 이용한 양식방법이 제안되고 있다(Avnimelech, 2012; Vinatea et al., 2018). 바이오플락양식기술(biofloc technology, BFT)은 지속가능한 친환경적 양식방법으로 제안되어 왔다(Avnimelech, 1999, Avnimelech et al., 2015). BFT는 포도당이나 자당 등을 이용하여 사육수내 탄소와 질소비(C/N 비)를 조절하고 타가영양세균(heterotrophic bacteria)이 우점하도록 하여 사육수내 질소화합물을 제거하여 사육수를 정화시키는 방법이다(Avnimelech, 1999). BFT시스템에서는 타가영양세균의 성장이 빠르게 진행될수록 질소의 흡수를 촉진시키고 biofloc으로 동화시켜 제거할 수 있어 사육수의 교환을 최소화할 수 있는 양식방법으로 알려져 있다(Crab et al., 2012). 또한 BFT 양식시스템에서는 사육수 교환이 최소화될 수 있기 때문에 과도한 영양분이나 병원균으로 인한 환경적 영향을 줄일 수 있다(Emerenciano et al., 2012). 뿐만 아니라 사육수내 형성된 바이오플락

***Corresponding author:** Tel: +82. 55. 540. 2720 Fax: +82. 55. 546. 6292
E-mail address: kimk2k@korea.kr

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

https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0418
Korean J Fish Aquat Sci 54(4), 418-425, August 2021
Received 28 June 2021; **Revised** 16 July 2021; **Accepted** 2 August 2021
저자 직위: 황주애(연구사), 이정호(연구관), 박준성(연구원), 최종렬(연구원), 이동길(연구관), 김형수(연구사)

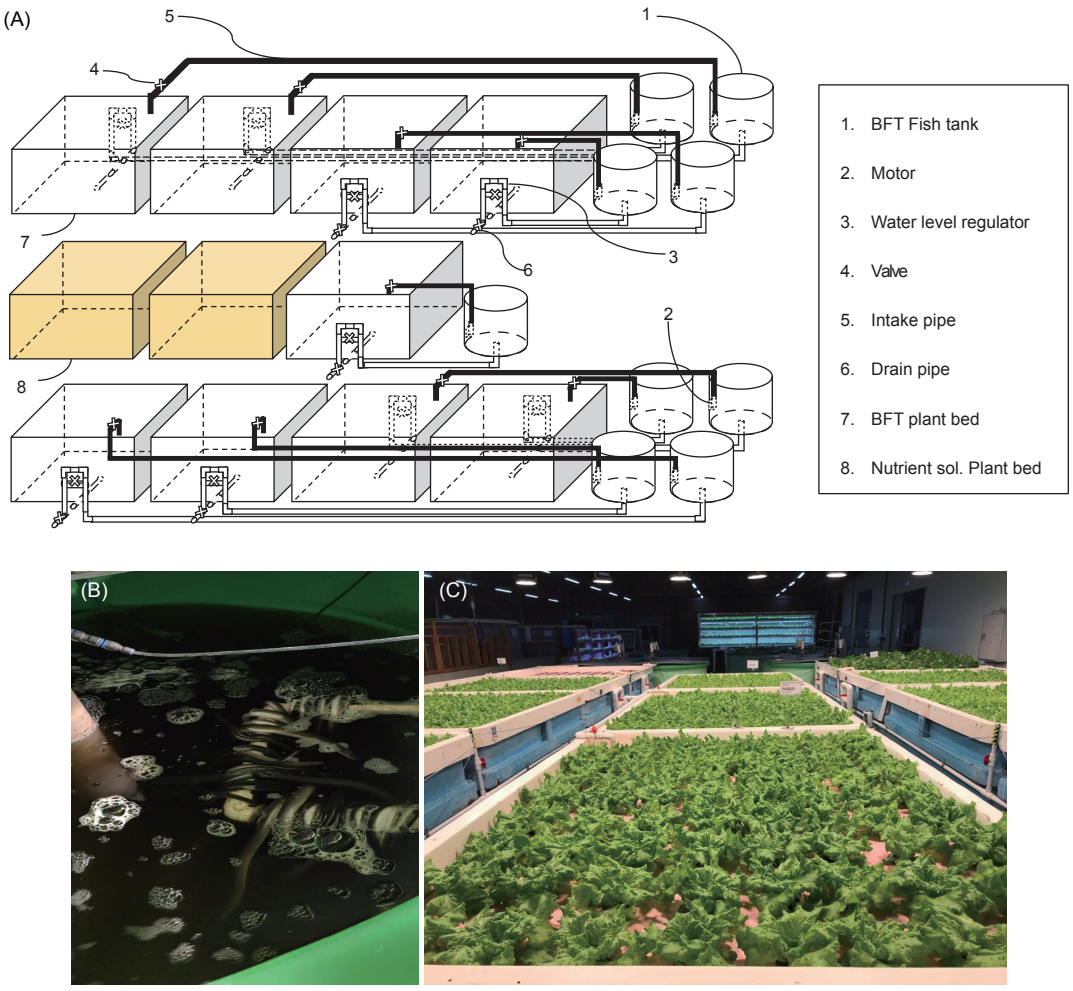

Fig. 1. BFT based aquaponics system. A, aquaponics schematic; B, BFT fish tank; C, DWC (deep water culture) plant bed at 4 weeks.

