

바이오플락과 아쿠아포닉스를 이용한 도심형 양식시스템에서의 메기양식

김석렬, 장진우, 김범주, 장인권, 임현정¹, 김수경*

국립수산과학원 서해수산연구소, ¹국립수산과학원 동해수산연구소

Urban aquaculture of catfish, *Silurus asotus*, using biofloc and aquaponics systems

Seok Ryel Kim, Jin Woo Jang, Bum Ju Kim, In Kwon Jang, Hyun Jeong Lim¹ and Su Kyoung Kim*

West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Incheon 22383, Republic of Korea

¹East Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Gangneung 25435, Republic of Korea

***Corresponding author**

Su Kyoung Kim
Tel. 041-675-3773
E-mail. sk6333@korea.kr

Received: 22 July 2019

First Revised: 6 October 2019

Second Revised: 13 November 2019

Revision accepted: 14 November 2019

Abstract: This study was conducted to determine whether the water in which nitrate accumulated during long-term fish culture in an aquaponics system without water exchange could be removed and reused as catfish-culturing water. The catfish (*Silurus asotus*) were cultured in the urban aquaculture system using BFT (Biofloc Technology) aquaculture and an aquaponics system (two rearing tanks, 3 tons each) without exchanging the rearing water. After 151 days (from March to August) of rearing, 2.8 g of fry had grown to an average weight of 171.3 g (total weight, 56.53 kg) and 235.5 g (total weight 71.1 kg), respectively. The overall survival rate was 65% in the urban aquaculture system. However, the survival rate was 77.7% before separation into the two tanks. The survival rates after the separation were 92.9% and 78.0%. In the early biofloc water-making process, there was a high mortality rate. After water stabilization, the mortality rate decreased and some mortality occurred during the period when the total amount of suspended solids (TSS) increased. The results of monthly blood analysis of the catfish showed that the AST concentration was significantly higher in April. Blood ALT levels and triglycerides showed no difference in the rearing period and the glucose, cholesterol, and total protein levels were significantly higher in July. There was no difference in the other periods. The plants produced by the aquaponics system using catfish-rearing water were lettuce, basil, chard, and red chicory. These showed smooth growth and a total of 148.85 kg of plants were harvested in five months. It was possible to remove nitric acid from the aquaponics system and reuse it as catfish-rearing water. Maintaining proper plant quantity according to the capacity of the catfish showed that the combination of agricultural and aquatic products was possible.

Keywords: biofloc, aquaponics, catfish, urban aquaculture

서 론

기존 해안에 위치한 양식지와 달리 도심 내에서 이루어지는 양식을 의미하는 도심형 양식시스템(urban aquaculture)은 생산지가 곧 소비지로서 신선도 확보, 물류비용 절감 등의 장점을 갖고 있지만, 제한된 공간과 높은 건축비용, 폐기물 처리 등 관리비용을 포함한 높은 생산비가 해결되어야 할 문제점을 안고 있다. 도심양식에서 사용된 양식 사육수는 양식생물의 배설물 등이 포함되어 폐수로 처리해야 함으로 많은 비용이 들어가고, 공간도 제한되어 넓은 면적을 수반하는 기존 양식방법으로는 생산가능하지 않다. 이에 도심양식에서는 사육수를 재사용할 수 있는 시스템과 공간은 다층구조로 설계하여 공간면적을 최대한 활용함으로써 단위면적당 생산량을 증가시켜 경제성을 확보하여야 한다(Ryu *et al.* 2011; Despommier 2013).

도심양식에서 투자비용과 관리의 용이성을 고려하여 외각양식(perri-urban aquaculture)이 이루어지기도 하며 영양분이 풍부한 양식 사육수를 농업에 접목하여 식량을 생산하는 시스템으로 유지하기도 한다(Edwards 2003). 또한, 도심양식에서 적은 양의 물을 사용하면서 지속적으로 양식이 가능하도록 하는 것이 중요한 성공요인이며, 사육수를 폐수 처리하지 않고 재활용하는 양식기술로는 순환여과시스템과 바이오플락 시스템이 대표적이다(Rijn 2013).

바이오플락 양식시스템은 사육수의 교환 없이 증발하는 수량만큼 물을 보충하면서 바이오플락 미생물을 이용하여 양식어류에 유해한 질소화합물인 암모니아, 아질산을 분해하고 비교적 독성이 적은 질산의 농도가 생물에 생존에 영향을 미치지 않는 범위로 유지하면서 시스템을 운영한다. 바이오플락 양식은 새우에 접목되어 타가세균과 자가세균의 균형을 이룬 혼합영양 상태에서 간접적으로 바이오플락을 섭취하여 양식생물의 면역력 증가, 성장 촉진 등의 장점이 있지만(Kim *et al.* 2014), 장기간에 걸쳐 사육수에 제거되지 않고 축적된 질산이 생물에 영향을 미치기도 한다(Michael and Morgan 1983; Hargreaves 2006; Crab *et al.* 2012; Bossier and Ekasari 2017). 한편으로 양식 사육수에 축적되는 질소와 인산 등(Buhmann *et al.* 2015)은 종종 사육수 부영양화를 야기하는 원인이 되며, 양식시스템에서 이들 성분을 제거하는 한 방법으로 아쿠아포닉스 시스템을 결합시켜 식물을 재배함으로써 그 농도를 낮추기도 한다. 아쿠아포닉스 시스템을 활용한 친환경적 질소화합물 제거는 농업과 수산업이 융합된 대표적 시스템

이며, 친환경 양식생산이라는 점에서 주목을 받고 있고 다양한 연구가 진행이 되고 있다(Mamat *et al.* 2016; Pinho *et al.* 2017).

