

Coupled Aquaponics 및 Decoupled Aquaponics 생산 방식에 따른 엽채류의 성장 비교

이 동 훈*

†경기도해양수산자원연구소(연구소)

Comparative Study on Growth of Leafy Vegetables Reared in the Different Culture Systems between Coupled Aquaponics and Decoupled Aquaponics

Dong-Hoon LEE†

†Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

Aquaponics is a complex cultivation system that combines aquaculture and hydroponic cultivation in agriculture. Many of today's coupled aquaponic systems (CAS) circulate water and nutrients from fish to plants to fish, but it is not always guaranteed that the fish preferences are completely aligned with the optimum requirements of the plants. The aim of decoupled aquaponic system (DAS) which would better secure optimal environmental conditions for both the plant and fish production units is to improve sustainability and productivity concomitant with lowering environmental emissions. The study examined the growth difference of leafy vegetables and Nile tilapia cultured in the culture systems between the CAS and DAS for 14 weeks. Five cultivars of European lettuces, including volare lettuce (*Lactuca sativa*. L. 'Volare'), skilton lettuce (*Lactuca sativa*. L. 'Skilton'), ovired lettuce (*Lactuca sativa*. L. 'Ovired'), caipira lettuce (*Lactuca sativa*. L. 'Caipira') and ezabel lettuce (*Lactuca sativa*. L. 'Ezabel') were employed in the experiment period from 10th to 14th weeks. After planting leafy vegetables in the two systems, leafy vegetable productivity was compared at the end of growth period (32 days). The Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) used in the experiment was 125 kg with a average fish weight of 24 g, divided by equal weight into CAS and DAS. Feed supply was limited to 1.0% per fish body weight and supplied twice a day, and the amount of feed supplied to the DAS experimental group was increased by about 20% compared to CAS. In the leafy vegetable production comparison, there was no significant difference in the leafy weight of the four cultivars ($P>0.05$) excluding the ovired lettuce cultivar ($P<0.05$) between the DAS and the CAS experimental group. In weight gain (%) of fish, the DAS experimental group was effective in increasing fish weight due to the higher feed supply in fish tank of DAS. Therefore, this experiment showed that the DAS production method can provide optimal growth conditions for both fish and leafy vegetables.

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

I. 서론

인구 증가로 인해 에너지, 식량, 물에 대한 수

요가 급증하고 있으며, 이는 무엇보다도 환경 문제와 식량 부족에 직접적인 영향을 미치며, 이러한 식량 부족으로 인해 최근 몇 년 동안 자원의

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

효율적인 사용을 통해 물 부족을 최소화하고 지속 가능한 농어업 강화를 지원하는 식량생산 시스템인 아쿠아포닉스(aquaponics)가 개발되었다(FAO 2014). 아쿠아포닉스는 수산양식과 농업의 수경재배가 결합된 복합재배 시스템으로, 수산동물(어류, 새우류 등)의 성장과 생존을 위해 공급된 먹이(사료)가 미생물에 의해 각종 무기물과 질산염으로 분해 및 생성된 것을 식물이 성장 영양소로 흡수하면서 양어 수질의 안정화와 식물 성장을 이루어지게 하여 사육수의 교환없이 지속적으로 농·수산물을 생산할 수 있는 친환경 생산방법이다(FAO, 2014).

고전적인 아쿠아포닉스 시스템인 CAS (coupled aquaponic system)는 양식시설과 수경재배지 용수가 혼합되는 형태로, 양식 어종 및 식물 모두 동일한 수질 환경을 공유한다(Rakocy et al. 2006). 따라서 이러한 시스템은 반드시 품종별 최적의 재배 조건에 대한 절충안이 필요하다. 반면 개량된 아쿠아포닉스 시스템인 DAS (decoupled aquaponic system)는 양식 어종과 식물의 개별 생산을 최적화할 수 있는 모델로 양식 및 수경재배 장치의 물과 영양분을 서로 분리하여 두 시스템의 수질환경을 제어하는 것으로, 물고기와 식물 모두에게 최적의 성장 조건을 제시한다(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.

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 2022a), DAS 시스템에 연구는 아직 활발히 진행되지 않고 있다. Lee(2022b)는 비단잉어를 이용한 엽채류 생산 아쿠아포닉스 연구에서 CAS와 DAS 시스템을 적용하여 DAS 시스템이 비단잉어의 증체율 증가 및 어류 수질관리에 유리함을 제시하였다.

틸라피아(tilapia)는 전 세계적으로 양식되는 여러 시클리드 중의 일반 이름으로 1990년 379,169톤에서 2020년 6,100,719톤으로 전 세계 연간 생산량이 지속적으로 증가하고 있으며 다양한 양식 틸라피아 중 중에서 북아프리카가 원산지인 나일 틸라피아(*Oreochromis niloticus*)는 양식에 가장 많이 사용되는 종이다(Fracalossi and Turchini, 2022). 또한 2020년에 4,514,615톤이 생산된 나일 틸라피아는 현재 전 세계적으로 세 번째로 많이 양식되는 어류로, 74개국에서 상업적 생산이 이루어지며 최대 생산국은 중국 1,241,410톤이며, 인도네시아 1,172,633톤, 이집트 954,154톤, 브라질 343,596톤, 태국 205,971톤 순이다(FAO, 2022). 2022년 국내 내수면 어류 전체 양식 생산량은 29,005톤이며, 틸라피아 생산량은 198톤으로 전체 내수면 양식생산량의 0.6%를 차지하며, 2006년 272톤에 비해 약 1/3 가량 감소하였다(KOSIS, 2003).