은 양식생물의 먹이로 활용될 수 있기 때문에 사료효율을 높이고 성장 촉진에 기여한다고 알려져 있어 RAS와 비교해 경제적인 것으로 알려져 있다(Rijin, 2013). 현재까지 메기, 틸라피아 등 다양한 담수어류에서 BFT 고밀도 양식가능성에 관한 연구가 보고되어 있다(Poli et al., 2015; Perez-Fuentes et al., 2016).

아쿠아포닉스(aquaponics)는 수산양식(aquaculture)과 수경재배(hydroponics, HP)를 융합한 생산시스템으로, 수산양식과정에서 발생한 사육수내 무기물질을 재배작물이 성장 영양소로 흡수하면서 사육수질정화와 재배작물성장이 지속적으로 이루어지는 시스템이다. 또한 사육수를 계속 재사용하면서 수산양식과 농작물재배를 동시에 운영할 수 있기 때문에 생태계 물의 순환을 기반으로 한 유기생산법으로 알려져 있다(Endut et al., 2010; FAO, 2014). 아쿠아포닉스는 작물생산과 동시에 물 사용량을 줄일 수 있고 환경으로 배출되는 폐기물을 줄일 수 있는 장점이 있어(Diver, 2006) 미래의 식량생산을 위한 혁신적이고 지속 가능한 생산 방법으로 제안되고 있다(Tyson et al., 2011).

최근 몇 년 동안 메기 및 틸라피아와 엽채류를 대상으로 아쿠아포닉스기술 적용에 관한 연구가 보고되어 있다(Zhen et al., 2015; Kim et al., 2019; Lee et al., 2019). 그러나 BFT를 기반으로 재배작물의 재식량에 따라 극동산 뱀장어의 성장도를 비교한 연구는 아직 보고된 바 없다. 따라서, 이번 연구에서는 BFT 기반 아쿠아포닉스 시스템을 적용하여 엽채류의 재식량에 따른 뱀장어의 성장도를 비교하였다. 본 연구를 기반으로 BFT-AP (aquaponic system based on biofloc technology) 시스템의 적용가능성을 조사하고 바이오플락 양식과 아쿠아포닉스 기초자료로 제공하고자 한다.

재료 및 방법

바이오플락 기반 아쿠아포닉스 시스템

뱀장어 및 재배작물을 재배하기 위한 시스템은 Fig. 1과 같다. 뱀장어 성장비교를 위한 사육 실험구는 BFT (대조구)와

BFT 기반 아쿠아포닉스(BFT-AP)의 두 가지 실험구를 대상으로 FRP (Fibre-reinforced plastic) 수조(Ø 1.2 m×H 1.0 m)를 사용하여 실험을 진행하였고, 재배작물의 성장비교를 위해 수경재배(hydroponics, HP)와 BFT-AP 실험구를 대상으로 사각 FRP 수조(W 1.2 m×L 1.0 m×H 0.8 m)를 사용하여 실험을 진행하였다. 뱀장어 사육수조에서 재배작물 베드로의 물순환을 위해 펌프(30 w)를 각 수조당 1개씩 설치하였고 광공급을 위해 LED 조명을 설치하였다. 재배작물 재배 베드는 베드당 총 100개씩의 포터로 구성되어 총 800개의 재배지로 구성되었다. 실험기간 동안 인공광은 14시간/일 조사하였으며 일평균 6000 lux 이상 공급하였고, 온도는 24±1.0°C를 유지하였다. BFT 사육수는 Choi et al. (2020)이 제안한 방법에 따라 제조하였으며, 물 만들기가 4주된 시점에 암모니아와 아질산염이 1 mg/L 이하로 안정된 것을 확인하고 뱀장어를 입식하여 1주간 순치시킨 후 실험에 사용하였다. 수경재배(HP)를 위한 실험구에는 재배베드당 100개씩 총 200개를 재식 하였고 재배작물에 필요한 인공양액은 물푸레(Dae-yu, Seoul, Korea) 1호(A액, B액)를 100 m^2 당 1-3 L의 농도로 공급하였고, BFT-AP 실험구와 동일한 조건(6000 lux, 24±1.0°C)으로 생육환경을 제공하였다.

실험어 및 재배작물

실험어로 사용된 극동산뱀장어(*Anguilla japonica*)는 실뱀장어 시기에 일반양식장에서 구입하여 진해 첨단양식실증센터에서 사육 관리하던 개체들 중 평균 20-40 g의 개체를 선별하여 실험구 각 수조에 단위면적당 5 kg/m^2 (총 5.7 kg)를 수용하였다. 사육실험은 BFT와 재배작물의 재식량에 따라 두 그룹으로 나누어 2반복으로 4주간 사육하여 성장을 비교하였다.