바이오플락 양식기술은 양성기간 동안 사육수를 교환하지 않고 미생물을 이용하여 수질을 안정화하는 기술로 높은 부유물농도(SS; suspended solid)에도 서식이 가능하며 바이오플락 덩어리를 섭취할 수 있는 새우에 주로 적용이 되어 발전이 되어 왔다. 하지만, 어류를 바이오플락으로 양식할 때 새우와는 다르게 바이오플락이 형성되고 부유물 농도가 높아지면 아가미에 흡착되어 산소소비를 저해하고 폐사로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 부유물 농도에 비교적 민감하지 않은 담수어류인 메기(*Silurus asotus*)를 대상으로 하여 아쿠아포닉스 시스템을 접목하여 사육수 내에 축적되는 질산을 사육수 교환 없이 도심에서도 양식이 가능한가를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 순환시스템의 구성

어류 도심형 아쿠아포닉스(aquaponics) 양식시스템은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 주요 시스템은 사육수조, 아쿠아포닉스 배양대, 사육수 순환을 위한 침전조로 구분되어 있으며 이 시스템들을 유지할 수 있는 부속장비로서 산소 발생기, 배기 장치, 순환 펌프 및 태양광 발전기 등을 구비하였다. 아쿠아포닉스 배양대는 자동으로 광주기(LD=12:12)와 온도(23°C)가 설정되게 설계하였다. 사육수조는 생물을 관찰할 수 있는 카메라 시스템(CCTV)과 수질환경이 매 5초마다 수질측정장비(YSI EXO 2, Yellow Springs Instrument Co., Inc., USA)로 실시간으로 측정되어 컴퓨터에 저장되며 설정 범위를 벗어나면 비상경보 및 알림기능이 설정하였다. 아쿠아포닉스 시스템에 공급되는 물은 메기 사육조(A) 또는(B)에서 1차 침전을 하는 침전조(C)로 이동하고 식물이 성장하는 배양대(E)로 공급된 후 집수조(D)로 이동을 하며, 밸브를 열어 C로 이동을 하고 다시 재배대로 공급되는 소규모 순환시스템으로 운영이 되다가 질산이 사육수보다 낮은 농도를 유지할 때에 사육조(A, B)로 이동을 하는 시스템으로 구성하였다.

2. 메기사육 및 혈액검사

2015년도에는 4월 17일 2.8 g 종자를 양식장으로부터

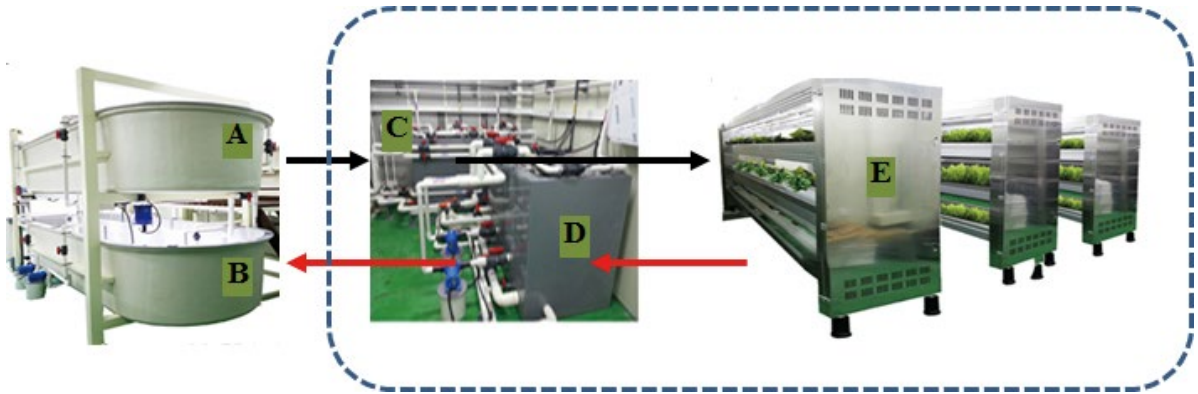


Fig. 1. Overall structure of the experimental system. Fish tanks (A), water goes into the reservoir tanks (B), then the aquaponics system (D) with a pump. Water used by the plants goes to another reservoir tank (C).

1,000마리를 이송하여 14.3 kg MT^{-1} 의 밀도로 A 수조에 입식하였으며 사료는 체중의 0.2~1.3%를 성장에 따라 공급하였다. 성장은 매주 1회 약 30마리를 취하여 총무게를 측정 후 마리 수로 나누어 평균무게를 계산하였으며 측정 후에는 동일 수조로 재수용하였다. A 수조의 총 중량이 62 kg (20.8 kg MT^{-1})이 되는 시점인 67일째 사육밀도를 낮추기 위해 357마리는 기존 수조에 수용하였으며 (A-1), 395마리를 다른 수조로 (B) 나누어 총 151일간 양성하였다. 생물사육에 따른 주간 성장률, 생존율, 사료효율 등을 다음과 같이 측정하였다.

