JFMSE, 34(5), pp. 750~764, 2022.
수산해양교육연구, 제34권 제5호, 통권119호, 2022.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.10.34.5.750

Coupled aquaponics (CAS) 및 Decoupled aquaponics (DAS) 생산 방식에 따른 비단잉어 및 엽채류의 성장 비교

이 동 훈†
†경기도해양수산자원연구소(연구사)

Comparative study on Growth of Leafy Vegetables and Fancy carp (*Cyprinus carpio* var. *koi*), Grown in Coupled Aquaponics (CAS) and Decoupled Aquaponics (DAS)

Dong-Hoon LEE†
†Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

Aquaponics is an fusion production practice which combines aquaculture, the raising of fish, and hydroponics, a soil-less crop production method, to create a system that symbiotically produces both. Many of today's coupled aquaponic systems (CAS) circulate water and nutrients from fish to plants and vice versa, but It is not always guaranteed that the fish preferences are completely aligned with the optimum requirements of the plants. This solution, which is referred to as decoupled aquaponic systems (DAS) would better secure optimal environmental conditions for both the plant and fish production units. The study examined the growth difference of leafy vegetables and Fancy carp between CAS and DAS method applying hybrid biofloc technology-aquaponics (HBFT-AP) water quality management for 14 weeks. Eight cultivars of european lettuce (fairly, decarte, gauguin, ezabel, ovired, volare, xaroma and skelton) were employed in the two experiment (EXP1 and EXP2) for 7~14 weeks. After planting leafy vegetables in two system, leafy vegetable productivity was compared at the end of growth period (25 days). Productivity (CAS vs DAS) was somewhat higher (total leaf weight; CAS 28,293 g vs DAS 26,087 g) in CAS for EXP1 period, but in EXP2, the total leafy weight was higher in DAS (71,247 g) than in CAS (67,749 g). Also, weight gain (%) value of fish was higher in fish group of DAS (33.09) than CAS (23.40) due to the higher feed supply in fish tank of DAS.

Key words : Aquaponics, Decoupled aquaponics, Coupled aquaponics, Lettuce cultivars, Microorganism

Ⅰ. 서 론

순환여과식 어류 양식(recirculating aquaculture system, RAS)과 수경재배(hydroponics)는 가용 수자원을 더 잘 사용하기 위해 1950년대 건조 지역에서부터 출현하였으나, 이러한 시스템에서 발생하는 오염물의 처리는 문제가 있어 아쿠아포닉스가 출현하는 계기가 되었다(Joyce et al., 2019).

아쿠아포닉스(aquaponics)는 수산양식과 농업의 수경재배가 결합된 복합재배 시스템으로, 수산양식 생물의 성장과 생존을 위해 공급된 먹이(사료)가 종속 및 독립영양미생물(hetero-and autotrophic

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

microorganisms)에 의해 각종 무기물과 질산염으로 분해 및 생성된 것을 식물이 성장 영양소로 흡수하면서 양어수질의 안정화와 식물성장을 이루어지게 하여 사육수의 교환없이 지속적으로 농·수산물을 생산할 수 있는 친환경 생산방법이다(FAO, 2014).

전통적인 수경재배 시스템인 CAS (coupled aquaponic system)는 영양이 풍부한 물을 물고기에서 식물로 또는 그 반대로 보내는 단일 순환과정으로 이루어지며, 식물과 어류의 성장에 필요한 다양한 영양소 및 환경 사항에 대해 이상적인 재배 조건에 대한 절충안을 제시하나, 생산물의 개별 생산시스템에 비해 효율성과 생산성을 감소시킨다고 보고되고 있다(Goddek et al., 2019).

최근에는 각 생물 시스템의 분리를 허용하여 시스템별 용수를 더욱 잘 운용하도록 장치의 공정 과정을 늘림과 동시에 오염물에서 영양분을 더 잘 재활용할 수 있는 방법이 제시되고 있으며, 이러한 아쿠아포닉 시스템이 DAS (decoupled aquaponic system) 이다(Goddek et al., 2019). DAS는 어류에서 생산되어진 고형물 및 입자성 오염물을 식물재배지로 보내기 전 별도 장치에 모은 후, 슬러지에 포함된 영양소를 식물이 잘 활용하도록 기계적 또는 화학적 처리를 하여 식물재배지로 용수를 보내게 된다. CAS와 가장 큰 차이점은 식물재배지의 용수는 식물재배지 내에서 자체 순환을 하는 대신 어류 사육지로 순환되지 않는다는 것이다.

DAS의 수산생물 및 식물에서 병원체 또는 기타 환경적 요인에 의해 생산성에 문제가 발생할 경우 각 시스템의 구성 요소를 분리하여 구성 요소별 전반적인 제어 및 효율성을 극대화할 수 있고, 더불어 수산생물과 식물의 환경 및 생리적 요구 사항 간의 한계를 극복할 수 있다.

관상어에 대한 수요는 2000년대 중반부터 지속적으로 증가되고 있으며, 관상어 관련 상품 산업화를 위한 연구도 병행되고 있다(Lee and Lee, 2008). 이 중 비단잉어는 체색이 다양하여 대중적으로 관심이 높은 어종으로, 수온 및 pH 등 수질변화에 내성이 강하여 다른 관상어에 비해 양성하기가 용이한 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2006; Lee et al., 2010; Kim and Lee, 2014; Kim and Lee, 2015). 또한 Lee(2021)은 비단잉어를 대상으로 아쿠아포닉스 생산 연구를 진행하여 비단잉어도 충분히 아쿠아포닉스의 대상 어종이 될 수 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).

현재까지 국내 아쿠아포닉스의 대다수 연구는 CAS 시스템에 기반하여 연구를 진행 중이나(Lee et al., 2019a; Lee et al., 2019b; Lee et al., 2020; Lee and Kim, 2021., Lee 2021; Lee 2022), DAS 시스템에 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 비단잉어를 이용한 아쿠아포닉스 생산에서 유용미생물의 사용과 더불어 시스템(CAS vs DAS)간 차이가 어류 및 엽채류 생산성에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 조사하여 향후 국내 DAS 시스템 연구에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 실험사료 준비

실험에 사용된 사료는 사조동아원㈜ 당진사료공장(충청남도 당진시)에서 직경 6 mm 내외 부상 EP (extruded pellet) 사료로 제작된 것으로, Lee et al.(2021)의 실험 결과에 보고된 MKP3

(monobasic potassium phosphate 3% in diet)가 포함된 사료로 일반 성분[수분(moisture), 조단백질(crude protein), 조지방(crude lipid), 조회분(crude ash), 조섬유(crude fiber)] Ca, P 및 광물질 성분은 <Table 1>과 같다.