그러나 최근 기후변화로 내수면 육상양식장 중 순환여과식 및 BFT 도입 양식장에서는 하절기 수온이 30℃ 이상을 넘기는 경우가 빈번하게 발생하고 있으며, 온수성 어류인 잉어의 경우 32℃ 근방에서 집단폐사가 발생할 수 있어(Meuwis and Heuts 1957) 향후 수온 관리가 중요한 문제로 대두될 것으로 전망된다.

틸라피아는 열대성 어류로 생육 최적 수온이 25~34℃로(Xie et al., 2011), 현재 국내에서 생산량이 적으나 기후변화에 따라 하절기 아쿠아포닉

스 적용 가능성이 높아질 것으로 전망된다. 따라서 본 연구의 목적은 틸라피아를 이용한 아쿠아포닉스 생산시스템(CAS vs DAS)간 어류 및 업체류 생산성에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 조사하여 향후 국내 DAS 시스템 연구에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 실험사료 준비

실험에 사용된 사료는 일반 상업용 메기 사료 (2.2~3.5 mm) Supercat F-GR (Cargill Agri Purina, Inc. Seongnam, Korea)를 이용하였으며, 사료의 구성 성분은 <Table 1>와 같다.

<Table 1> Chemical composition of the experimental diet¹

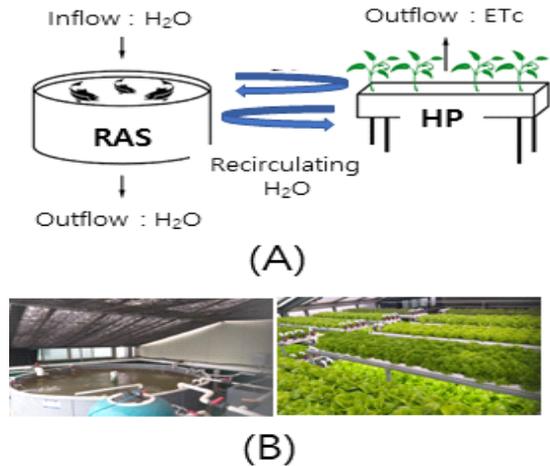
Composition	Diet
Moisture (%)	8.1
Crude protein (%)	45.2
Crude lipid (%)	7.8
Crude ash (%)	9.3
Crude fiber (%)	2.4

¹Values are means of 2 determinations.

2. 시스템 구성 및 운영

실험에 사용된 CAS 및 DAS 시스템은 Lee(2022)의 이전 연구에서 사용된 시스템으로, 시설 구성도는 [Fig. 1, 2]와 같다. CAS 시스템의 구성도는 어류 원형수조(ø 4.5 m × H 0.7 m) 1개, 선프수조(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 수조 BFT 유지를 위한 벤츄리 에어 공급 시스템 순환 펌프(1.0 HP) 1개, 식물베드지 하단에 빛 공급을

위한 형광등 40개로 구성되었다. 식물 재배 포트는 베드지 당 45개로 총 900개의 재배지로 구성되었으며, 식물에 공급되는 물 주수 PVC 배관은 지름 25 mm, 배수 배관은 지름 40 mm를 사용하였고, 최종 집수되어 어류 사육수조로 유입되는 배관은 지름100 mm를 사용하였다.



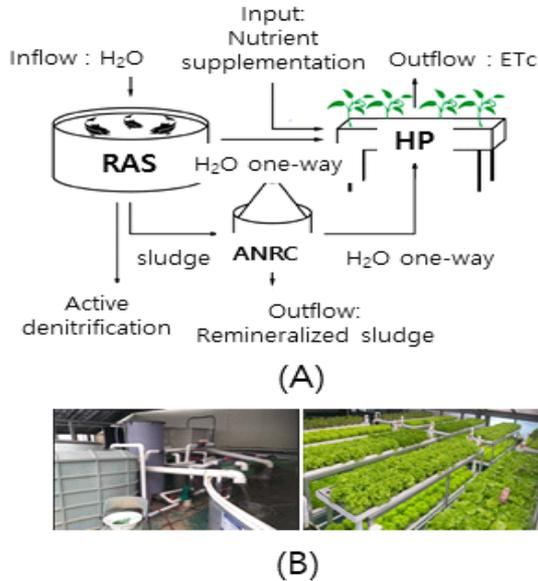
[Fig. 1] Water flow in CAS (coupled aquaponic system) (A) Goddek et al. (2016), (B) compartments and water flow of the experimental design, fish tank (ø 4.5 m) → sump tank (2 × 1 m) → pump (1.5 HP) → biohelixfilter (680 L) → vegetable bed (2.9 × 0.6 × 0.1 m, No. 20) → fish tank. ETc, crop evapotranspiration; HP, hydroponics; RAS, recirculating aquaculture system.

CAS와 비교 실험에 사용한 DAS 시스템의 구성도는 [Fig. 2]에 나타내었다. 어류 사육지 및 식물재배지 구성은 CAS와 같으나 어류에서 발생하는 슬러지는 드럼스크린(망목 : 50 μm, 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.

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.

물재배지로 순환되었으나, 어류 사육지로 용수 유입은 되지 않았다.