일간성장률 (SGR; specific growth rate, %):

$$[\ln(W_{n+1}) - \ln(W_n)] \times 100 / D$$

사료효율 (FE; feed efficiency, %): $(G/F) \times 100$

D: 사육일수, F: 총사료공급량, G: 중증량, W_n : n차 측정 시 어류 총중량, W_{n+1} : n차 측정 다음 주 어류 총중량

주기적으로 질병감염여부를 확인하였으며 월별로 5마리씩 혈액을 채취하여 혈액분석기 (Fuji Dri-Chem, 3500i, Japan)로 혈장분석 (AST; aspartate aminotransferase, ALT; alanine aminotransferase, protein, cholesterol, glucose, triglyceride)을 실시하였다. 통계처리는 SPSS (Statistical Package for Social Science, version 13. software) 통계프로그램으로 실험구간의 일원분산분석 (one-way ANOVA, Turkey's honest test ($p < 0.05$))에서 유의성 검증을 실시하였다.

3. 아쿠아포닉스 시스템 운영

어류 양식사육수를 이용한 식물재배 가능성을 파악하

기 위하여 3월 18일부터 8월 12일까지 식물의 씨앗을 트레이에서 발아시킨 후 아쿠아포닉스 배양대에서 재배하였다 (Fig. 1E). 동 배양대에서 재배에 활용된 식물은 도심에서 쉽게 접할 수 있는 품종을 선별하였다. 품종으로는 청치마상추 (*Lactuca sativa*), 스위트 바질 (*Ocimum basilicum*), 적근대 (*Beta vulgaris*), 참나물 (*Pimpinella brachycarpa*), 치마아욱 (*Malva verticillata*), 적치커리 (*Cichorium intybus*), 쪽갓 (*Chrysanthemum coronarium*)과, 저염바이오플락에 적용가능성을 보기 위해 아이스플랜트 (*Mesembryanthemum crystallinum*)를 선택하였다. 식물 성장에 이용된 물은 메기 사육수조에서 침전조를 거쳐 아쿠아포닉스 배양대로 순환한 후 집수조로 이동하였으며 다시 아쿠아포닉스 배양대로 순환시켰다. 식물의 성장은 수확 시 총무게와 수량을 조사하였으며 재배 기간 동안에 아쿠아포닉스로 순환하는 사육수의 이온 (Mg^{++} , Ca^{++} , Zn^{++} , Fe^{++} , Cu^{++} , PO_4^{3-} , K^+)을 이온분석키트 (Merck, Germany)로, 총용존고형물 (TDS; total dissolved solid) 분석기 (TDS-3, HM digital, USA)로 1주일 간격으로 분석하였다. 사육기간 5개월 동안에 미량이온이 감소하였을 때에는 시판되는 식물재배 영양액 (물푸레 1호-A, B, 대유)을 총 2회 0.5 L와 1.0 L를 소량 추가하였다. 또한, 아쿠아포닉스에서 생산된 상추와 시판되는 상추, 유기농상추와 비교하여 이온분석을 수행하였다.

4. 수질환경 측정

수질환경 중 용존 산소 (DO), 수온, 염도, 탁도, pH는 수질측정기 (YSI EXO 2, Yellow Springs Instrument Co., Inc.,

USA)로 자동 측정되어 데이터가 컴퓨터에 저장되며 다른 수질 측정 항목인, 부유 고형물(SS), 암모니아(NH₄⁺), 아질산염, 질산염, 알칼리도는 매일 분석 키트(Merck, Germany)로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 메기의 성장

A 수조에 입식된 메기 종자(2.8g)는 사육 67일째 64.5g로 성장하여(49.54 MT⁻¹) 밀도를 낮추기 위해 분조하여 B 수조에 25.01kg을 수용하였으며, A 수조에 다시 27.8kg을 수용하여 A-1로 표기하였다. 분조 이후 두 수조에서 메기의 성장은 차이를 보여 151일간의 사육 후 수조 A-1은 마리당 평균 171.3g, 총중량 56.53kg이었고, 수조 B는 평균 235.5g, 총중량 71.1kg에 달하였다(Fig. 2). 주간측정에 의해 산정된 분조하기 전까지의 일간성장률(SGR)은 4.8g으로 높은 값을 보였으나, 분조 이후 A-1수조는 1.1g, B 수조는 1.6g이었다. 초기 사육수가 안정화되기까지 일부 폐사하여 생존율은 77.7%를 보였으나 질병에 의한 폐사는 아니었고, 큰 개체가 작은 개체를 잡아먹거나 실험에 사용된

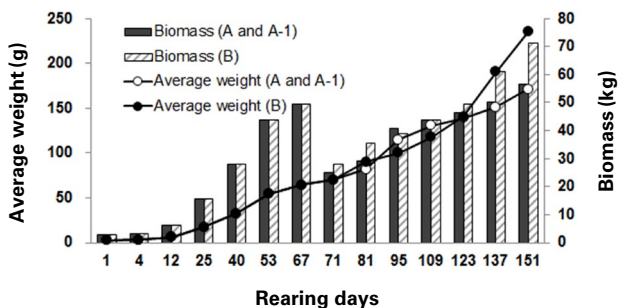


Fig. 2. Growth and total biomass of the catfish in the biofloc and aquaponics system.