뱀장어 사육을 위해 사용된 실험사료는 Purina 양어사료의 프로일 F-GR 뱀장어사료 흑자(건물 94.8%, 단백질 55.8%, 지질 7.8%, 회분 13.8%)를 사용하였다. 사료 공급량은 어체중의 3%를 4주동안 1일 2회 공급하였다.

재배작물로는 엽채류인 카이피라(*Lactuca sativa*)를 선정하였으며, 실험에 사용된 종묘는 첨단양식실증센터 발아실(온도 24±1.0°C, 습도 55%, 광도 15,000 lux)에서 발아시킨 종묘를 사용하였다. BFT 뱀장어 사육수로 재배 가능한 재배작물의 재식량을 알아보기 위해 재식량은 100포기/m^2, 200포기/m^2로 재식하였다.

실험어와 재배작물의 측정

뱀장어의 측정은 4주간의 실험 종료 후 실험구별로 총 무게를 측정하고 무작위로 30마리를 포획하여 개체의 평균 무게 및 전장을 측정하였다. 실험어의 안정적인 측정을 위해 마취제(MS-222; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 100 ppm 용량으로 제조하여 뱀장어를 마취하였다. 전자저울(MW-200; CAS, Seoul, Korea)을 사용하여 무게를 측정하였고, 실험어가 마취에서 깨어난 후 별도의 회복조에 수용한 후 사육관리 하였다. 실험시작 및 종료 시 무게를 바탕으로 증체율(weight gain rate, WGR), 일일성장률(specific growth ratem, SGR) 및 사료효율(feed coefficient rate, FCR)을 분석하였다. 카이피라의 측정은 각 그룹별로 20개체씩 샘플링 하여 각각의 총 중량, 총 길이, 엽중량, 엽길이, 엽갯수를 측정하였다.

수질분석

사육수의 수질측정을 위해 용존산소(dissolved oxygen, DO), pH, 수온, 전기전도도(electrical conductivity, EC)을 다항목 수질측정기(YSI-650 Inc.; Yellow spring Instruments, Yellow Springs, OH, USA)를 이용하여 주 5회 측정하였다. NH_4^+-N (ammonia nitrogen), NO_2^--N (nitrite nitrogen), NO_3^--N (nitrate nitrogen)은 사료 공급전에 채수하여 분석 시약키트(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)로 분석하여 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법으로 분석(2회/주)하였다. BFT-AP 실험구와 HP 실험구의 사육수 내 미량원소(mg/L) 분석 중 Total-N, Total-P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Si는 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES Optima 8300; Perkin Elmer Co., Waltham, MA, USA)로, Cl, SO_4는 이온크로마토그래피(930 Comact IC Flex; Metrohm Co., Herisau, Switzerland)를 사용하여 분석하였다.

통계분석

실험구간의 결과에 대한 유의성 검증은 SPSS (SPSS 5.5; SPSS Inc., Chicago, IL, USA) program을 사용하여 one-way ANOVA-test를 실시하였고, Duncan's multiple range test (Duncan, 1955)로 평균 간의 유의성을 검정하였다($P<0.05$).

결 과

뱀장어의 성장

바이오플락 기반의 아쿠아포닉스(BFT-AP) 시스템에서 뱀장어(*A. japonica*)를 4주간 사육 실험한 결과(Table 1), 뱀장어의 평균 무게는 BFT (44.7±30.3 g)와 비교했을 재배작물을 100포기재식한 수조에서 52.4±24.3 g, 200포기에서 62.6±42.3 g으로 재배작물의 재식량이 많은 BFT-AP 실험구 뱀장어의 성장이 좋았다. WGR 또한 178% (BFT-AP, 200포기/m^2)>136% (BFT-AP, 100포기/m^2)>100% (BFT)순으로 재식량이 높은 BFT-AP 실험그룹에서 성장률이 높았고 유의한 수준에서 차이가 나타났다($P<0.05$). FCR은 BFT에서 1.57, BFT-AP 뱀장어에서 각각 1.15 (100포기/m^2) 과 0.88% (200포기/m^2)이었다. 생존율은 BFT 실험구에서 97.7%, BFT-AP (100포기/m^2) 실험구에서 96.5%, BFT-AP (200포기/m^2) 실험구에서 98.5%로 모든 실험구에서 높게 유지되었다.