[Fig. 2] Water flow in DAS (decoupled aquaponic system) (A) Goddek et al. (2016), (B) compartments and water flow of the experimental design, aquaculture [fish tank (φ 4.5 m) → sump tank (2 × 1 m) → pump (1.5 HP) → drum screen (water passing through) → biofilter (400 L) → fish tank (φ 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). ETC, crop evapotranspiration. ANRC, anaerobic nutrient remineralization component; ETC, crop evapotranspiration; HP, hydroponics; RAS, recirculating aquaculture system

정화조 통 안에는 2부분으로 구획화하여 한 부분은 침전조로 사용하였고, 다른 한 부분은 유동상 여과재(φ 17 × 11 mm)를 넣어 질산화 미생물이 정착하도록 하였다. 정화조에서 여과된 물은 식물재배지 섬프수조(0.5 × 0.8 × 1.1 m)와 식

3. 실험어 배치 및 사료공급

실험에 사용된 나일 틸라피아(*Oreochromis niloticus*)는 경기도해양수산자원연구소에서 사육 관리한 품종으로 평균 어체중 24 g을 갖는 개체 125 kg (5,201마리)을 CAS 63,034 g (2,594마리) 및 DAS 62,829 g (2,607마리)으로 나누어 개별 시스템 수조에 분리 배치하였다. 사료공급은 수질관리의 안정화 유도 및 수중 내 미급여 사료 방지를 위해 어체중 당 1.0 %로 제한하여 1일 2회 공급하여 14주간 진행되었고, DAS 실험구는 CAS에 비해 사육 수온이 2~3℃ 높게 관리됨에 따라 사료 공급량을 20 % 정도 높여 실험을 진행하게 되었다.

4. 엽채류 생산

엽채류 생산 실험은 어류를 입식하여 9주간의 적응 기간을 거친 후, 10-14주에 걸쳐 1회 생산 실험을 진행하였다. 유럽산 상추류(*Lactuca sativa*) 볼라레(volare lettuce), 스킬톤(skilton lettuce), 오비레드(ovired lettuce), 카이피라(caipira lettuce), 이자벨(ezabel lettuce) 5품종을 사용하였다. 엽채류는 품종당 180개체가 입식되었고, 상단(태양광) 및 하단(형광등)의 광량 차이(상단 13,000 lx ~ 35,000 lx, 하단 7,500 lx ~ 9,800 lx)로 엽채류는 각 품종별 상·하단을 교차하여 광량 차이에 의한 생산성 오차를 배제토록 배치하였다. 입식 후 32일 시점에 성장 측정이 이루어졌다.

5. 수질관리 및 분석

현재 실험에서 사용한 어류 사육 수질관리는 Lee et al.(2022b)가 보고한 방법과 같이 동일하게 진행하였다. 기존의 방식과 달리 CO₂(탄산가스) 투입 과정은 없었다. 물만들기 초기 미생물은 실험

험 시스템 당 시판용 유용미생물 제품인 BFT-ST (EgeeTech, Ltd., USA) 11.4 L와 질산화 미생물 제품인 Eco-Nit (Ecotechservice, Ltd., Korea) 7.6 L가 사용되었다. 어류 입식 후 2주 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 이후 2개 실험구는 엽채류의 성장을 감안하여 식물 재배지 내 pH를 6.0±0.1 범위에서 유지되도록 하였고, CAS 실험구는 KOH (Samchun Ltd., Pyeongtaek, Korea) 40 g을 pH 6.0 이하로 하강할 경우 투입하였고, DAS 실험구의 어류 사육수조에는 KOH 20 g을 pH 6.5 이하로 하강할 경우, 식물 재배지에는 KOH 5 g을 pH 6.0 이하로 하강할 경우 투입하였다. DAS 실험구의 식물 재배지 내 초기 영양분 부족에 따라 화학 복합비료(nitrogen 21 %, phosphorous 17 %, potassium 17 %) 슈퍼21(NAMHAE CHEMICAL Co., Yeosu, Korea)을 1일 50 g 용량으로 실험 6주부터 정화조에 투입하였다.

수질 측정은 1주 6회 진행하였으며, 수온(°C), 용존산소(DO, mg/L), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC; $\mu\text{s}/\text{cm}$), 탁도(Turbidity; NTU), TAN ($\text{NH}_3+\text{NH}_4^+$) (mg/L), $\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L) 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ (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), $\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L) 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)은 분석시약(NitraVer[®]X Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia 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. 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.

6. 시료측정

본 실험에서 엽채류 측정은 5종류의 엽채류 입식 후 32일 시점에 각 실험구(CAS vs DAS) 별 엽채류 종류별 12개 샘플을 무작위 선택하여 성장도 조사를 하였으며, 상단 6개 및 하단 6개의 엽채류가 샘플되었다. 엽채류의 뿌리 및 잎 부분을 분리하여 엽수 (no), 엽중량 (g), 엽체길이 (cm) 및 뿌리무게 (g)를 측정하였고, 이자벨 및 스킨톤 엽채류의 경우 엽수 파악이 어려워 엽수는 측정되지 않았다. 나일틸라피아의 어체중 측정은 엽채류 최종 측정 다음날, 각 실험구별 총 어체 중량 및 전체 마리수를 파악하여 성장도 조사가 이루어졌다.

7. 통계처리

엽채류 실험 종료 시 측정된 엽채류 성장 데이터(엽수, 엽중량, 엽체길이, 뿌리중량) 및 다량원소 6종(K, Ca, Mg, Na, Cl, SO_4)과 미량원소 4종(Fe, Zn, Mn, Cu) 수질분석 자료는 SPSS Version 10 (SPSS, 1999) 프로그램의 독립표본 T검정(t-test)을 이용하여 분석하였으며, 통계분석의 유의수준은 5% ($P<0.05$)에서 결정되었다.