메기를 폐사로 포함하여 산정하였으며 크기 차이로 인한 먹이섭취 부족이 원인으로 판단되었다. 분조 후 두 실험구는 생존율의 차이를 보였는데, 같은 수조에서 계속 관리해 온 수조 A-1은 92.9%, 성장에 의해 분조된 수조 B에서는 78.0%의 생존율을 보였다(Table 1). 이는 이동에 따른 스트레스 및 물리적 상처에 의한 폐사가 주요인으로 판단되었다. 사료효율(FE)은 두 개의 수조로 분조 이전까지 수조에서는 120.6%, 분조 이후 A-1은 120.1%, B 수조는 123.5%이었다. 동일한 방법으로 바이오플락 메기 양식을 시도한 2014년 연구결과 150일에 평균체중 8.03g가 202±27.4g로 성장하였으며 분조를 하지 않고 동일한 수조에서 총 273일간의 사육결과 406.4g±30.8g(300마리 입식, 생존율 79%)으로 성장하였다(저자, 미발표).

2. 혈액분석

월별 메기의 혈액분석결과는 Fig. 3에 나타내었다. 바이오플락 형성 초기인 4월에 혈중 아스파르트산 아미노산 전이효소(AST; aspartate aminotransferase)의 농도는 유의적으로 높게 나타났으며 수질이 안정된 5월 이후는 일정한 농도를 유지하는 것으로 나타났다. Total protein과 cholesterol, glucose는 7월에 가장 높은 값을 보였고 중성 지방인 triglyceride는 개체 간의 편차가 컸지만 계절별 큰 변화를 보이지 않았다. 간 손상의 지표인 알라닌 아미노산 전이효소(ALT; alanine aminotransferase)는 평균값(9.2±13.9 U L⁻¹)에서는 차이를 보였지만 4월과 8월에 개체에 따라서 변화폭이 커서 통계적으로 유의적인 차이를 보이지 않았다. 수질환경에서 수온이 가장 높았던 시기는 7월로 평균 27.0±0.1°C였으나 8월 또한 높은 온도인 26.9±0.1°C였고, pH가 가장 낮았던 시기는 6월에 4.8, 암모니아가 가장 높았던 시기는 분조 직전인 사육 66일째 8.0 mg L⁻¹, 아질산염도 사육 10일째 12 mg L⁻¹, 질산염은 전 기간 150 mg L⁻¹ 이하를 유지하여 변화하는 수질환경에 의하여

Table 1. The average production of catfish cultured by the BFT and aquaponics technique in 2015

Tank (year)	Rearing days	No.	Initial B.W. (g)	Final B.W. (g)	SGR (%)	Yield (kg MT ⁻¹)	Total production (kg)	Survival rate (%)	FE (%)
A	67	1,000	2.8	64.5	4.8±3.1	15.1	49.5	77.7	120.6
A-1	84	357	64.5	171.3	1.1±0.8	17.1	56.5	92.9	1.2 (0.4-2.3)
B	84	395	64.5	235.5	1.6±0.6	21.6	71.1	78.0	1.2 (0.4-2.7)

No.: number, B.W.: body weight, SGR: specific growth rate, FE: feed efficiency

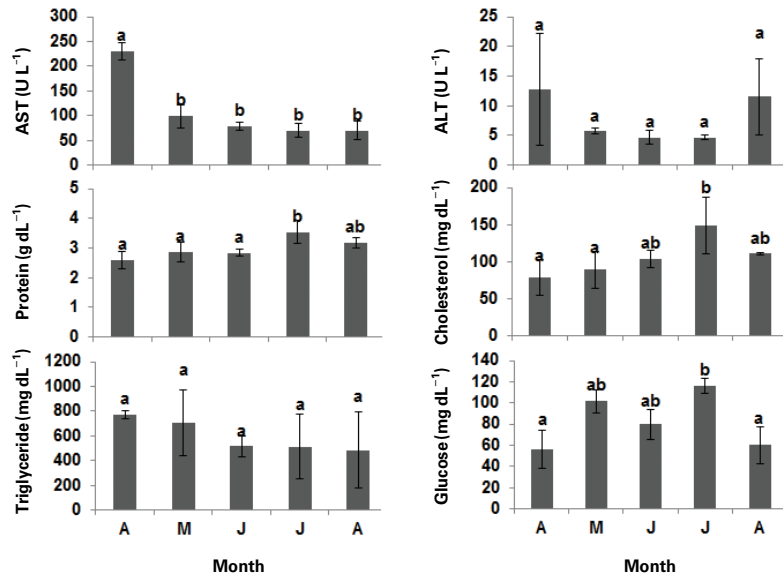


Fig. 3. Monthly changes in the blood chemistry of the catfish cultured in the biofloc and aquaponics system. The error bars represents standard deviations. Small letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

혈액에서의 성분이 영향을 받지 않는다고 판단되었다.