재배작물의 성장

BFT 뱀장어 사육수로 재배 가능한 카이피라의 재식량 및 성장을 알아보기 위해 재배작물의 재식량을 달리하여 4주 후 재

배작물의 성장을 측정하였다. 비교한 결과는 Table 2와 같다. 4주 후 성장을 측정한 결과, 총 중량은 수경재배(HP) 실험구에서 62±6.5 g, BFT-AP (100포기/m^2) 실험구에서 109±9.7 g, BFT-AP (200포기/m^2) 실험구에서 112±8.6 g이었고, 엽중량은 HP 실험구에서 48±8.3 g, BFT-AP (100포기/m^2) 실험구 90±8.9 g, BFT-AP (200포기/m^2) 실험구 91±8.5 g으로 HP 실험구와 비교했을 때 약 87% 성장이 좋았다. 엽길이는 HP 실험구에서 127±13 mm, BFT-AP (100포기/m^2) 실험구 151±9.4 mm, BFT-AP (200포기/m^2) 실험구 155±9.6 mm로 HP 실험구보다 약 22% 성장이 좋았다. 또한 엽수에서도 HP 실험구에서 13±1.6, BFT-AP (100포기/m^2) 실험구 17±2.9, BFT-AP (200포기/m^2) 실험구에서 17±0.8으로 BFT-AP 실험구와 비교하여 엽수가 많았다.

수질분석

실험 기간 동안 HP, BFT, BFT-AP, 실험구에 대한 수질분석결과는 Table 3과 같다. 수온은 HP에서 22.7±0.23℃, pH 6.1±0.9, DO 5.85±1.65 mg/L, EC 0.64±0.36 μs/cm로 유지되었고, BFT는 23.7±0.22℃, pH 6.36±0.28, DO 8.17±0.59 mg/L, EC 1.1±0.2 μs/cm으로 HP 실험구보다 높게 유지되었다. BFT-AP (200포기/m^2) 실험구의 경우에는 23.9±0.12℃, pH 5.72±0.49, DO 8.68±0.54 mg/L, EC 0.95±0.67 μs/cm로 유지되었고, BFT-AP 실험구 그룹 간의 큰 차이는 없었다.

각 실험구의 수질분석 결과는 Fig. 2와 같다. NH_4^+-N는 세 그룹 모두에서 점차 감소하는 경향을 나타내어 4주차에는 BFT실험구에서 0.17 mg/L, BFT-AP (100포기/m^2) 실험구에서 0.17 mg/L, BFT-AP (200포기/m^2) 실험구에서 0.14 mg/L로 낮게 유지되었다. NO_2^--N 역시 암모니아와 비슷한 경향을 보였고 실험 4주차에는 모든 그룹이 0.2 mg/L이하의 낮은 수치를 나타냈다. NO_3^--N는 특히 BFT-AP (200포기/m^2) 실험구에서 실험 4주차에 19.9 mg/L로 세 실험구 중에 가장 낮게 유지되었다.

사육수내 이온함량 분석

각 실험구의 이온함량 분석 결과는 Table 4와 같다. BFT 실험구의 N은 77.4 mg/L, P는 24.24 mg/L, Na는 16.75 mg/L, K는 17.65 mg/L, Ca는 67.29 mg/L, Mg는 16.5 mg/L, Fe는 0.126 mg/L, Mn는 0.09 mg/L, Zn는 0.539 mg/L, Cu는 0.13 mg/L, S는 84.01 mg/L, Cl는 37.97 mg/L, Si는 13.43 mg/L으로 수경재배(HP)의 이온농도와 비교했을 때 K (48.51 mg/L>17.65 mg/L), Ca (72.16 mg/L>67.29 mg/L), Fe (0.726 mg/L>0.126 mg/L)을 제외하고 BFT실험구에서 모든 이온이 높은 농도를 나타냈다. BFT-AP 실험그룹에서 이온농도의 분석결과, BFT 사육수의 농도보다 대부분 감소하는 경향을 나타냈다. Na, Mg, S은 여전히 HP 실험구 보다 높았고, 나머지 이온들은 HP 실험구보다 낮은 농도를 나타냈다. 이러한 결과는 BFT 사육수의 영양분을 재배작물이 흡수하여 성장에 사용하였기 때문인 것으로 사료된다. 재배작물의 성장에 있어 미량원소로 알려져 있는 Zn과 Cu는 HP에는 검출되지 않았지만, BFT 사육수에는 미량으로 존재하는 것으로 확인되었다.

고 찰

본 연구에서는 바이오플락 기반 아쿠아포닉스(BFT-AP) 시스템에서 재배작물의 재식량을 달리하여 뱀장어와 재배작물의 성장을 조사하였고 BFT-AP 시스템의 뱀장어 양식 적용가능성을 확인하였다. BFT-AP 실험구에서 뱀장어의 성장률은 재식량에 따라 각각 136% (100포기), 178% (200포기)로 재식량이 많은 실험구에서 성장이 빨랐다. 순환여과시스템에서 유럽산

Table 1. The growth performance of *Anguilla japonica* in BFT and BFT-AP systems for 4 weeks