Ⅲ. 연구 결과

14주간 진행된 CAS 및 DAS 아쿠아포닉 시스템 내 수질분석 결과는 <Table 2, 3, 4>와 같다. 두 실험구 모두 아질산염 농도가 안정화(<0.1 mg/L) 되기까지 6주가 소요되었고, TAN의 경우 어류입식 후 1-2주간을 제외하고 DAS 실험구가

<Table 2> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in CAS for 1-14 weeks¹.

Culture method	Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (°C)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	
CAS	initial	8.83	7.87	23.1	117.6	0.3	0.11	0.061	2.20	0.71	
	1	8.87±0.14	7.84±0.03	22.2±0.4	139.3±9.2	3.21±1.34	0.64±0.11	0.057±0.003	1.78±0.31	0.72±0.01	
	2	8.32±0.41	7.83±0.02	22.5±0.3	163.6±11.4	3.74±0.48	1.97±0.54	0.061±0.002	0.87±0.42	0.71±0.02	
	3	8.24±0.25	7.51±0.22	22.7±0.1	197.5±13.8	1.58±0.83	0.39±0.11	0.116±0.034	4.32±1.68	2.14±0.74	
	4	7.74±0.27	7.04±0.37	22.4±0.2	223.2±12.6	1.05±0.21	0.21±0.09	0.458±0.182	14.36±5.62	5.46±1.52	
	5	7.62±0.18	6.82±0.12	22.8±0.3	275.4±15.2	0.84±0.11	0.09±0.02	0.212±0.097	18.64±2.11	7.68±0.89	
	6	7.47±0.24	6.51±0.26	22.5±0.2	316.2±13.8	0.89±0.09	0.08±0.01	0.104±0.066	23.62±2.24	9.23±0.67	
	7	7.44±0.12	6.23±0.14	22.6±0.1	367.2±14.7	0.69±0.12	0.22±0.08	0.084±0.015	27.85±2.19	11.41±0.61	
	8	7.38±0.21	6.02±0.09	22.8±0.2	411.3±12.5	0.62±0.07	1.12±0.64	0.068±0.011	33.21±3.21	13.98±1.01	
	9	7.54±0.12	6.04±0.03	22.9±0.1	453.8±12.1	0.57±0.03	1.57±0.25	0.065±0.002	36.28±1.57	16.52±1.36	
	10	7.45±0.16	6.02±0.03	22.7±0.2	496.5±14.7	0.73±0.08	2.14±0.31	0.077±0.003	39.89±1.36	17.68±0.62	
	11	7.32±0.18	5.98±0.04	22.7±0.1	546.7±16.2	0.72±0.02	2.08±0.22	0.059±0.009	42.35±1.58	19.25±0.59	
	fish+vegetable	12	7.45±0.12	6.09±0.03	22.9±0.2	593.2±14.8	1.12±0.24	1.92±0.08	0.063±0.003	47.61±2.14	22.63±1.21
		13	7.37±0.15	6.02±0.01	22.8±0.1	642.3±16.3	1.37±0.15	1.94±0.02	0.067±0.002	54.86±2.52	25.36±1.24
	14	7.24±0.06	6.13±0.05	23.1±0.2	702.5±15.8	1.42±0.11	1.97±0.03	0.059±0.005	61.24±3.14	28.31±1.35	

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

<Table 3> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in fish tank of DAS for 1-14 weeks¹.

Culture method	Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (°C)	EC (us/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	8.82	7.85	23.3	117.4	0.3	0.13	0.062	2.10	0.69
	1	8.69±0.31	7.86±0.01	25.2±1.2	129.2±6.4	2.97±1.24	2.14±0.82	0.072±0.003	2.21±0.02	0.51±0.12
	2	8.11±0.24	7.91±0.02	25.5±0.1	142.7±7.3	1.54±0.28	1.62±0.21	0.076±0.002	2.19±0.01	0.56±0.03
	3	7.64±0.08	7.71±0.07	25.3±0.1	162.5±8.8	0.74±0.11	0.33±0.12	0.326±0.141	2.68±0.13	1.09±0.28
	4	7.51±0.12	7.64±0.04	25.8±0.1	196.7±11.2	0.51±0.09	0.12±0.04	0.224±0.097	4.76±1.27	1.36±0.21
	5	7.29±0.23	7.34±0.23	25.1±0.1	231.4±16.4	0.48±0.03	0.09±0.02	0.113±0.082	10.42±3.53	2.83±0.52
	6	7.14±0.14	6.97±0.18	25.6±0.3	273.9±17.7	0.49±0.01	0.08±0.01	0.081±0.012	17.38±3.24	5.36±1.84
	7	7.19±0.06	6.74±0.12	25.8±0.2	318.9±18.6	0.47±0.01	0.13±0.06	0.077±0.006	22.14±2.25	6.89±1.11
	8	7.12±0.04	6.59±0.09	25.8±0.1	357.3±17.4	0.48±0.01	0.21±0.08	0.086±0.004	25.76±2.13	8.23±1.67
	9	7.15±0.06	6.52±0.02	25.7±0.2	412.4±22.5	0.48±0.01	0.24±0.03	0.083±0.002	32.54±4.58	11.64±1.68
	10	7.16±0.02	6.54±0.01	25.9±0.1	462.3±21.3	0.49±0.02	0.23±0.01	0.091±0.004	37.46±2.76	12.74±1.09
	11	7.11±0.03	6.58±0.02	25.1±0.1	497.2±19.8	0.48±0.01	0.26±0.02	0.082±0.005	39.21±1.64	14.23±1.14
	12	7.08±0.02	6.53±0.02	25.8±0.2	524.6±16.8	0.51±0.03	0.25±0.01	0.086±0.002	39.57±1.12	15.66±0.98
	13	7.08±0.01	6.55±0.01	25.2±0.1	551.2±15.7	0.49±0.01	0.21±0.02	0.093±0.003	42.15±2.06	16.23±0.64
14	7.12±0.04	6.58±0.02	25.0±0.1	578.4±12.9	0.53±0.02	0.26±0.03	0.091±0.001	43.28±2.62	15.94±0.72	