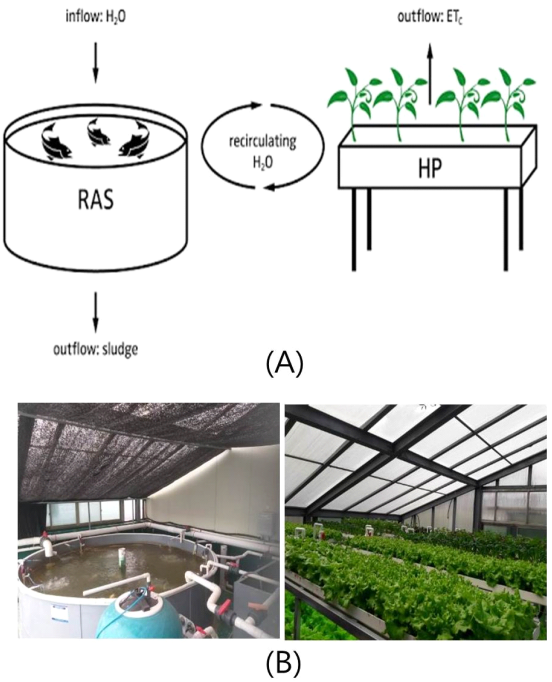
<Table 1> Chemical composition of the experimental diet[1]

Composition	MKP[2] 3%
Moisture (%)	6.24
Crude protein (%)	45.56
Crude lipid (%)	7.21
Crude ash (%)	10.64
Crude fiber (%)	1.98
Ca (%)	2.38
P (%)	2.24
Mg (ppm)	2,125.6
Fe (ppm)	462.3
Cu (ppm)	15.4
Mn (ppm)	39.2
Zn (ppm)	98.3
K (ppm)	15,548.7

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

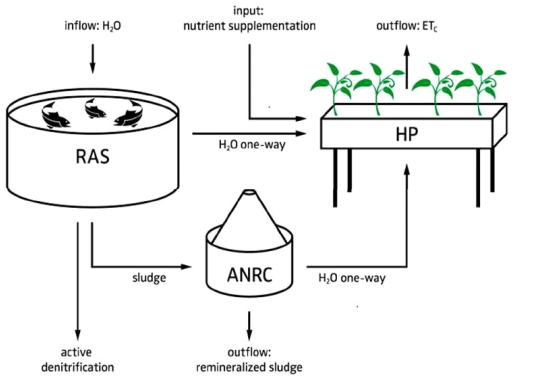
2. 시스템 구성 및 운영

CAS 시스템의 구성도는 [Fig. 1]과 같다. BFT 양식시설과 수경재배 시설이 결합한 아쿠아포닉스 실험구(hybrid biofloc technology-aquaponics, HBFT-AP)로 어류 원형수조(ø 4.5 m × H 0.7 m) 1개, 섬프수조(L 2 .0 m × W 1.0 m × H 0.9 m) 1개, 2층 구조의 식물베드지(L 2.9 m × W 0.6 m × H 0.1 m) 20개, 680 L바이오헬릭스 여과기(Isan M Tech. Ltd., Korea) 1개, 원형수조와 식물베드지의 물 순환을 위한 펌프(1.5 HP) 1개, 어류 수조의 BFT 유지를 위한 벤츄리 에어 공급 시스템 순환펌프(1.0 HP) 1개, 식물베드지 하단에 빛 공급을 위한 형광등 40개로 구성되었다. 식물 재배 포터는 베드지 당 45개로 총 900개의 재배지로 구성되었으며, 식물에 공급되는 용수의 주수 배관은 지름 25 mm, 배수 배관은 지름 40 mm을 사용하였고, 최종 집수되어 어류 사육 수조로 유입되는 배관은 지름100 mm를 사용하였다.



[Fig. 1] Water flow in CAS (coupled aquaponic system) (A) Goddek et al. (2016), (B) compartments and water flow of the experimental design, fish tank (ϕ4.5 m) → sump tank (2 × 1 m) → pump (1.5 HP) → biohelixfilter (680 L) → vegetable bed (2.9 × 0.6 × 0.1 m, No. 20) → fish tank.

CAS와 비교 실험에 사용한 DAS 시스템의 구성도는 [Fig. 2]에 나타내었다. 어류 사육지 및 식물재배지 구성은 CAS와 같으나 어류에서 발생되는 슬러지는 드럼스크린(망목 : 5㎛, 배출량 : 200-300 L / 1일)과 청소 펌프를 통해 슬러지 모음 장소인 정화조(0.9 × 1.1 × 1.5 m, Seungwon, Co., Jungeup, Korea)로 모였다.



(A)

(B)

[Fig. 2] Water flow in DAS (decoupled aquaponic system) (A) Goddek et al. (2016), (B) compartments and water flow of the experimental design, aquacultre [fish tank (∮4.5 m) → sump tank (2 × 1 m) → pump (1.5 HP) → drum screen (water passing through) → biofilter (400 L) → fish tank (∮4.5 m)], hydroponics [drum screen (drain water) → septic tank (0.9 × 1.1 × 1.5 m) → vegetable sump tank (0.5 × 0.8 × 1.1 m) → vegetable bed (2.9 × 0.6 × 0.1 m, No. 20) → vegetable sump tank (0.5 × 0.8 × 1.1 m).

슬러지를 수집한 후, 2종류의 바실러스 미생물(*Bacillus subtilis, B. licheniformis*) 분말제 Pro400x (AqualnTech, Inc., Lynnwood WA, USA)를 주기적(300 g / 1 week)으로 사용하여 유기물 분해 과정을 유도하였다.

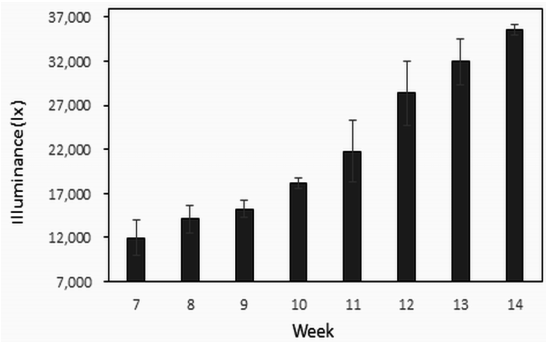
정화조 통 안에는 2부분으로 구획화하여 한 부분은 침전조로 사용하였고, 다른 한 부분은 유동상 여과재(∮ 17 × 11 mm) 를 넣어 질산화 미생물이 정착하도록 하였다. 정화조에서 여과된 물은 식물재배지 섬프수조(0.5 × 0.8 × 1.1 m)와 식물재배지로 순환되었으나, 어류 사육지로 용수 유입은 되지 않았다.