Groups	Survival rate (%)	Intial Weight (g)	Final Weight (g)	Final total weight (kg)	WGR[3] (%)	SGR[4] (%)	FCR[5]
BFT[1]	97.7±1.1^{ns}	21.8±2.5^{ns}	44.7±30.0^{a}	8.9±0.1^{a}	100±3.1^{a}	2.39±0.1^{a}	1.5±0.1^{a}
BFT-AP[2] (100 head)	98.5±1.2	21.7±2.4	52.4±24.3^{a,b}	13.6±0.6^{a,b}	136±4.2^{b}	2.93±0.2^{b}	1.15±0.6^{a,b}
BFT-AP (200 head)	96.6±1.3	21.8±2.3	62.6±42.3^{b}	15.9±1.0^{a,b}	178±3.2^{b}	3.52±0.3^{b}	0.88±0.1^{a,b}

[1]BFT, biofloc technoloyg. [2]BFT-AP, aquaponics based on biofloc technoloyg. [3]WGR (weight gain rate)=(final weight-initial weight)/initial weight×100%. [4]SGR (specific growth rate)=(ln final weight-ln initial weight)/days×100%. [5]FCR (Feed coefficient rate)=Feed consumption/unit weight of increase. The data correspond to the mean of 3 replicates±standard error and data in rows denoted with different letters were statically different (P<0.05), ns, no significant.

Table 2. The growth of Caipira *Luctuca sativa* in BFT-AP systems for 4 weeks

Group	Total weight (g)	Leaf weight (g)	Total length (mm)	Leaf length (mm)	Leaf No.
HP[1]	62±6.5^{a}	48±8.3^{a}	446±60.7^{a}	127±13^{a}	13±1.6^{a}
BFT-AP[2] (100 head)	109±9.7^{b}	90±8.9^{b}	511±51.1^{a,b}	151±9.4^{b}	17±2.9^{b}
BFT-AP[2] (200 head)	112±8.6^{b}	91±8.5^{b}	546±35.3^{b}	155±9.6^{b}	17±0.8^{b}

[1]HP, hydroponics. [2]BFT-AP, aquaponics based on biofloc technology. Data presented as a mean ±SD. The data in rows denoted with different letters were statically. different (P<0.05).

뱀장어(65.7 g)를 대상으로 밀도를 달리하여 39일간 사육한 결과 74.7 g으로 성장하였고 밀도에 따른 유의적인 성장 차이는 없었다고 보고했다(Mota et al., 2015). Lee et al. (2020)에 따르면 Hybrid BFT 아쿠아포닉스에서 뱀장어(180-250 g)의 증체율은 5.8%로 보고한바 있다. BFT사육시스템에서 실뱀장어(*Anguilla bicolor*) 시기의 경우 밀도와는 유의적인 차이가 없으나 성장률 및 사료효율이 향상되었다고 보고하였다(Sukardi et al., 2018). 보고된 연구자료들과 비교했을 때 뱀장어의 성장은 BFT와 BFT-AP 실험구에서 성장률이 높아 시스템의 활용가능성을 확인하였다.

바이오플락 시스템의 담수어류에 관한 적용가능성이 보고된 이후로(Avnimelech, 1999) 메기, 틸라피아, 잉어 등 주요 내수면어류의 성장에 관한 연구가 보고되어왔다(Poli et al., 2015; Wang et al., 2015; Perez-Fuentes et al., 2016; Pinho et al., 2017). 하지만, 바이오플락 시스템에서 미성어 시기 극동산 뱀장어의 성장에 관한 연구는 아직 보고된 적이 없다. 본 연구결과, BFT-AP 시스템의 뱀장어 생존율은 96-98%로 높게 유지되었고, FCR 또한 BFT실험구에서 1.57, BFT-AP실험구에서 각각 1.15 (100포기), 0.88 (200포기)로 낮게 유지되는 것을 확인하였다.

재배작물은 양식폐기물을 처리하는 생물학적 필터역할을 하고 그 물은 재순환되어 양식사육수로 사용된다. 순환여과식 뱀

Table 3. Physical parameters of water quality in HP and BFT-AP for 4 weeks

Group	Temperature (°C)	DO (mg/L)	pH	EC (μs/cm)
HP	22.7±0.23	5.85±1.65	6.1±0.90	0.64±0.36
BFT	23.7±0.22	8.17±0.59	6.36±0.28	1.10±0.23
BFT-AP (100 head)	24.0±0.06	7.67±0.30	5.18±1.03	0.94±0.40
BFT-AP (200 head)	23.9±0.12	8.68±0.54	5.72±0.49	0.95±0.67

HP, hydroponics; BFT, biofloc technology; BFT-AP, aquaponics based on biofloc technology; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity.