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

<Table 4> Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in plant bed of DAS for 1-14 weeks¹

Culture method	Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (°C)	EC (μ S/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	8.83	7.83	23.4	117.5	0.3	0.11	0.059	2.19	0.72
	1	8.32±0.12	7.84±0.01	24.4±0.1	124.4±3.6	0.42±0.04	2.74±1.12	0.052±0.006	2.87±0.32	0.67±0.02
	2	8.34±0.03	7.89±0.03	24.3±0.1	129.6±2.1	0.47±0.03	2.92±0.08	0.062±0.008	2.11±0.14	0.64±0.01
	3	8.47±0.12	7.91±0.01	23.2±0.4	134.9±2.8	0.54±0.05	2.68±0.16	0.074±0.006	3.53±0.66	0.96±0.18
	4	8.64±0.08	7.75±0.12	21.1±1.2	152.8±9.6	0.52±0.03	1.57±0.84	0.112±0.021	5.25±1.12	2.32±0.54
	5	8.58±0.03	7.67±0.05	20.2±0.3	173.7±8.5	0.53±0.01	1.32±0.14	0.094±0.012	5.82±0.26	2.47±0.06
	6	8.74±0.16	7.24±0.23	19.5±0.3	197.8±6.9	0.56±0.03	0.84±0.24	0.078±0.009	6.57±0.28	2.54±0.04
	7	8.71±0.04	6.97±0.18	19.1±0.1	223.7±15.4	0.61±0.02	0.67±0.16	0.084±0.004	9.35±1.93	3.13±0.47
	8	8.73±0.01	6.64±0.26	19.2±0.1	277.5±25.3	0.65±0.02	0.42±0.14	0.072±0.008	16.21±3.85	5.82±1.62
	9	8.77±0.03	6.52±0.07	19.1±0.1	302.3±16.8	0.63±0.01	0.35±0.06	0.076±0.002	21.36±2.21	7.75±0.49
	10	8.76±0.01	6.31±0.13	19.1±0.1	341.2±27.4	0.59±0.03	0.28±0.07	0.078±0.001	28.27±3.39	9.51±1.24
	11	8.77±0.01	6.06±0.15	18.7±0.3	373.6±18.4	0.53±0.03	0.49±0.11	0.069±0.006	32.14±1.12	12.21±1.37
	12	8.76±0.01	6.08±0.02	18.9±0.1	421.6±33.2	0.56±0.02	0.62±0.14	0.067±0.003	35.43±1.62	13.48±0.53
	13	8.79±0.02	6.05±0.02	18.9±0.2	462.8±26.9	0.54±0.01	0.94±0.28	0.068±0.002	38.86±2.21	16.77±2.14
14	8.79±0.01	6.06±0.01	18.8±0.1	503.4±27.5	0.51±0.02	0.82±0.05	0.071±0.002	42.11±1.92	20.16±2.03	

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

²Results of DAS plant bed represent the water quality values supplemented with 50 g of commercially sold composite fertilizer (nitrogen 21 %, phosphorous 17 %, potassium 17 %) per day in addition to sludge generated from fish for 6 weeks to 14 weeks.

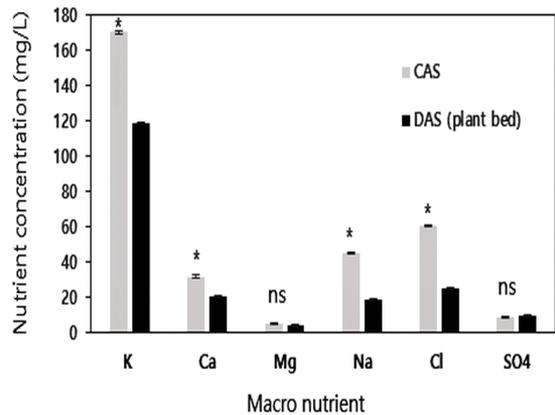
CAS 실험구에 비해 실험기간 동안 농도가 낮게 유지되었다.

식물 입식 전 5주까지의 DAS 실험구 식물재배지 내 NO₃-N (mg/L) 농도는 5.82±0.26 mg/L, 어류 사육지의 NO₃-N (mg/L) 농도는 10.42±3.53 mg/L, CAS 실험구의 NO₃-N (mg/L) 농도는 18.64±2.11 mg/L으로 조사되었다(<Table 2, 3, 4>). 실험 종료 14주의 DAS 실험구 식물재배지 내 NO₃-N (mg/L) 농도는 42.11±1.92 mg/L, 어류 사육지의 NO₃-N (mg/L) 농도는 43.28±2.62 mg/L, CAS 실험구의 NO₃-N (mg/L) 농도는 61.24±3.14 mg/L으로 조사되었다. DAS 실험구의 경우 엽채류 입식 초기(10주) 1주간 EC 농도는 341.2±27.4 μs/cm, CAS 실험구는 462.3±21.3 μs/cm 값을 보였고, 실험 종료 기간(14주)에는 DAS 503.4±27.5 μs/cm, CAS 702.5±15.8 μs/cm 값을 나타내었다(<Table 2, 4>).