3. 실험어 배치 및 사료공급

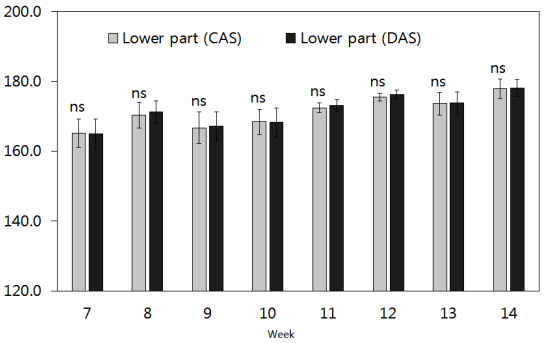
실험에 사용된 황금 비단잉어는 경기도해양수산자원연구소에서 사육 관리한 품종으로 어체중 500~1,000 g (평균 어체중 880 g)의 범위를 갖는 개체 240마리를 CAS 및 DAS 시스템에 120마리씩 배치하였다. 사료공급은 수질관리의 안정화 유도를 위해 어체중 당 1.0%로 제한하여 1일 2회 공급하여 14주간 진행되었고, DAS 실험구는 CAS에 비해 30 % 정도 사료 공급량을 높여 사육관리 되었다.

4. 엽채류 생산

엽채류 생산 실험은 어류를 입식하여 6주간의 적응 기간을 거친 후, 7~14주에 걸쳐 2회 생산실험을 진행하였다. 엽채류 생산 실험1(EXP1)은 유럽산 상추류(*Lactuca sativa*) 페어리(fairly lettuce), 데카르트(decarte lettuce), 고갱(gauguin lettuce), 이자벨(ezabel lettuce), 오비레드(ovired lettuce) 5품종을 사용하였고, 실험2(EXP2)는 볼라레(volare lettuce), 데카르트(decarte lettuce), 샤로마(Xaroma lettuce), 이자벨(ezabel lettuce), 스켈톤(skelton lettuce) 5품종이 이용되었다. 엽채류는 품종당 180개체가 입식되었고, 상단(태양광) 및 하단(형광등)의 광량 차이([Fig. 3, 4])로 엽채류는 각 품종별 상·하단을 교차하여 광량 차이에 의한 생산성 오차를 배제토록 배치하였다. 입식 후 25일 시점에 성장 측정이 이루어졌다.



[Fig. 3] Illumination (lux) of the upper part of the plant bed area by sunlight.



[Fig. 4] Illumination (lux) of the lower part of the plant bed area by sunlight and fluorescent light.

5. 시료측정

본 실험에서 EXP1 및 EXP2의 엽채류 측정은 엽채류 입식 후 25일 시점에 각 실험구(CAS vs DAS) 엽채류의 뿌리, 줄기 부분을 제거한 후, 가식부인 잎을 수확한 다음 전체 무게를 측정하여 성장도를 조사하였다. 비단잉어의 어체중 측정은 EXP2 실험의 엽채류 최종 측정 후, 각 실험구별 총어체 중량을 측정하였다.

6. 수질관리

현재 실험에서 사용한 어류 사육 수질관리는 Lee et al.(2019a,b; 2020)가 보고한 방법을 참고하여 진행하였으나, 기존의 방식과 달리 CO_2(탄산가스) 투입 과정은 없었다. 물만들기 초기 미생물은 시판용 유용미생물 제품인 BFT-ST (EgeeTech, Ltd., USA) 11.4 L을 사용하였으며, 어류 입식 후 6주 기간 동안 Emerenciano et al.(2017)의 방법에 준하여 사료 공급에 따른 수중의 TAN 발생 농도에 맞추어 유기탄소원인 정제 포도당을 계산한 후, C:N(6:1)비를 맞추어 사육수조에 공급하였다.

엽채류 입식 시점인 7주부터 모든 실험구는 엽채류의 성장을 감안하여 pH를 6.0~6.3 부근에 맞추어 관리되었다. CAS 실험구는 지속적인 pH 감소에 따라 격일로 KOH (Samchun Ltd., Pyeongtaek, Korea) 35 g 및 $Ca(OH)_2$ (Samchun Ltd., Pyeongtaek, Korea) 20 g을 섬프수조에 투입하였다. DAS 실험구의 어류 사육수조에는 KOH 20 g 및 $Ca(OH)_2$ 10 g을 투입하였으며, 식물재배지에는 KOH 5 g 및 $Ca(OH)_2$ 2 g을 투입하였다. DAS 실험구의 EXP1 실험에서 식물재배지 내 초기 영양분 부족에 따라 화학 복합비료(nitrogen 21 %, phosphorous 17 %, potassium 17 %) 슈퍼21(NAMHAE CHEMICAL Co., Yeosu, Korea)을 1일 50 g 용량으로 정화조에 투입하였고, EXP2 실험에서는 양평군 농업기술센터에서 제공받은 블루길 (Lepomis macrochirus) 및 베스(Micropterus salmoides) 발효 액상 비료를 1일 150 mL을 정화조에 투입하였으며, 액상비료의 화학성분은 <Table 2>와 같다.

7. 수질분석

수질 측정은 1주 6회 진행하였으며, 수온(℃), 용존산소(DO, mg/L), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC; μs/cm), 탁도(Turbidity; NTU), TAN (NH_3+NH_4^+) (mg/L), NO_2-N (mg/L), NO_3-N (mg/L) 및 PO_4-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), NO_2-N (mg/L), NO_3-N (mg/L) 및 PO_4-P (mg/L)은 분석시약(NitraVer®X Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia

<Table 2> Chemical composition of liquid fertilizer manufactured by fermenting bluegill (*Lepomis macrochirus)* and bass *(Micropterus salmoides*)[1]

Composition	Concentration (ppm)
NO_3-N	5,600
Cl	2,050
S	1,260
HCO_3^-	110
P	150
NH_4^+	5,200
K	3,860
Na	380
Ca	1,200
Mg	410
Fe	13.3
Mn	0.7
Zn	1.0
Cu	0.2

[1]Values are means of 2 determinations.

Reagent Set 2604545-KR, NitriVer®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 SO_4 (mg/L)는 이온크로마토그래피(930 Comact IC Flex, Metrohm Co., Herisau, Switzerland)를 이용하여 분석하였다.