Table 4. Nutrient mineral element concentrations in HP and BFT-AP for 4 weeks

Nutrient	Group			
	HP	BFT	BFT-AP (100head)	BFT-AP (200head)
Total-N (mg/L)	67.87	77.40	32.44	26.68
Total-P (mg/L)	5.67	24.24	9.10	6.81
Na (mg/L)	15.94	125.49	100.26	99.77
K (mg/L)	48.51	17.65	1.23	0.33
Ca (mg/L)	72.16	67.29	40.27	37.48
Mg (mg/L)	9.41	16.50	15.66	9.41
Fe (mg/L)	0.73	0.126	0.12	0.13
Mn (mg/L)	0.09	0.09	0.04	-
Zn (mg/L)	-	0.54	0.25	0.16
Cu (mg/L)	-	0.13	0.08	-
S (mg/L)	42.20	84.01	60.39	58.05
Cl (mg/L)	34.66	37.97	29.00	27.18
Si (mg/L)	13.39	13.43	12.95	13.31

-, Not detected; HP, hydroponics; BFT, biofloc technology; BFT-AP, aquaponics based on biofloc technology.

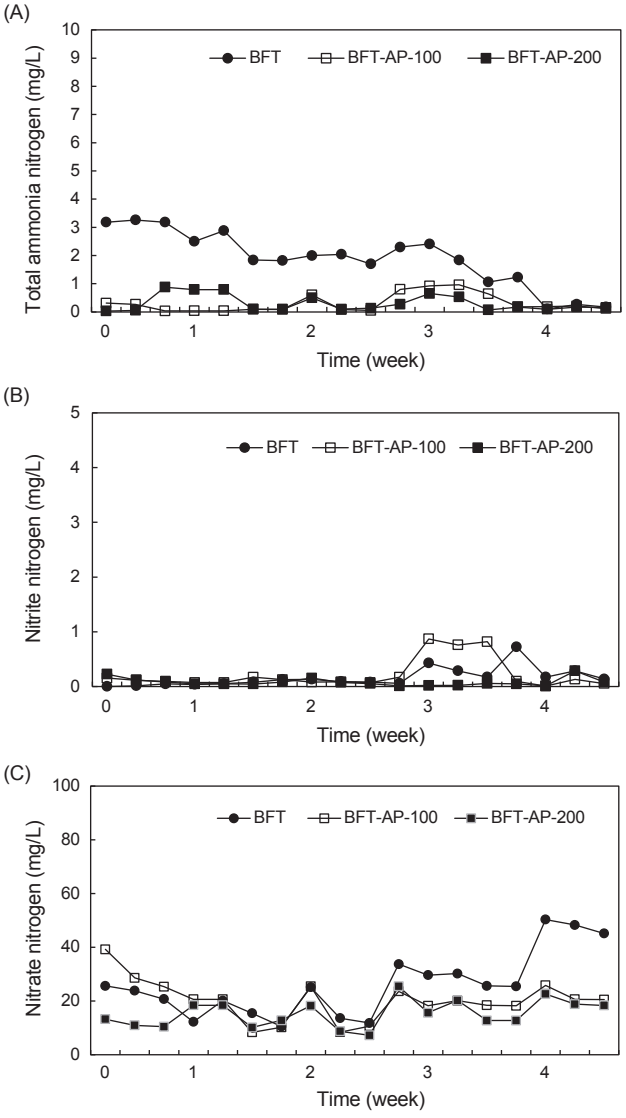

Fig. 2. Change of water quality by BFT (biofloc technbology), and BFT-AP (aquaponics based on BFT-AP) system for 4 weeks (A, NH_4^+-N; B, NO_2^--N; C, NO_3^--N). BFT-AP-100; aquaponics based on BFT-AP-100 head, BFT-AP-200; aquaponics based on BFT-AP-200 head.

장어 양식에서 고농도(250-900 mg/L)의 NO_3^--N이 수질악화 및 박테리아 감소에 미치는 영향에 관한 보고가 되어있다(Madsen et al., 2000). 본 연구에서 수질분석결과 BFT-AP 시스템의 NH_4^+-N 및 NO_2^--N은 0.2 mg/L 이하의 낮은 수준으로 유지되어 실험기간 동안 사육수의 수질개선과 뱀장어의 성장에 도움이 된 것으로 보인다.

대부분 아쿠아포닉스는 재배작물을 통해 유기물을 흡수하기 때문에 상대적으로는 적은 양의 물을 사용하여 어류의 생산량을 높일 수 있는 순환여과시스템을 사용한다(Goddeck et al., 2016). 수경재배를 위해서는 양분의 부족문제를 해결하기 위해 추가적인 양액의 공급이 필요하며, 때문에 사용된 폐양액의 배출은 지하수 오염이나 녹조현상 같은 다양한 환경문제를 일으키는 원인이 된다(Rajesh et al., 2014; Lee and Kim, 2019). 바이오플락 기반의 아쿠아포닉스의 경우 추가적인 인공양액의 첨가가 필요하지 않아 경제적이며 또한 완전 순환식 시스템으로 비순환식 수경재배의 단점인 배출되는 배액이 없어 친환경적이다. BFT-AP 실험구에서 4주후 카이피라의 성장은 HP 실험구(62 g)와 비교했을 때 200포기 재식한 실험구에서 112 g으로 성장이 빨랐다. 사육수내 EC 역시 BFT 실험구에서 평균 1.1 µs/cm, BFT-AP 실험구가 0.9 µs/cm으로 FAO가 수경재배에서 권고하는 범위인 0.5 µs/cm (FAO, 2014) 이상으로 재배작물성장에 충분한 조건을 유지하고 있었다.