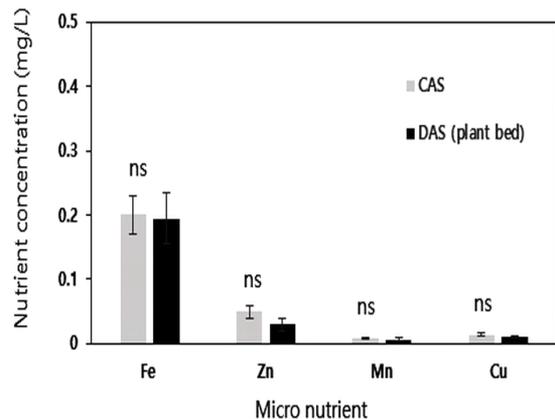
두 실험구 모두 실험 입식 10주 시점부터 EC, NO₃-N 및 PO₄-P 농도는 엽채류 성장에 문제가 없는 농도로 유지되었으며, 엽채류 근권부(root) 적정 수온의 범위(20~25℃)에서 CAS 실험구는 23℃ 내외, DAS 실험구는 19℃ 내외로 DAS 실험구의 엽채류 근권부 온도가 4℃ 정도 낮았고, 적정 수온 범위에서 1℃ 정도 낮게 유지되었다(<Table 2, 4>).

실험 종료 14주에 K를 포함한 6종류의 다량원소와 Fe를 포함한 4종류의 미량원소 분석 결과는 [Fig. 3, 4]와 같다.

K의 경우 CAS 및 DAS 실험구의 pH 유지를 위해 지속적으로 투입된 KOH의 영향으로 다른 영양소에 비해 높은 농도 값을 나타내었다. 또한 CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 K (CAS 170.1±1.2 mg/L, DAS 119.2±0.5 mg/L), Ca (CAS 32.2±0.8 mg/L, DAS 21.4±0.3 mg/L), Na (CAS 45.8±0.3 mg/L, DAS 19.6±0.2 mg/L) 및 Cl (CAS 61.4±0.4 mg/L, DAS 25.2±0.5 mg/L)의 값이 유의하게 높게 나타났다(P<0.05). 미량원소의 경우 4종류(Fe, Zn, Mn, Cu) 모두 2 실험구에서 유의한 차이를 나타내지 못했다(P>0.05).



[Fig. 3] Macro nutrient concentrations in two experimental groups (CAS and DAS) at the end of experiment. Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).



[Fig. 4] Micro nutrient concentrations in two experimental groups (CAS and DAS) at the end of experiment. Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).

CAS 및 DAS 시스템에서 생산된 엽채류 성장도 조사 결과는 <Table 5, 6>와 같다. 엽채류 입식 전 두 실험구의 초기 엽채류 개체별(품종별 12개체) 엽중량은 volare 2.1±0.4 g, skilton 3.3±0.2

g, ovired 1.8±0.3 g, caipira 2.3±0.1 g, ezabel 2.4±0.1 g로 조사되었고 (<Table 6>), 32일간 성장 후 실험구별 전체 엽중량은 CAS 실험구 73,210 g, DAS 실험구 73,370 g로 나타났다(<Table 5>).

5종류의 엽채류 12개체를 무작위 선택(상단 6개체, 하단 6개체)하여 성장도 조사 결과(<Table 6>), ovired lettuce 품종(DAS 41.6±5.9 g, CAS 56.9±4.8 g)을 제외(P<0.05)한 4품종(volare lettuce,

<Table 5> Total productivity of five cultivar of European lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in CAS and DAS for 10-14 weeks

Species	Number	Total leaf weight (kg)	
		CAS	DAS
Volare (<i>Lactuca sativa</i> L. 'volare')	180	19,230	21,050
Skilton (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Skilton')	180	15,120	15,250
Ovired (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Ovired')	180	10,340	7,470
Caipira (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Caipira')	180	14,410	15,380
Ezabel (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Ezabel')	180	14,110	14,220
Sum (No. 900)	900	73,210	73,370

CAS, coupled aquaponic system

DAS, decoupled aquaponic system

<Table 6> Growth for five cultivar of European lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivated in CAS and DAS for 10-14 weeks

Species(No. 12)	Growth factor	Initial seeding	Culture method		p-value
			CAS	DAS	
Volare (<i>Lactuca sativa</i> L. 'volare')	Leaf No.	6.4±0.3	31.2±2.3 ^{ns}	33.1±2.8	0.077
	Leaf weight (g)	2.1±0.4	109.9±11.0 ^{ns}	119.4±16.6	0.113
	Root weight (g)	-	6.5±1.3*	9.7±1.5	<0.001
	Leaf length (cm)	5.6±0.7	14.5±0.7 ^{ns}	14.9±1.9	0.524
Skilton (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Skilton')	Leaf No.	-	-	-	-
	Leaf weight (g)	3.3±0.2	84.2±20.8 ^{ns}	82.1±12.6	0.770
	Root weight (g)	-	7.0±1.9*	8.5±1.4	0.034
	Leaf length (cm)	5.8±0.8	19.7±1.4 ^{ns}	18.8±1.0	0.067
Ovired (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Ovired')	Leaf No.	5.2±0.2	25.2±2.0*	22.7±1.7	0.003
	Leaf weight (g)	1.8±0.3	56.9±4.8*	41.6±5.9	<0.001
	Root weight (g)	-	6.1±0.9*	5.2±1.1	0.023
	Leaf length (cm)	4.9±0.3	17.2±0.6 ^{ns}	17.1±0.7	0.710
Caipira (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Caipira')	Leaf No.	7.6±0.2	24.1±2.7 ^{ns}	23.1±2.6	0.367
	Leaf weight (g)	2.3±0.1	79.3±18.8 ^{ns}	85.8±20.3	0.419
	Root weight (g)	-	4.6±1.5*	6.7±1.6	0.003
	Leaf length (cm)	5.6±0.3	17.3±1.1 ^{ns}	18.0±1.4	0.270
Ezabel (<i>Lactuca sativa</i> L. 'Ezabel')	Leaf No.	-	-	-	-
	Leaf weight (g)	2.4±0.1	80.0±10.5 ^{ns}	79.8±8.2	0.958
	Root weight (g)	-	8.3±2.2 ^{ns}	8.7±1.4	0.623
	Leaf length (cm)	4.9±0.23	15.0±1.0 ^{ns}	14.7±0.8	0.559