8. 통계처리

EXP1 및 EXP2 실험 종료 시 측정된 다량원소 6종(K, Ca, Mg, Na, Cl, SO_4)과 미량원소 4종(Fe, Zn, Mn, Cu) 수질분석 자료는 SPSS Version 10 (SPSS, 1999) 프로그램의 일원분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 분석하였으며, 통계분석의 유의수준은 5% ($P<0.05$)에서 결정되었다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

실험구(CAS구, DAS구)별 14주간 사육된 비단잉어의 성장 결과는 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Growth performance of fancy carp (*Cyprinus carpio var. koi*) reared in two experimental groups (CAS and DAS) for 14 weeks

Growth performance	Culture method	
	CAS	DAS
Initial fish No.	120	120
Final fish No.	120	120
Initial total weight of total fish (g)	107,400	105,600
Final total weight of total fish (g)	132,530	140,540
Feed intake(g, DM)	37,890	53,130
WG (%)[1]	23.40	33.09
FE (%)[2]	66.32	65.76
SGR (%)[3]	0.21	0.29
Survival rate (%)[4]	100	100

[1]Weight gain (%) = [final weight (g) - initial weight (g)] × 100/initial weight (g).
[2]Feed efficiency (%) = wet weight gain (g) / dry feed intake × 100.
[3]Specific growth rate (%) = (Ln final weight (g) - Ln initial weight (g)) / experimental days×100.
[4]Survival rate (%) = final fish number / initial fish number × 100.
CAS, coupled aquaponic system; DAS, decoupled aquaponic system

DAS 실험구의 경우 드럼스크린과 슬러지 청소 펌프 설치를 감안하여 CAS 실험구 보다 사료 공급량을 일일 30 % 초과 공급하였다. 증체율

(weight gain, WG) 및 일간성장률(specific growth rate, SGR)은 DAS 실험구가 높은 값을 보였으나, 사료효율(feed efficiency, FE)은 CAS 및 DAS 실험구가 유사한 값을 보였고, 생존율(Survival rate)은 2 실험구 모두 폐사 개체가 출현하지 않아 동일하였다. 본 실험의 경우 사료의 허실을 방지하기 위해 만복공급이 아닌 제한공급 방식으로 이루어진 결과에 따라 사료효율에서는 유사한 값을 나타내었고, DAS 실험구가 CAS 실험구에 비해 공급량이 많은 관계로 증체량이 증가한 것으로 사료된다.

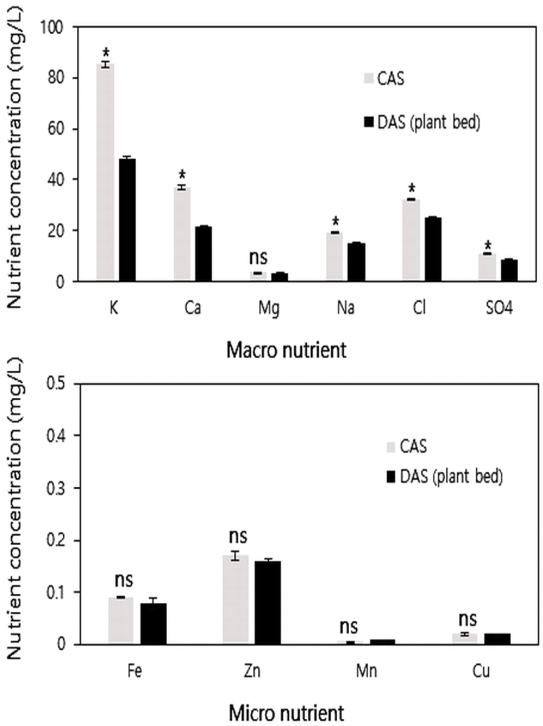
현재 실험의 수질분석 결과는 <Table 3, 4, 5>와 같다. 본 실험에서 수행된 수질관리 방법과 이전 HBFT-AP (hybrid biofloc technology aquaponics) 수질 운영의 차이점은 초기 BFT 운영에 있어 탄산가스를 병행 사용하지 않았다는 점과 유기탄소를 장기간 사용한 부분이다.

14주간 진행된 CAS 및 DAS 아쿠아포닉 시스템 내 어류 사육 수조의 수질분석 결과에서 이전의 결과(Lee et al., 2019a; Lee et al., 2019b; Lee et al., 2020; Lee and Kim, 2021., Lee 2021; Lee 2022)와 비교 시 가장 큰 특징은 아질산 농도 감소 기간이 3주 이상 길어졌다는 것이다. 이는 초기 질산화 세균의 번식과 관련이 있는데, 질산화 세균은 종속영양세균과 달리 성장과 번식을 위해 무기탄소를 사용하며 수중 내 알칼리도 제한보다는 무기탄소 함량이 낮을 시 번식에 부정적 영향을 미친다고 하였다(Guisasola et al., 2007). CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 아질산 농도가 낮게 나타난 것은 CAS 실험구의 여과기 용량이 DAS 시스템에 비해 크다(CAS 680 L vs DAS 400 L)는 점과 CAS는 단일 순환방식에 따라 식물재배지 내 식물 뿌리 또한 질산화세균의 번식 공간으로 활용되었기 때문이라 사료된다. Kaxozi et al.(2021)은 단일순환 아쿠아포닉스에서 수중 내 질소화합물의 감소에 대한 식물 뿌리의 중요성을 언급했다. 본 실험에서 DAS 실험구 내 어류로부터 유래된 슬러지를 기계 장치를 통해 제거했음에도 CAS 실험구에 비해 아질산 농도가 높아진 결과를 나타내어 이를 해결하기 위해서는 여과기 용량을 높여 질산화 미생물의 번식 공간을 확대해 줄 필요가 있을 것으로 사료된다.