Hybrid BFT-AP 시스템을 적용한 뱀장어 사료실험에서 아쿠아포닉스 연구결과에 따르면 일부 그룹에서 성장지연 및 영양분의 부족(황백화현상)이 관찰되었다고 보고되어 있다(Lee et al., 2020). 하지만, BFT-AP 시스템에서는 영양분의 부족현상이나 성장지연 등의 현상이 관찰되지 않았다. Ca, K, Fe, P은 아쿠아포닉스 시스템에서 재배작물성장에 있어 부족하다고 알려져 있는 영양소이며 때문에 인위적인 첨가가 필요하다고 보고하고 있다(Rakocy, 2012; Bailey and Ferrarezi, 2017). BFT 사육수내 무기이온의 성분 분석 결과에서도 역시 Ca, K, Fe가 HP 실험구보다 낮게 관찰되었다. 하지만 나머지 영양분의 농도는 HP 보다 높았다. 그리고, 흥미로운 점은 BFT-AP 재배작물 수조의 대부분 이온농도가 BFT 사육수의 농도보다 낮은 것으로[N의 경우, BFT, 77.40 mg/L; BFT-AP (100포기/m^2), 32.44 mg/L; BFT-AP (200포기/m^2), 26.68 mg/L] 관찰되어 BFT-AP 사육수내 영양분을 재배작물의 성장에 사용한 것으로 생각된다.

재배작물의 성장을 위해서는 Ca, K, Fe의 추가적 공급이 필수적이라 보고되어 있으나(Rakocy, 2012; Bailey and Ferrarezi, 2017) 본 연구에서는 실험 종료 시까지 미량원소 부족으로 나타나는 결핍현상이나 성장의 지연은 관찰되지 않았다. K은 재배작물에 있어 뿌리나 줄기 발달 등 성장에 있어 중요한 역할을 한다고 알려져 있다(Thorarinsdottir, 2015). 본 연구결과에서 K 농도는 HP 실험구에서는 48.51 mg/L, BFT 실험구에서 17.65, BFT-AP (100포기)실험구에서 1.23 mg/L, BFT-AP (200포기) 실험구에서 0.33 mg/L으로 BFT 사육수내 K의 농도가 재배작물의 재식량에 따라 줄어든 것으로 추측해 볼 때 BFT 사육수내 존재하는 K의 농도만으로도 재배작물의 성장에 충분했던 것으로 생각된다.

아쿠아포닉스에서 재배작물의 성장에는 미량원소와 영양분 사이의 상호작용이 중요하다고 알려져 있지만(Baxter, 2015) 부가적으로 사육수내 미생물의 군집 및 그들 간의 상호작용도 중요하다고 보고되어 있다(Goddek et al., 2016). 양식에 있어 바이오플락의 효과로 성장, 면역 등의 기능이 보고되어 있지만, 그 기작은 아직 명확하게 알려지지 않고 있다(Kim et al., 2014). 추후 연구에는 BFT-AP 시스템내 미생물과 무기이온의 상호작용에 따른 양식생물의 성장에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 국립수산과학원 수산과학 시험연구과제 '바이오플락을 이용한 담수양식 기술개발(R2021015)'의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

Amirkolaie AK. 2008. Environmental impact of nutrient discharged by aquaculture waste water on the Haraz River. J Fish Aquat Sci 3, 275-279. https://doi.org/10.3923/jfas.2008.275.279.

Avnimelech Y. 1999. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture stystem. Aquacult 176, 227-235. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X.

Avnimelech Y. 2012. Biofloc technology: a practical guidebook. The World Aquaculture Society Press, Baton Rouge, LA, U.S.A., 181.

Avnimelech Y, De-Schryver P, Emmereciano M, Kuhn Ray A and Taw N. 2015. Overview of aquaculture systems. In: Biofloc technology. Tomasso J, ed. The World Aquaculture Society Press, Baton Rouge, LA, U.S.A., 9-20.

Bailey DS and Ferrarezi RS. 2017. Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponics system. Aquac Rep 7, 77-82. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002.

Baxter I. 2015. Should we treat the ionome as a combination of individual elements or should we be deriving novel combined traits?. J Exp Bot 66, 2127-2131. https://doi.org/10.1093/jxb/erv040.

Choi JY, Park JS, Kim HS, Hwang JA, Lee DG and Lee JH. 2020. Assessment of water quality parameters during a course of applying biofloc technology (BFT). JFMSE 35, 1632-1638. http://doi.org/10.13000/JFMSE.2020.12.32.6.1632.