CAS, coupled aquaponic system

DAS, decoupled aquaponic system

skilton lettuce, caipira lettuce, ezabel lettuce)의 가식부 엽중량의 경우 DAS 실험구와 CAS 실험구간 유의한 차이는 나타나지 않았다($P>0.05$). 영양염의 흡수와 직결되는 기관인 뿌리의 경우 DAS 실험구는 volare lettuce, skilton lettuce, caipira lettuce 품종이 CAS 실험구에 비해유의하게 높았고 ($P<0.05$), ovired lettuce는 낮았으며($P<0.05$), ezabel lettuce는 유의한 차이가 없었다($P>0.05$).

실험구(CAS구, DAS구)별 14주간 사육된 나일틸라피아의 증체율(weight gain) 및 생존율(Survival rate) 결과는 <Table 7>와 같다. DAS 실험구의 경우 CAS 실험구 보다 사료 공급량을 일일 20 % 초과 공급한 결과, 증체율에서 높은 결과를 나타내었다(CAS 176.9%, DAS 225.6%). 생존율은 두 실험구 모두 일부 폐사 개체가 출현하였으나 유사한 값(CAS 99.8%, DAS 99.5%)을 보였다.

<Table 7> Weight gain (%) and survival rate (%) of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in two experimental groups (CAS and DAS) for 14 weeks

Item	Culture method	
	CAS	DAS
Initial fish No.	2,594	2,607
Final fish No.	2,588	2,593
Initial mean weight of fish (g)	24.3	24.1
Final mean weight of fish (g)	67.5	78.6
Initial total weight of total fish (g)	63,034	62,829
Final total weight of total fish (g)	174,555	204,546
Feed intake(g, DM)	162,490	197,560
Weight gain (%) ¹	176.9	225.6
Survival rate (%) ²	99.8	99.5

¹Weight gain (%) = [final weight (g)-initial weight (g)] × 100/initial weight (g).

²Survival rate (%) = final fish number / initial fish number × 100.

CAS, coupled aquaponic system; DAS, decoupled aquaponic system

IV. 결론

Lee(2022b)는 현재 국내 아쿠아포닉스 산업은 농업 중심으로 수산물에 의한 생산성이 매우 적고, 대다수 엽채류 생산에 의존하고 있으며, 이러한 이유는 어류와 엽채류의 생산환경이 달라 어종이 국내 온수성 어종인 잉어류, 메기 등에 한정되고 뱀장어, 연어, 송어 등 고부가가치 어종 도입이 제한되기 때문이라 하였다.

DAS의 경우 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 (Kloas et al. 2015).

현재 나일틸라피아를 이용한 연구에서 DAS 실험구의 어류 증체율이 CAS 실험구에 비해 높은 것은 어종과 엽채류 간 개별 환경 관리가 가능하여 어류 수온을 CAS에 비해 높게 유지하였기 때문이다. CAS 실험구의 경우 틸라피아 생육 적정 수온인 25~32℃ (Xie et al., 2011)에 유지할 경우 엽채류의 성장이 낮아질 수 있어 22~23℃에서 유지되었다. 이러한 이유로 CAS 실험구의 어류는 적정 수온이 낮아 DAS 실험구의 어류에 비해 증체율이 떨어졌을 것으로 고려된다.

본 실험의 질산화과정의 수질변화는 Lee(2022b)가 보고한 비단잉어를 이용한 CAS 및 DAS 시스템에서 수질변화 경향과 유사하였다. Lee(2022b)는 비단잉어를 이용한 연구에서 탄산가스 미사용이 빠른 질산화과정을 유도하지 못하는 경향이 있다고 보고하였는데, 초기 빠른 질산화 과정 유도를 위해 탄산가스를 사용한 다른 연구에서는 3~4주 내 아질산염 농도가 안정화되었다(Lee et al., 2019a; Lee et al., 2019b; Lee et al., 2020; Lee and Kim, 2021; Lee 2021; Lee 2022a). 이러한 이유는 질산화세균의 경우 중속영양세균과 달리 성

장과 번식을 위해 무기탄소를 사용하며 수중 내 알칼리도 제한 보다는 무기탄소 함량이 낮은 시 번식에 부정적 영향을 미치지 때문이다(Guisasola et al., 2007). 또한 TAN의 경우 DAS 어류수조의 실험구가 CAS 실험구에 비해 실험기간 동안(3-14 주) 농도가 낮게 유지되었는데, 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 추측할 수 있다.