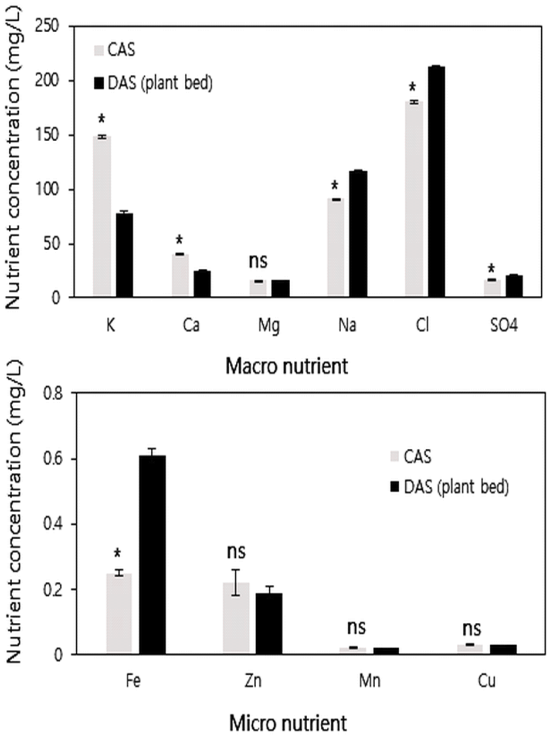
그러나 유기탄소가 중단된 6주 후부터 TAN (total ammonia) 감소에 있어서는 DAS 실험구가 효율적인 것으로 나타났는데, 이는 암모니아 발생은 종속영양 세균의 유기물 분해 과정과 어류의 아가미로부터 발생되지만 DAS 실험구의 경우 기계 장치로부터 어류 사육조 내 슬러지를 빠르게 제거하여 TAN 농도를 CAS에 비해 지속적으로 낮게 유지한 것으로 사료된다(<Table 4, 5>). 식물 입식(7주) 후 DAS 실험구의 식물재배지 내 NO_3-N (mg/L) 농도를 살펴보면 1주간 평균이 15.12±2.08의 값을 보여 CAS 실험구의 21.47±3.72의 값에 비해 낮음을 알 수 있다. DAS 실험구의 식물재배지 내 영양염은 어류 수조에서 발생된 슬러지를 정화조로 수집 후 정화조 내에서 무기물화 및 질산화과정을 거쳐 유입되나 어류 사육 수조 내에서 발생되는 무기영양염의 허실로 CAS에 비해 낮게 나타난 것으로 사료된다. 이를 보완하기 위해 DAS 시스템의 경우 부족 영양염에 대해 일부 보충하게 되는데(Goddek et al., 2016), 본 실험에서는 시중에서 흔히 구할 수 있는 농업용 복합비료와 국내 내수면 유해 어종인 블루길, 베스의 발효 액상비료를 EXP1와 EXP2 기간 동안 정화조에 투입하였다(<Table 5>). EXP1와 EXP2 실험 종료 시(10주, 14주) CAS 실험구는 EC (㎲/cm) 487.2±11.2 및 712.3±24.5, NO_3-N (mg/L) 44.63±3.21 및 66.32±2.56, PO_4-P (mg/L) 19.14±0.98 및 22.57±0.32의 값을 보였고(<Table 4>), DAS 실험구는 EC (㎲/cm) 342.8±19.8 및 687.4±45.8, NO_3-N (mg/L) 28.74±2.67 및 56.23±6.21, PO_4-P (mg/L) 4.21±1.26 및 20.24±2.28의 값을 나타내었다(<Table 6>).

EXP1와 EXP2 실험 종료 시(10주, 14주) K를 포함한 6종류의 다량원소와 Fe를 포함한 4종류의 미량원소 분석 결과는 [Fig. 5, 6]와 같다. K와 Ca

의 경우 CAS 및 DAS 실험구 사육수의 pH 유지를 위해 지속적으로 투입된 KOH 및 $Ca(OH)_2$의 영향으로 EXP1 기간(7~10주)에 비해 EXP2 기간(11~14주)에 높은 농도 값을 나타내었다. 또한 CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 EXP1 및 EXP2 실험에서 유의하게 높은 K (EXP1 CAS 85.3±1.2 mg/L, DAS 48.5±0.5 mg/L, EXP2 CAS 148.4±1.2 mg/L, DAS 78.5±0.8 mg/L)와 Ca (EXP1 CAS 37.2±0.8 mg/L, DAS 21.8±0.3 mg/L, EXP2 CAS 40.2±0.6 mg/L, DAS 25.4±0.1 mg/L) 값을 나타내었다(P<0.05).



[Fig. 5] Macro and micro nutrient concentrations in two experimental groups (CAS and DAS) at the end of EXP1 (7~10 weeks). Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).



[Fig. 6] Macro and micro nutrient concentrations in two experimental groups (CAS and DAS) at the end of EXP2 (11~14 weeks). Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).

EXP1에서 Mg를 제외한 다량원소 5종은 CAS 실험구에서 DAS 실험구에 비해 높은 농도를 나타내었으나(P<0.05), EXP2에서는 반대로 Na, Cl, SO_4 농도가 DAS 실험구에서 유의적으로 높은 값을 보였다(P<0.05). 미량원소의 경우 EXP1 실험에서 4종류 미량원소는 모두 유의한 차이를 나타내지 못했으나(P>0.05), EXP2 실험에서 Fe는 DAS 실험구(0.61±0.02 mg/L)가 CAS 실험구(0.25±0.01 mg/L)에 비해 유의하게 높은 값을 보였으며(P<0.05), 나머지 3종류는 유의한 차이를 나타내지 못했다(P>0.05).

<Table 4> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO_2-N, NO_3-N and PO_4-P) in CAS for 1-14 weeks[1]

Culture method		Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (℃)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO_2-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
CAS	Fish	initial	10.21	7.59	24.2	129.6	0.4	0.30	0.059	2.28	0.75
		1	9.23±0.24	7.64±0.07	24.1±0.3	141.0±5.9	3.97±1.27	1.12±0.52	0.024±0.004	0.94±0.08	0.39±0.04
		2	8.84±0.31	7.62±0.04	24.4±0.2	172.7±9.6	4.58±0.98	0.84±0.34	0.039±0.009	0.87±0.23	0.64±0.27
		3	8.69±0.18	7.24±0.31	24.3±0.2	207.8±11.3	2.47±0.53	2.87±0.76	0.153±0.045	2.42±0.96	1.12±0.34
		4	8.34±0.19	6.72±0.54	24.1±0.2	249.1±12.5	1.42±0.41	0.56±0.27	0.872±0.342	5.68±1.97	2.16±0.48
		5	8.45±0.21	6.26±0.38	23.7±0.6	317.4±14.7	1.03±0.15	1.87±0.29	0.348±0.115	9.45±2.42	4.21±1.13
		6	8.51±0.16	6.07±0.31	23.8±1.2	367.8±13.7	0.81±0.12	2.15±0.14	0.145±0.087	14.53±3.89	8.01±2.67
	Fish+Vegetable EXP1	7	8.49±0.12	6.05±0.09	23.8±0.8	399.6±10.2	0.63±0.09	2.87±0.32	0.084±0.016	21.47±3.72	10.94±1.41
		8	8.48±0.10	6.01±0.04	23.1±0.7	431.2±11.7	0.71±0.04	2.96±0.09	0.058±0.012	30.75±4.13	15.48±2.44
		9	8.31±0.25	6.07±0.07	23.5±0.5	459.3±10.9	0.84±0.06	3.12±0.07	0.065±0.005	39.41±3.84	17.32±1.32
		10	8.40±0.16	6.04±0.03	24.1±0.6	487.2±11.2	1.14±0.27	3.17±0.03	0.061±0.003	44.63±3.21	19.14±0.98
	Fish+Vegetable EXP2	11	8.40±0.16	6.07±0.04	24.3±0.2	523.4±23.6	2.02±0.43	3.24±0.11	0.063±0.001	47.82±2.12	21.25±1.02
		12	8.38±0.05	6.11±0.05	24.4±0.5	587.6±27.4	3.14±0.62	3.19±0.07	0.078±0.012	53.62±4.58	22.14±0.51
		13	8.41±0.06	6.06±0.03	25.1±0.7	657.2±30.3	3.84±0.37	3.29±0.05	0.071±0.004	61.24±3.41	23.08±0.26
		14	8.42±0.03	6.02±0.04	25.3±0.3	712.3±24.5	4.04±0.25	3.31±0.03	0.057±0.015	66.32±2.56	22.57±0.32