3. 수질환경 변화

바이오플락 양식은 미생물에 의하여 사육수 내 암모니아, 아질산이 분해되어 질산으로 축적이 되는 시스템이다. 아쿠아포닉스 시스템은 대부분 생물 사육수조의 수량 대비 큰 규모의 식물을 재배하여야 수질이 안정화될 수 있다. 메기 입식 한 달 전 물만들기를 위하여 소독 중화한 물에 사료를 넣어서 미생물이 발생하게 하였다. 물만들기 기간에 수온은 23.5~26.8°C, 용존산소는 6.3~7.9 mg L⁻¹, 염분 0.4~1.0 psu, pH 7.4~8.7, 암모니아 0.1~3.0 mg L⁻¹, 아질산염 0.1~6.0 mg L⁻¹, 질산염 10~50 mg L⁻¹, 알칼리도는 50~75 mg L⁻¹로 변화하였으며 암모니아는 점차 증가하여 물만들기 10일째 최댓값 3 mg L⁻¹으로 증가하여 3일간 유지되고 그 후는 점차 감소하여 메기 입식 전에는 0.1 mg L⁻¹에 달하였다. 아질산은 13일째 최댓값 6 mg L⁻¹에 이르고 14일간 유지된 후 감소하여 1.0 mg L⁻¹로 측정되었다. 사전 물만들기에 사용된 총사료량은 650 g (3.3톤)이었으며 매일 25 g 씩 26일간 공급하였다. 암모니아와 아질산이 분해된 시점을 1차 물만들기 완료시점으로 하여 메기를 입식하였다. 사육 기간 동안 메기가 성장함에 따라 발생하는 총부유물농도(SS)가 점차 증가하여 사육 46일째 70

mL⁻¹, 사육 95일째 82 mL⁻¹까지 도달하였으며 자체 제작한 protein skimmer를 가동시켜 40 mL⁻¹ 이하가 되도록 조절하였다.

메기 입식 후, 본 연구에서는 A 수조에서 증발량만큼 담수로 보충을 하여 3.3톤 수량을 유지하며 전 사육기간(160일) 담수를 총 1.87톤 보충을 하였다. 성장에 따라 분조를 한 B 수조는 총 물량 3.3톤에 사육기간(88일) 동안에 담수를 0.997톤 보충을 하였다. 첨가된 당밀은 A (A-1 포함) 수조의 경우 사육 100일까지 총 1.283 kg이며 그 이후는 전혀 공급하지 않았다. B 수조에 첨가된 당밀은 0.466 kg이었다. 사육기간 동안에 수질의 변화는 Fig. 4와 같다. 생물에 독성으로 작용하는 암모니아 최대농도는 사육 64일째 8 mg L⁻¹에 달하였으나 당밀을 첨가하여 짧은 기간 안에 암모니아 산화세균이 활성화됨으로 0.1 mg L⁻¹까지 감소되었으나 수확까지 2회 암모니아의 농도가 재상승하였다. 아질산의 농도는 사육 7일째 급격히 농도가 증가하여 12 mg L⁻¹에 달하고 8일간 지속되었으나 감소 이후에는 암모니아와는 다르게 지속적으로 낮은 값(0.5 mg L⁻¹ 이하)을 유지하였다. 사육기간이 경과할수록 pH가 낮아져 투입된 중탄산나트륨은 알칼리도를 상승시켜 수조 내 pH 급변화를 막아주는 역할을 하는데, A (A-1 포함) 수조는 21 kg이 소비되었고 B 수조는 11.4 kg이 소비되었다. 메기 사육 기간 중 알칼리도의 변화는 20~125 mg L⁻¹이었다. 아쿠아포닉스에서