DAS 실험구의 식물재배지 내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 어류 수조에서 발생된 슬러지를 정화조로 수집 후 정화조 내에서 무기물화 및 질산화과정을 거쳐 식물에게 공급되나, 어류 사육수조 내에서 발생하는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 허실로 CAS에 비해 낮게 나타난 것으로 사료된다(<Table 3, 5>). 이러한 문제점을 보완하기 위해 DAS 시스템의 경우 부족 영양염에 대해 일부 보충하게 되는데(Goddek et al., 2016), 본 실험에서도 시중에서 흔히 구할 수 있는 농업용 복합비료를 실험 6주부터 DAS 시스템 내 정화조로 투입하여 부족한 영양염을 보충하게 되었다(<Table 5>). 이와 관련하여 EC는 pH와 함께 아쿠아포닉스 현장에서 수질 특성을 파악할 수 있는 중요한 요소로 물에 용해된 이온의 양이라 말할 수 있으며 식물 영양분 요구량 파악 중요한 측정 지표이다(Hager et al., 2021). 아쿠아포닉스에서 추천되는 EC 농도는 300-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 보고되어 있으며(Rakocy et al., 2006), 현재 실험에서 보여지는 DAS 실험구의 식물재배지내 EC는 엽채류 성장에 문제가 없는 것으로 사료되어 진다.

Suzuki and Sakamoto(2015)는 적상추 (red leaf lettuce)로 수경재배 시 20-25°C 수온 범위에서는 성장 차이가 없음을 보고하였다. 현재 DAS 실험구의 식물재배지 수온이 상추류 적정 수온에 비해 1°C 정도 낮은 19°C 내외로 유지되었고, CAS 실험구는 23°C 내외로 유지되었으나 식물 생산성

은 유사하게 파악되었다. 아쿠아포닉스 연구 분야에서 식물 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). 본 연구에서 DAS 실험구의 상추류가 수경재배에서 요구되는 적정수온 보다 다소 낮으나 성장성에 문제가 없었던 이유는 DAS 시스템 내 식물재배에서 공급되는 원수에 지속적인 유용미생물을 사용했기 때문으로 고려된다.

따라서 현재 개별 환경 적용이 가능한 DAS 시스템 국내 도입을 위한 본 연구는 국내 수산 중심의 아쿠아포닉스 산업화를 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.
- FAO(2022). Food and Agriculture Organization. FishStatJ: universal software for fishery statistical time series: aquaculture production 1950 - 2020. *FAO*, Rome.

- Fracalossi DM and Turchini GM(2022). Tilapia. Reviews in Aquaculture virtual issue, 1. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/on> June 15, 2023.
doi/toc/10.1111/(ISSN)1753-5131.Tilapia
- Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmutz 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 Lafuente J(2007). Inorganic carbon limitations on nitrification: experimental assessment and modeling. *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.
- Kloas W, Grob R, Baganz D, Graupner J, Monsees H, Schmidt U, Staaks G, Suhl J, Tschirner M, Wittstock B, Wuertz S, Zikova A and Rennert B(2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquacult Environ Interact* 7(2), 179~192.
<https://doi.org/10.3354/aei00146>.
- KOSIS(2023). Korean Statistical Information Service. Statistics by type of fishery, breed and fishing method for 2006-2022 period. KOSIS. Daejeon, South Korea.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim JM, Shin SJ and Kim JD(2019a). Effect of dietary monobasic potassium phosphate levels on water quality and the growth of far eastern catfish *Silurus asotus* and four leafy vegetables in a hybrid biofloc technology aquaponic system. *Korean J Fish Aquat Sci* 52, 159~172.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0159>.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim KB, Kim JM and Kim JD(2019b). Comparative study on growth and yield of far eastern catfish *Silurus asotus* and leafy vegetables grown in hybrid BFT-aquaponics, semi-RAS and hydroponics. *Korean J Fish Aquat Sci* 52, 482~495.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0482>.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim KB, Kim JM, Hariati AM and Kim JD(2020). Effects of crude protein levels in diets containing MKP on water quality and the growth of Japanese eels *Anguilla japonica* and leafy vegetables in a hybrid BFT-aquaponic system. *Korean J Fish Aquat Sci* 53, 606~619.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0606>.
- Lee DH and Kim JD(2021). Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using Japanese eel, *Anguilla japonica* and hydroponics. *Fish Aquat Sci* 24(7), 260~275.
<https://doi.org/10.47853/FAS.2021.e26>.
- Lee DH(2021). Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using yellow koi fish, *Cyprinus carpio* and hydroponics. *JFMSE* 33(5), 1027~1037.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.10.33.5.1027>.
- Lee DH(2022a). 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>.
- Lee DH(2022b). Comparative study on growth of leafy vegetables and fancy carp (*Cyprinus carpio* var. .koi), grown in coupled aquaponics (CAS) and decoupled aquaponics (DAS). *JFMSE* 34(5), 750~764.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.10.34.5.750>.
- Meuwis AL and Heuts MJ(1957). Temperature dependence of breathing rate in carp. *Biological Bulletin*, 112(1) 97~107.
<https://doi.org/10.2307/1538882>.

- Rakocy JE, Masser MP and Losordo TM(2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC publication 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 growth 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>.
- Xie S, Zheng K, Chen J, Zhang Z, Zhu X and Yang Y(2011). Effect of water temperature on energy budget of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Aquaculture Nutrition 17, e683~e690. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00827.x>.
- 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 nitrification addition and filler gradation. Environ Sci Pollut Res 23, 6671~6679. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5898-0>.
-
- Received : 21 August, 2023
 - Revised : 10 September, 2023
 - Accepted : 13 October, 2023