[1]Values represent the means±SD of the values for 1 weeks: CAS, coupled aquaponic system; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

<Table 5> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO_2-N, NO_3-N and PO_4-P) in fish tank of DAS for 1-14 weeks[1]

Culture method	Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (℃)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO_2-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
DAS (Fish tank)	initial	10.18	7.60	25.1	129.7	0.4	0.28	0.056	2.30	0.78
	1	9.27±0.22	7.71±0.07	25.2±0.1	138.4±4.2	2.14±0.84	1.08±0.32	0.037±0.006	1.45±0.21	0.62±0.03
	2	8.83±0.26	7.84±0.05	25.0±0.1	152.2±5.1	2.08±0.09	1.11±0.16	0.041±0.002	0.97±0.34	0.67±0.02
	3	8.78±0.21	7.61±0.12	24.7±0.2	173.8±8.4	2.47±0.53	1.77±0.38	0.348±0.101	2.12±0.65	0.89±0.09
	4	8.27±0.34	7.37±0.23	24.8±0.1	197.6±8.2	1.42±0.32	1.48±0.27	3.412±0.845	4.87±1.46	1.84±0.37
	5	8.41±0.19	7.12±0.17	25.1±0.1	229.4±10.1	1.35±0.09	1.12±0.21	3.121±0.076	7.21±2.11	2.11±0.12
	6	8.47±0.08	6.85±0.25	24.6±0.3	251.3±9.9	1.41±0.05	1.25±0.13	1.587±0.672	10.54±2.24	4.16±1.35
	7	8.37±0.07	6.54±0.21	24.8±0.2	287.4±11.5	1.16±0.21	1.41±0.19	0.852±0.341	15.68±2.19	5.21±0.52
	8	8.41±0.05	6.27±0.18	24.8±0.1	315.2±9.4	1.08±0.03	1.35±0.08	0.345±0.097	21.63±3.21	7.57±1.08
	9	8.42±0.03	6.31±0.05	24.7±0.2	344.8±10.9	1.21±0.09	1.62±0.25	0.154±0.012	24.38±1.57	9.65±1.14
	10	8.39±0.06	6.28±0.06	24.9±0.1	384.5±10.7	1.34±0.08	1.51±0.07	0.198±0.029	27.64±1.36	10.84±0.67
	11	8.37±0.02	6.14±0.08	25.1±0.1	418.4±9.4	1.66±0.21	2.01±0.38	0.202±0.058	29.37±1.58	11.65±0.21
	12	8.41±0.03	6.21±0.05	24.8±0.2	442.3±11.3	1.79±0.14	1.87±014	0.169±0.065	31.28±2.14	12.84±0.57
	13	8.29±0.08	6.23±0.02	25.2±0.1	485.6±18.7	1.82±0.05	1.92±0.05	0.194±0.031	35.62±2.52	14.32±0.72
	14	8.35±0.04	6.26±0.03	25.0±0.1	518.9±15.5	1.74±0.04	2.05±0.12	0.211±0.048	41.32±3.14	15.25±0.48

[1]Values represent the means±SD of the values for 1 weeks: DAS, decoupled aquaponic system; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

<Table 6> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO_2-N, NO_3-N and PO_4-P) in plant bed of DAS for 1-14 weeks[1]

Culture method		Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (℃)	EC (㎲/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO_2-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
DAS (Plant bed)		initial	10.17	7.62	20.1	129.5	0.4	0.26	0.057	2.27	0.75
	Sludge recycling	1	7.21±0.34	7.82±0.04	20.4±0.2	132.4±2.2	0.52±0.04	2.45±0.87	0.049±0.011	2.18±0.13	0.71±0.02
		2	6.87±0.41	7.86±0.03	19.8±0.4	138.6±2.1	0.71±0.05	3.23±0.56	0.069±0.009	2.28±0.09	0.69±0.01
		3	7.36±0.32	7.82±0.03	20.1±0.1	145.7±3.1	0.72±0.02	4.12±0.62	0.587±0.137	2.98±0.33	0.92±0.11
		4	7.27±0.11	7.67±0.12	20.2±0.1	151.6±4.3	0.69±0.03	2.12±0.86	1.156±0.326	3.16±0.21	1.12±0.09
		5	7.28±0.09	7.54±0.14	20.1±0.2	169.7±8.5	0.63±0.05	1.34±0.48	0.974±0.028	6.08±1.87	1.54±0.21
		6	7.41±0.13	7.26±0.25	18.5±1.2	184.8±9.6	0.66±0.03	1.14±0.17	0.321±0.142	8.41±1.24	1.98±0.37
	Sludge recycling EXP1[2]	7	7.39±0.04	7.12±0.07	17.8±2.5	231.8±14.5	0.64±0.02	3.45±1.23	0.097±0.056	15.12±2.08	4.21±1.26
		8	7.28±0.05	6.41±0.32	19.3±0.8	267.6±12.4	0.65±0.01	3.12±0.23	0.072±0.008	19.43±3.35	7.34±2.05
		9	7.40±0.10	6.18±0.13	18.7±1.3	299.3±13.7	0.74±0.06	3.28±0.12	0.084±0.007	25.48±3.29	9.27±1.08
		10	7.34±0.04	6.09±0.08	19.2±0.8	342.8±19.8	0.73±0.03	2.42±0.47	0.075±0.008	28.74±2.67	11.25±0.76
	Sludge recycling EXP2[3]	11	7.47±0.05	6.02±0.14	18.9±0.3	415.2±21.3	0.84±0.12	1.88±0.31	0.063±0.005	34.52±3.21	13.25±1.85
		12	7.39±0.07	6.14±0.06	19.5±0.4	497.6±34.2	1.14±0.24	1.95±0.09	0.082±0.011	41.43±2.97	16.32±2.14
		13	7.31±0.03	6.05±0.08	21.2±0.8	579.6±41.3	1.31±0.13	2.11±0.07	0.075±0.004	48.39±4.54	18.65±2.36
		14	7.33±0.01	6.03±0.02	20.7±0.3	687.4±45.8	1.42±0.06	2.09±0.05	0.079±0.003	56.23±6.21	20.24±2.28

[1]Values represent the means±SD of the values for 1 week: DAS, decoupled aquaponic system; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

[2]EXP1 results represent the water quality values supplemented with 50 g of commercial composite fertilizer (nitrogen 21 %, phosphorous 17 %, potassium 17 %) per day in addition to sludge generated from fish.