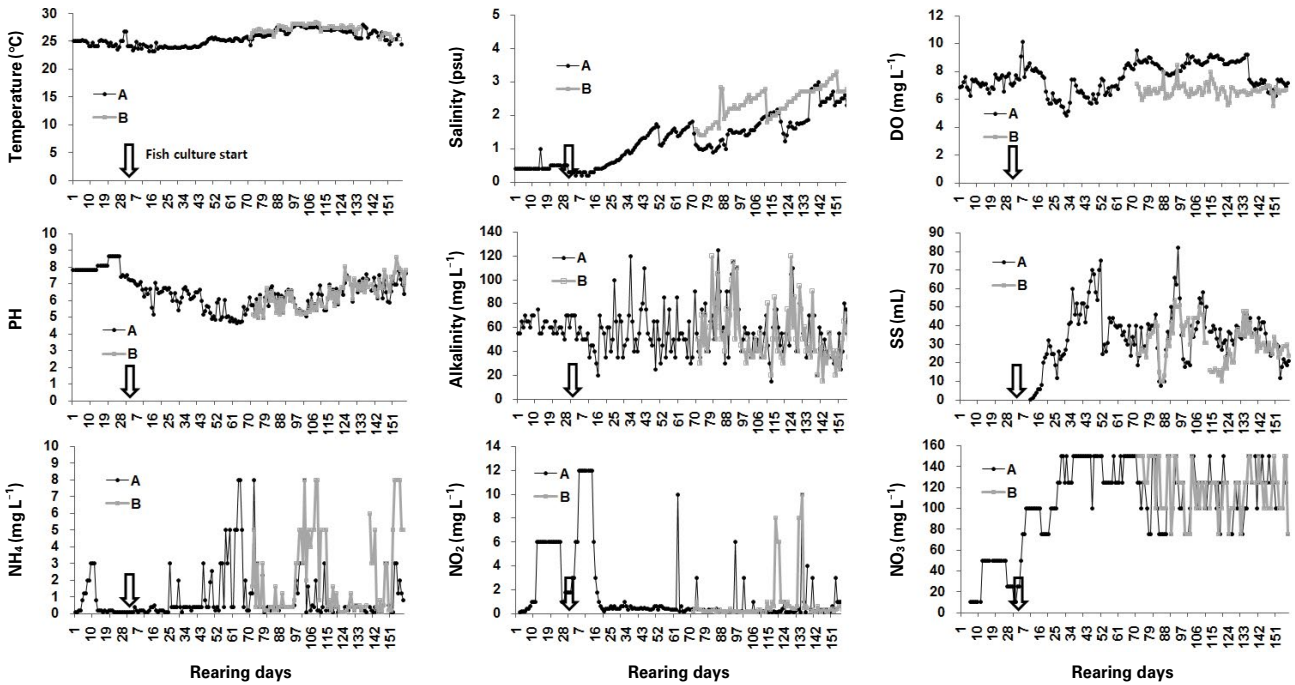


Fig. 4. Variation in water quality during catfish culture by the biofloc + aquaponics system. The fish were cultured in A (with A-1) tank and 70 days after rearing, half of the fish were moved to new B tank. The arrow indicates the day of fish settling.

질산이 제거된 후 생물사육조에 재공급되었을 때 질산의 농도가 150 → 125 mg L⁻¹, 150 → 100 mg L⁻¹, 125 → 75 mg L⁻¹로 낮아지는 경향을 보였다.

일반적으로 아질산의 독성 정도는 같은 어종이라도 어류 연령, 어류 크기, 수온, 용존산소, pH, 음이온과 양이온의 농도, 노출 시간 등에 따라 다르게 나타난다(Lewis and Morris 1986). 아질산은 사육수의 pH가 낮아지면 어류 아가미의 Na⁺와 Cl⁻ 농도가 감소하고 Na⁺/K⁺ ATPase 활성이 낮아져 아질산염 독성이 강하게 나타나는데, pH가 낮은 어류 양식장에서는 무기염류의 농도와 관계없이 아질산 독성이 강하게 나타난다고 보고하고 있다(Lewis and Morris 1986; Wise and Tomasso 1988). 아질산에 노출된 어류는 전해질 불균형을 유도할 수 있고(Jensen 2003), 메기류(*Clarias lazera*)는 혈액으로 유입된 아질산이 심장이나 간 조직의 괴사를 초래하여 혈장 glutamate oxaloacetate transaminase (GOT)와 glutamate pyruvate transaminase (GPT)가 증가할 수 있음을 보고하였다(Michael *et al.* 1987; Huang and Chen 2002). 본 연구에서 아질산이 6 mg L⁻¹까지 증가하는 시기가 있었으나 간 손상을 의미하는 AST 농도가 급격히 변하거나 범위를 벗어나지 않고 안정되게 유지된 것으로 판단된다. Yellow catfish의 아질산에

대한 96 hr-LC₅₀ 값은 체중 0.296 g에서는 97.23 NO₂-N mg L⁻¹, 3.52 g은 133.61 mg L⁻¹, 32.96 g은 196.05 mg L⁻¹에서 반수치사를 보여 크기가 클수록 아질산에 감수성이 적었지만, 같은 종이라도 channel catfish는 strain에 따라서 감수성 차이가 있으며(Tomasso and Carmichael 1991), Nile tilapia와 fathead minnows는 오히려 성어보다 치어가 아질산에 강하다고 보고하였다(Atwood *et al.* 2001). 이처럼 아질산 독성은 실험 조건, 어류 형질 차이 등 많은 요인의 영향을 받기 때문에 어류 크기와 관련해서 논란의 여지가 있지만(Almendras 1987; Hilmy *et al.* 1987), 메기는 치어보다 성어가 되면 아질산에 어느 정도 내성을 갖는 것으로 생각되었으며 본 연구에서는 치사농도에 이르는 기간이 없어 생존율에 영향을 미치지 않았다고 판단되었다.

4. 아쿠아포닉스 식물생산 및 수질변화

메기 사육수를 이용한 다양한 식물의 재배 가능성을 파악하기 위한 실험결과는 Fig. 5에 나타내었다. 총 9종의 식물의 수량을 달리하여 동시에 실험을 한 결과 종류에 따라 성장 차이를 보였다. 식물마다의 적정사육조건을 고려하지 않은 상태에서 월별 수확된 양은 차이를 보였으나

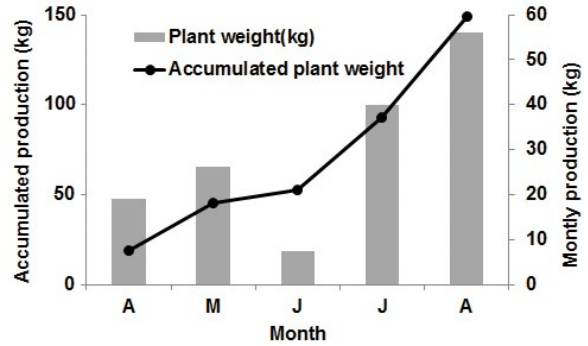


Fig. 5. Plants cultured in the biofloc + aquaponics system (left) and the monthly total harvest weight of the vegetables (right). A. lettuce (*Lactuca sativa*), B. chard (*Beta vulgaris* L. var. *cicla* L.), C; *Ocimum basilicum*, and D. *Malva verticillata* L.