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.
Davidson K, Pan M, Hu W and Poerwanto D. 2012. Consumers' willingness to pay for aquaculture fish products vs. Wild-caught seafood- a case study in Hawaii. Aquaculture Economic Management 16, 136-154. https://doi.org/10.1080/13657305.2012.678554.
Diver S. 2006. Aquaponics-integration of hydroponic with aquaculture. Appropriate technology transfer fir rural areas (ATTRA). Fayetteville, NC, U.S.A., 1-28.
Duncan DB. 1955. Multiple-range and multiple F tests. Biometrics 11, 1-42. https://doi.org/10.2307/3001478.
Emerenciano M, Ballester ELC, Cavalli RO and Wasielesky W. 2012. Biofloc technology application as a food source in a limited water exchange nursery system for pink shrimp *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817). Aquac Res 43, 447-457. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02848.x.
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 aquaponics 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, FAO, Rome, Italy, 1-19.
FAO (Food and Agriculture Organization). 2020. The state of world fisheries and aquaculture. FAO, Rome, Italy, 1-224.
Goddek S, Schmautz Z, Scott B, Delaide B, Keesman KJ, Wuertz S and Junge R. 2016. The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. Agronomy 6, 37. https://doi.org/10.3390/agronomy6020037.
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.
Kim SR, Jang JW, Kim BJ, Jang IK, Lim HJ, Kim SK, Seo HC, Cho YR, Samocha T and Jang IK. 2019. Urban aquaculture of catfish *Silurus asotus*, using biofloc and aquaponics systems. Korean J Environ Biol 37, 545-553. https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.4.545.
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.
Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim KB, Kim JM, Hariati, Kim DW and Kim JD. 2020. Effect of crude protein levels in diets containing MKP on water quality and 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 SY and Kim YC. 2019. Water treatment for closed hydroponics systems. J Korean Soc Environ Eng 41, 501-513. https://doi.org/10.4491/KSEE.2019.41.9.501.
Madsen HCK, Buchmann K and Mellergaard S. 2000. Association between trichodiniasis in eel *Anguilla Anguilla* and water quality in recirculation system. Aquaculture 187, 275-281. https://doi.org/10.1016/S0044-8486 (00)00323-9.
Mota VC, Peter L, Catrarina IM and EP HE. 2015. The effect of nearly closed RAS on the feed intake and growth of nile tilapia *Oreochromis nilotiscus*, African catfish *Clarias gariepinus* and European eel *Anguilla anguilla*. Aquac Eng 68, 1-5. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.06.002.
Poli MA, Rodrigo S and Alex Pires DON. 2015. The use of biofloc technology in a south American catfish *Rhamdia quelen* hatchery: Effect of suspended solids in the performance of larvae. Aquac Eng 66, 17-21. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.01.004.
Pinho SM, D Molinari, 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.
Perez-Fuentes JA, Hernandez MP, Carlos I and Perez-Rostro JA. 2016. C:N ratios affect nitrogen removal and production of nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in abiofloc system under hight density cultivation. Aquaculture 452, 247-251. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.010.
Sukardi P, Prayogo NA, Winanto T, Siregar AS and Harisam T. 2018. Nursery I: The effect of stocking density on the performance of glass eels, *Anguilla bicolor* in the biofloc system. In: 2nd scientific communication in fisheries and marine sciences (SCiFiMaS 2018). E3S Web of Conf 47, 02009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184702009.
Rijin JV. 2013. Waste treatment in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 53, 49-56. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010.
Rajesh Kumar R and Cho JY. 2014. Reuse of hydroponic waste solution. Environ Sci Pollut Res I 16, 9569-9577. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3024-3.
Rakocy JE. 2012. Aquaponics-integrating fish plant culture in aquaculture production systems. In: Aquaculture production systems. Tidwell JH, ed. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, U.S.A., 344-386. https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch14.
Thorarinsdottir RI. 2015. Aquaponics guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33-39.
Tyson Richard V, Treadwell Danielle D and Simonne Eric H. 2011. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. Horttechnology 21, 6-13. https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6.
Vinatea L, Malpartida Carbo R, Andree, KB, Gisbert E and Estevez Al. 2018. A comparison of recirculation aquaculture systems versus biofloc technology culture system for on-

growing of fry of *Tinca tinca* (Cyprinidae) and fry of grey *Mugil cephalus* (Mugilidae). Aquaculture 482, 155-161. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.09.041.

Wang G, Yu E, Xie J, Yu D, Li Z, Luo W and Zheng Z. 2015. Effect of C/N ratio on water quality in zero-water exchange tanks and the biofloc supplementation in feed on the growth performance of crucian carp *Carassius auratus*. Aquaculture 443, 98-104. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.03.015.

Zhen H, Lee JW, Chandran K, Kim SP and Brotto AC. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. Bioresour Technol 188, 92-98. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013.