[3]EXP2 results represent the water quality values supplemented with 150 ml of liquid fertilizer manufactured by fermenting bluegill (*Lepomis macrochirus*) and bass (*Micropterus salmoides*) per day in addition to sludge generated from fish.

이러한 경향은 EXP2 실험기간 동안 DAS 실험구의 정화조 내 투입한 베스 및 블루길 발효 액상비료의 높은 Na, Cl 및 Fe 농도(<Table 2>)에 기인한 것으로 사료된다.

EXP1 및 EXP2의 엽채류 생산실험의 결과는 <Table 7>와 같다. EXP1의 초기 엽채류의 개체별(품종별 10개체 샘플) 뿌리, 줄기를 제외한 엽중량은 Fairly 0.87±0.31 g, Decarte 0.35±0.11 g, Gauguin 0.42±0.13 g, Ezabel 1.21±0.24 g, Ovired 0.57±0.15 g로 조사되었고, 25일간 성장 후 실험구별 전체 엽중량은 CAS 실험구 28,293 g, DAS 실험구 26,807 g로 나타났다(<Table 7>). CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 전체 엽중량이 높은 것은 엽채류 입식 초기 DAS 실험구의 식물재배지 수질 환경 중 EC, NO_3-N, PO_4-P 농도가 CAS 실험구의 농도보다 낮아기 때문으로 사료된다(<Table 4, 6>).

EC는 pH와 함께 아쿠아포닉스 현장에서 수질 특성을 파악할 수 있는 중요한 요소로 물에 용해된 이온의 양이라 말할 수 있어 식물 영양분 요구량 파악 중요한 측정 지표이다(Hager et al., 2021). 아쿠아포닉스에서 추천되는 EC 농도는 300-600 ㎲/cm으로 보고되어 있으나(Rakocy et al., 2006), DAS 실험구의 경우 입식 초기 1주간 EC 농도는 231.8±14.5 ㎲/cm 값을 보여 입식 시점이 빨랐음을 알 수 있고 이에 따라 초기 성장이 더뎌 실험 종료 4주에서 CAS 실험구에 비해 성장이 늦어진 것이다(<Table 7>).

EXP2의 초기 엽채류의 개체별(품종별 10개체 샘플) 뿌리, 줄기를 제외한 엽중량은 Volare 1.21±0.27 g, Decarte 0.41±0.09 g, Xaroma 0.74±0.25 g, Ezabel 1.12±0.15 g, Skelton 0.86±0.22 g로 조사되었고, 25일간 성장 후 실험구별 전체 엽중량은 CAS 실험구 67,749 g, DAS 실험구 71,247 g으로 나타났다(<Table 7>). EXP1와 달리 DAS 실험구가 CAS 실험구에 비해 전체 엽중량 생산이 높게 나타났는데, 이는 실험 기간이 경과함에 따라 DAS 실험구의 식물재배지 수질 환경은 EXP1와 달리 아쿠아포닉스 운영에 적합하게 변화되었으며, 더불어 미량원소 중 Fe의 농도가 CAS에 유의하게 높게 나타났기 때문이다($P<0.05$). Thorarinsdottir (2015)은 아쿠아포닉 시스템 내에서Fe는 엽록체와 전자전달 사슬에 이용되는 미량원소로 광합성에 있어 매우 중요한 제한요소로 작용하며 Fe 부

<Table 7> Growth for eight cultivar of european lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in CAS and DAS for EXP1 (7~10 weeks) and EXP2 (11~14 weeks)

Experiment period	Total leaf weight (g)	
EXP1 (7-10 weeks)	CAS	DAS
Fairly (No. 180) (*Lactuca sativa*)	7,965	7,232
Decarte (No. 180) (*Lactuca sativa*)	5,309	5,169
Gauguin (No. 180) (*Lactuca sativa*)	5,109	5,053
Ezabel (No. 180) (*Lactuca sativa*)	4,743	4,608
Ovired (No. 180) (*Lactuca sativa*)	5,167	4,746
Sum (No. 900)	28,293	26,807
EXP2 (11-14 weeks)	CAS	DAS
Volare (No. 180) (*Lactuca sativa*)	16,385	17,718
Decarte (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,932	13,013
Xaroma (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,749	13,768
Ezabel (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,998	13,115
Skelton (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,686	13,632
Sum (No. 900)	67,749	71,247

CAS, coupled aquaponics system
DAS, decoupled aquaponic system

족 시 잎과 식물 전반에 황색으로 변하며 결국 괴사하게 되므로 인위적인 첨가가 필요하다 하였다. CAS 실험구에 비해 DAS 실험구의 높은 Fe 농도는 엽채류 성장에 큰 영향을 미쳤을 것으로 고려할 수 있다.

또한 엽채류 근권부(root) 수온의 범위에서 CAS 실험구는 25℃ 내외, DAS 실험구는 20℃ 내외로 DAS 실험구의 엽채류 근권부 온도가 5℃ 정도 낮았다. Suzuki and Sakamoto(2015)는 적상추(red leaf lettuce)로 수경재배 시 20~25℃ 수온 범위에서는 성장 차이가 없음을 보고하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 본 실험의 결과와 비교 시 수온에 의한 영향은 큰 작용을 하지 않았을 것으로 유추된다. Lee et al.(2019b)는 아쿠아포닉스에서 엽채류의 성장과 용수 내 영양염 관계에서 절대량 보다 영양소 상호관계가 중요함을 보고하였다. 특히 K와 Ca는 길항작용을 하는 영양소로 용수 내 적정비(3:1) 유지는 중요하다. EXP1와 EXP2 실험기간 동안 CAS 및 DAS 실험구 모두 K와 Ca의 비는 유사하게 유지되어 CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 높은 K 및 Ca 농도를 유지하였음에도 엽채류 성장 차이에 긍정적 영향은 없었을 것으로 사료된다.