Table 2. Variation in ion content in the aquaponics water produced form fish-rearing water. TDS; total dissolved solid

		TDS (mg L ⁻¹)	Mg ⁺⁺ (mg L ⁻¹)	Ca ⁺⁺ (mg L ⁻¹)	Zn ⁺⁺ (mg L ⁻¹)	Fe ⁺⁺ (mg L ⁻¹)	Cu ⁺⁺ (mg L ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	K ⁺ (mg L ⁻¹)
Aquaponics water	Min.	247	100	22	0.09	0	0	0	0.114
	Max.	1,700	500	200	2.0	1	0	15	0.174

이는 계절에 따른 영향은 아니며 240개의 식물재배 포트에 수용된 식물의 종류와 수에 의하여 차이를 보였다. 특히 6월에 낮은 수확량을 보인 이유는 상추 1종, 88포기만으로 아쿠아포닉스 시스템을 운영한 결과로 상추는 발아에서 수확까지 28~30일 정도 걸렸으며 수확 시 1포기의 무게는 82~89.2g 정도이었다. 실내에서 사육함에 따라 잎이 연하고 빠르게 성장하는 것으로 나타났다. 바질, 적근대의 경우는 수확 시 1포기당 95.3g, 601.6g까지 크게 성장하였다. 참나물, 아이스플랜트는 잎이 작고 성장이 원활하지 않아 메기를 사육수를 이용한 재배의 어려움이 있었다. 아쿠아포닉스 순환수의 수질조사결과를 보면 암모니아와 아질산이 질산에 비하여 낮은 농도이지만 우선적으로 감소되었으며 그 이후 질산이 식물에 의하여 감소하는 뚜렷한 경향을 보였다(Fig. 6). 본 연구에서 집수조와 재배대의 물의 용량이 약 3톤이었으며 아쿠아포닉스 시스템의 수량이 감소된 경우, 실험기간 중 총 3회 약 2톤씩 메기 사육수를 주입하여 지속적으로 수량을 유지하였다. 수온은 17.1~22.9°C 범위였으며 용존산소는 5.61~9.38 mg L⁻¹, 염분은 0.2~1.2 psu, pH는 4.52~7.63이었다. 순환수의 이온조성은 Table 2와 같다. 영양액의 이온조성은 1호 A용액이 질소 2%, 칼륨 3.5%, 칼슘 2%, 철 0.05%였고 1호 B용액은 질소 1.3%, 인산 1.5%, 칼륨 5%, 산화마그네슘 0.7%, 붕

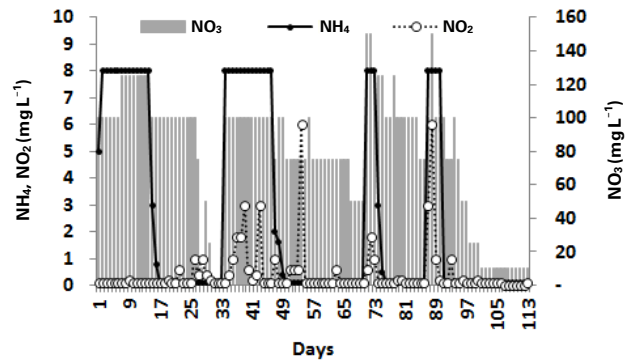


Fig. 6. Water quality (ammonium, nitrite, and nitrate concentration) changes in the aquaponics system.

소 0.05%로 권장 희석 배수는 500배이나 본 시스템에서는 아쿠아포닉스 사육수가 어류로 순환함에 따라 미치는 영향을 최소화하기 위하여 3,000~6,000배로 희석하여 소량을 사용하였다. 아쿠아포닉스에서 생산된 상추와 일반 시장에서 판매되는 상추 및 유기농상추의 이온성분을 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. 본 시스템에서 수확된 상추의 Na⁺ 이온의 함량이 시중에서 판매되는 제품보다 10~15배 높은 함량을 보였다. 이는 pH 변화를 조절하기 위하여 첨가된 중탄산나트륨(NaHCO₃)에 의한 것으로 메기 사육수의 염분이 3 psu까지 증가한 것과 관련이 있는

Table 3. Comparison of ion content between lettuce produced by BFT and aquaponics methods and market products

Days \ Ions	Na ⁺ (%)	K ⁺ (%)	Ca ⁺⁺ (%)	Mg ⁺⁺ (%)	Fe ⁺⁺ (%)	Zn ⁺⁺ (%)	P ⁺ (%)	TVN (mgG ⁻¹)
Aquaponics lettuce	2.354	4.348	1.50	0.62	0.010	0.108	0.61	90.17
Market lettuce	0.197	6.137	1.60	0.446	0.022	0.063	0.48	135.76
Organic lettuce	0.164	4.948	1.23	0.393	0.012	0.028	0.38	199.65

TVN: total volatile nitrogen
 ※ Cu, Mn non-detected

것으로 판단된다. 휘발성기태질소(TVN)은 아쿠아포닉스에서 생산된 상추에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

적 요

도심형 양식시스템을 바이오플락 양식기술과 아쿠아포닉스 배양대로 구성하여 사육수를 교체하지 않고 메기를 (사육조 3.3톤 2개) 양성한 결과 151일의 사육 후 2.8g의 종묘가 평균 무게 171.3g (총중량 56.53 kg)과 235.5g (총중량 71.1 kg)로 성장하였다. 입식에서 수확까지의 누적 생존율은 65% 보였고, 성장 구간별로 입식에서 1차 성장 후 분조 이전까지 77.7%, 분조 이후 생존율은 수조에 따라 차이를 보여 각각 92.9%와 78.0%로 나타났다. 초기 바이오플락 사육수가 만들어지는 과정에서 일부 폐사가 발생하였고, 수질이 안정된 이후에는 폐사가 감소하였다. 메기의 혈액분석결과 사육초기 BFT 사육수가 안정화 이전인 4월에만 손상 지표인 AST의 농도가 유의적으로 높은 값을 보였으며 ALT, triglyceride는 전 사육기간 내에 차이가 없었다. Glucose, cholesterol, total protein은 7월에 유의적으로 높은 값을 보이고 다른 기간에는 차이가 없었다. 메기 사육수를 이용한 아쿠아포닉스 가동 시 생산된 식물은 상추, 바질, 적근대, 적치커리 등이 원활한 성장을 보여 5개월간 총 148.85 kg의 식물을 수확하였다. 또한 아쿠아포닉스 시스템에서 식물재배에 따른 사육수 내의 질산 제거능력과, 질산이 제거된 사육수는 메기 사육수로 재사용이 가능한 것으로 확인되었다. 결론적으로, 본 연구에서는 도심형 양식시스템으로 물을 교환하지 않고 어류를 양식할 때 사육수에 축적된 질산을 제거하고 재사용이 가능한가를 아쿠아포닉스 기술을 결합하여 연구하였으며, 양식생물(메기) 수용량에 따른 적정 식물량을 유지하면 농수산 복합양식이 가능하다는 것을 보여주었다.

사 사

이 논문은 2016년 국립수산물과학원 ‘해산 새우류양식 바이오플락 기술(BFT)다변화 연구 (R2016018)’의 지원으로 수행된 연구입니다.

REFERENCES

Almendras JME. 1987. Acute toxicity and methemoglobinemia in juvenile milkfish (*Chanos chanos* Forsskae). *Aquaculture* 61:33-40.

Buhmann AK, U Waller, B Wecker and J Papenbrock. 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.

Bossier P and J Ekasari. 2017. Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. *Microb. Biotechnol.* 10:1012-1016.

Crab R, T Defoirdt, P Bossier and W Verstraete. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture* 356:351-356.

Despommier D. 2013. Farming up the city: The rise of urban vertical farms. *Trends Biotechnol.* 31:388-389.

Edwards P. 2003. Peri-urban aquaculture in Kolkata. *Aquac. Asia* 8:4-6.

Hargreaves JA. 2006. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquac. Engineer.* 34:344-363.

Hilmy AM, NA El-Domiati and K Wershana. 1987. Acute and chronic toxicity of nitrite to *Clarias lazera*, *Comp. Biochem. Physiol. C* 86:247-253.

Huang CY and JC Chen. 2002. Effects on acid-base balance, methemoglobinemia and nitrogen excretion of European eel after exposure to elevated ambient nitrite. *J. Fish. Biol.* 61:712-725.

Jensen FB. 2003. Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals. *Comp. Biochem. Physiol. A* 135:9-24.

- Kim SK, Z Pang, HC Seo, YR Cho, T Samocha and IK Jang. 2014. Effect of bioflocs on growth and immune activity of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* Postlarvae. Aquac. Res. 45:362–371.
- Lewis WM and DP Morris. 1986. Toxicity of nitrite to fish: a review. Trans. Am. Fish. Soc. 115:183–195.
- Mamat NZ, MI Shaari and NAAA Wahab. 2016. The production of catfish and vegetables in an aquaponic system. Fish. Aquac. J. 7:181.
- Michael CS and RP Morgan. 1983. Acute toxicity of nitric acid to fingerling rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Comp. Biochem. Physiol. 76:227–229.
- Michael MI, AM Hilmy, NA El-Domiaty and K Wershana. 1987. Serum transaminase activity and histopathological changes in *Clarius lazera* chronically exposed to nitrite. Comp. Biochem. Physiol. C 86:255–262.
- Rijn J. 2013. Waste treatment in recirculation aquaculture systems. Aquac. Eng. 53:49–56.
- Ryu JG, DY Kim, KH Lim and MH Jeong. 2011. A concept study on introduction of vertical aquaculture for green growth. Korea Maritime Institute. pp. 15–18.
- Pinho SM, D Molinari, GL Mello, KM Fitzsimmons and MGC Emerenciano. 2017. Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. Ecol. Eng. 103:146–153.
- Tomasso JR and GJ Carmichael. 1986. Acute toxicity of ammonia, nitrite, and nitrate to the guadalupe bass, *Micropterus treculi*. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 36:866–870.
- Wise DJ, JR Tomasso and TM Brandt. 1988. Ascorbic acid inhibition of nitrite-induced methemoglobinemia in channel catfish. Prog. Fish-Cult. 50:77–80.