EXP1과 EXP2 사이의 엽채류 생산성의 가장 큰 차이는 조도에 의한 원인으로 설명할 수 있으며, 엽채류 성장에 광량 및 광질은 중요한 요소로 보고되고 있다(Lu 2021). [Fig. 3, 4]에서 엽채류 입식 후 실험 기간별 조도(lux)는 동절기(12~3월) 실험 기간 동안 7~10주간은 흐린 날씨, 비 및 눈의 지속으로 맑은 날이 적었고, 또한 광주기 역시 짧았으나 시간이 경과함에 따라 11~14주 기간에는 맑은 날씨와 광주기가 길어져 조도량도 증가하여 엽채류 성장이 EXP1 기간에 비해 EXP2 기간에 2~3배 증가된 것으로 사료된다.

현재 정부에서는 블루길, 베스 퇴치사업을 실시하고 있으며, 이러한 유해자원을 활용하기 위해 반려동물 사료 및 어묵 생산화 등 여러 방안을 고려하고 있다. 본 연구에서도 블루길, 베스를 발효시킨 액상 비료는 현재 밭농사 및 원예에 사용하고 있어 DAS 시스템에 적용 시 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

Na는 상추류(lettuce)에 대해 배지 내 100 mg/L를 초과하지 않는 것이 일반적으로, 이러한 이유는 배지 내 높은 Na는 엽채류에 빠르게 흡수되어 K 의 흡수를 방해하기 때문이며, 특히 순환식 시스템에서 K는 작물의 최적 성장을 위해 고려되는 아주 중요한 요소이다(Lee et al., 2019b). Cl은 식물 체내 건조함량(0.2~2.0% dw)이 상당히 높지만 식물에 쉽게 흡수되며 식물체 내에서 매우 유동적이고, 광합성 과정과 기공 개방 조절에 관여하며 용수 내 Cl 농도의 감소보다 과량으로 존재 시 식물 수축을 유발하여 성장을 감소시킨다(Maucieri et al., 2019). 본 EXP2 실험에서 DAS 식물재배지 내 Fe 증가는 긍적적 요인으로 작용했으나 Na와 Cl 농도도 동시 증가하여 블루길, 베스의 발효 액상비료의 지속적인 사용은 부적당한 것으로 고려될 수 있으며([Fig. 6]), 추후 연구가 필요한 사항으로 사료된다.

현재 국내 아쿠아포닉스 산업은 농업 중심으로 수산물에 의한 생산성이 매우 적고, 대다수 엽채류 생산에 의존하고 있다. 이러한 이유는 어류와 엽채류의 생산환경이 달라 어종이 국내 온수성 어종인 잉어류, 메기 등에 한정되고 뱀장어, 연어, 송어 등 고부가가치 어종 도입이 제한되기 때문이다. 본 연구에서 개별 환경 적용이 가능한 DAS 시스템 도입 연구는 국내 수산 중심의 아쿠아포닉스 산업화를 위한 field test 규모의 첫 시도로, 향후 DAS 시스템 발전을 위한 기초자료 제공에 의의가 있다고 할 수 있다.

References

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.

Emerenciano MGC, Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M and Miranda-Baeza A(2017). Biofoc technology(BFT) : A tool for water quality management in aquaculture. INTECH, 91~109. http://dx.doi.org/10.5772/66416.

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.

Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S and Keesman KJ(2016). Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. Water 8(7), 1~29.
https://doi.org/10.3390/w8070303.

Goddek S, Joyce A, Wuertz S, Körner O, Bläser I, Reuter M and Keesman KZ(2019). Chapter 8 Decoupled aquaponics systems. In: Aquaponics food production systems. Goddek S, Joyce A, Kotzen B and Burnell GM. eds. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 201~229.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8.

Guisasola A, Petzet S, Baeza JA, Carrera J and Lafunente J(2027). Inorganic carbon limitations on nitrification: Experimental assessment and modelling. Water Research 41(2), 277~286.
https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.10.030.

Hager J, Bright LA, Dusci J and Tidwell J(2021). Aquaaponics production manual: A practical handbook for growers. Kentucky state university, Land grant program, 1-60. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/355972997 on Dec 15, 2021.

Joyce A, Goddek S, Kotzen B and Wuertz S(2019). Chapter 2 Aquaponics: closing the cycle on limited water, land and nutrient resources. In: Aquaponics food production systems. Goddek S, Joyce A, Kotzen B and Burnell GM. eds. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 19~34.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8.

Kaxozi N, Abraham B, Kaiser H and Wilhelmi B(2021). The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. Annals of Microbiology 71(1), 1~13.
https://doi.org/10.1186/s13213-020-01613-5.

Kim SR, Lee CR. and Lee SM(2006). Effects of dietary supplementation of Paprika and Spirulina on pigmentation of swiri *Coreoleuciscus splendidus*. J Aquacult 19(4), 261~266.

Kim YO and Lee SM(2014). Effect of dietary carotenoids source on growth and skin color of red- and white-colored fancy carp *Cyprinus carpio* var. *koi*. Kor J Fish Aquat Sci 47(6), 790~795.
http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2014.0790.

Kim YO and Lee SM(2015). Influence of spirulina level in diet on skin color of red- and white-colored fancy carp *Cyprinus carpio* var. *koi*. Journal of Fishiers and Marine Sciences Education 27(2), 414~421.
http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.2.414.

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.

Lee CR and Lee SM(2008). Effect of dietary supplementation of pigment sources on pigmentation of the round tailed paradise fish *Macropodus chinensis* and pale chub *Zacco platypus*. J Aquacult 21(4), 213~217.

Lee CR, Pham MA. and Lee SM(2010). Effects of dietary paprika and lipid levels on growth and skin pigmentation of pale chub (*Zaccoplatypus*). Asian-Aust. J Anim Sci 23, 724~732.
https://doi.org/10.5713/ajas.2010.90462.

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(2), 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(5), 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 grwth of Japanese eels *Anguilla japonica* and leafy vegetables in a hybrid BFT-aquaponic system. Korean J Fish Aquat Sci 53(4), 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 Janpanese 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.

Lee DH(2022). 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. JFMSE 34(1), 133~148. https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.2.34.1.133.

Lu N(2021). Light enviroment and plant growth in plant factories. IOP Conf Ser, Earth Environ Sci 686, 1~9. https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/686/1/012002.

Rakocy JE, Masser MP and Losordo TM(2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC pbulication No. 454, Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/284496499 on May 18, 2016.

Suzuki T and Sakamoto M(2015). Effect of root-zone temperature on grwoth and quality of hydroponically grown red leaf lettuce (Lactuca sativa L. cv. Red wave). American Journal of Plant Sciences 6, 2350~2360. https://dx.doi.org/10.4236/ajps.2015.614238.

Thorarinsdottir RI(2015). Aquaponics guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33~39. https://doi/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 : 09 August, 2022
• Revised : 22 August, 2022
• Accepted : 26 August, 2022