

Research Article



CrossMark

Open Access

메기(*Silurus asotus*) 양어 순환식 아쿠아포닉스와 수경재배 엽채류의 생육 및 수질의 비교

김민정¹, 심창기^{1*}, 박원성¹, 이재형¹, 허정욱^{2*}

¹국립농업과학원 유기농업과, ²국립농업과학원 스마트팜개발과

Comparison of Water Quality and Growth on Leafy Vegetables in Far Eastern Catfish (*Silurus asotus*) Aquaponics and Hydroponic Culture

Min-Jeong Kim¹, Chang-Ki Shim^{1*}, One-Seong Park¹, Jae-Hyeong Lee¹ and Jeong-Wook Heo^{2*} (¹Organic Agricultural Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Smart Farm Development Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 05 December 2023/ Revised: 10 December 2023/ Accepted: 20 December 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<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.

ORCID

Min-Jeong Kim
<https://orcid.org/0000-0001-8397-7746>

Chang-Ki Shim
<https://orcid.org/0000-0002-4905-1947>

One-Seong Park
<https://orcid.org/0000-0001-8069-6869>

Jae-Hyeong Lee
<https://orcid.org/0000-0003-0184-5403>

Jeong-Wook Heo
<https://orcid.org/0000-0002-9968-7783>

Abstract

This study aimed to investigate the effects of an aquaponics system utilizing catfish recirculating water on the growth and water quality in lettuce and chicory cultivation. After 60 d of catfish cultivation in the BFT-AP, the survival rate was 96.0% and average weight gain was 178.5 g. The WGR grew by 241.4% and the SGR was 3.0%. A comparison between lettuce and chicory cultivation using BFT-AP and hydroponics revealed significant increases in shoot height, leaf count per week, and biomass of the cultivated lettuce and chicory. The SPAD val-

ues also increased significantly by 15.4-43.3%. Water quality analysis of the BFT-AP systems and crop cultivation beds showed significant differences, except for K and Na. The average NO_3^- concentration in the sediment pond was significantly higher at 45.3 ± 1.0 . Comparison of water temperature, pH, EC, DO, and ORP in the BFT-AP system and crop cultivation beds revealed similar monthly water temperatures from July to September. The pH in the catfish culture pond was 0.3-1.2 lower than that in the crop cultivation beds, and the EC was approximately 0.01-0.03 dS/m lower in the catfish culture pond than the crop cultivation beds. The monthly average ORP in the catfish culture bed steadily increased to 479.9 mV in October. *Bacillus velezensis* (AFB2-2) and *Chlorella fusca* (CF) were applied to the biological activation bed; the population density of CF showed a continuous increase, whereas that of AFB2-2 decreased after 15 d and gradu-

* Corresponding author: Chang-Ki Shim
Phone: +82-63-238-2554; Fax: +82-63-238-3824/2554;
E-mail: ckshim@korea.kr

** Co-corresponding author: Jeong-Wook Heo
Phone: +82-63-238-4063; Fax: +82-63-238-4035;
E-mail: heowcho@korea.kr

ally increased thereafter. Thus, the application of the re-circulating aquaponics cultivation technology with catfish (BFT) enhances catfish cultivation and promotes the growth of lettuce and chicory. Therefore, it is considered suitable for the environment-friendly cultivation of lettuce and chicory.

Key words: Aquaponics, Eastern catfish, Vegetable growth, Water quality

서론

범지구적인 기상의 변화의 영향으로 우리나라도 2025년 이후, 물 부족 국가가 될 것으로 UN이 발행한 '세계수자원평가 보고서'에 따르면, 국민 1인당 이용 가능한 수자원의 양이 세계 146위로 근본적으로 물이 심각하게 부족한 것으로 오래 전부터 전망되고 있다[1]. 2022년 8월, 임실·순창·남원·장수 등 전라북도의 4개 시군은 가뭄 주의 단계가 발령되어 이상기후로 인한 지역적인 물 부족 문제가 심화되고 있다[2]. 또한 우리나라의 농업환경은 가뭄 발생 빈도의 증가와 현재의 농업용수 관리체계하에서 농업용수를 안정적으로 확보하는 것이 어려운 시기가 다가올 것으로 예상되고 있다[3].

급격한 기후 변화와 환경문제로 인해 농업생산 기반에 어려움이 자주 발생하고 있다. 이에 생태계 오염을 최소화하고, 미래에 지속가능한 농업을 추구하는 친환경적 농업기술의 중요성과 관심이 증가하고 있다[3]. 물 자원을 보다 효율적으로 활용할 수 있는 대안으로 수경재배와 같은 재배 기술을 개발하고 있으며, 스마트팜을 기반으로 하는 수경재배 시스템과 아쿠아포닉스(Aquaponics) 시스템 등 다양한 기술들이 제안되고 있다[4-7].

수경재배로 작물을 생산할 때 사용된 양액배지는 종종 식물체 내 질산염의 형태로 과도하게 축적되거나 흡수되지 않고 폐배양액에 남아 있는 성분들로 인해 토양과 수질 오염과 같은 문제를 유발할 수 있다. 이에 대한 대안으로 아쿠아포닉스 기술이 개발되어 수경 재배를 보다 친환경적으로 실현하고자 노력하고 있다[8-10]. 폐쇄 수경 재배 시스템은 개방 수경 시스템에 비해 물 생산성이 최대 96%, 영양소 생산성이 최대 97%까지 증가할 수 있다. 또한 폐쇄 수경 시스템을 사용함으로써 물의 입방미터당 수확량을 증가시키는 동시에 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다[11].

Hybrid BFT (Biofloc technology)을 적용한 아쿠아포닉스 생산 기술은 기존 내수면 어류양식에 사용되는 반순환 여과식(semi-recirculating system)을 변형한 것으로 메기와 엽채류를 생산하며, 동시에 기존의 수경재배(hydroponics) 방법으로 엽채류를 생산하는 과정을 포함한다. 이러한 연구를 통해 상추 등의 엽채류는 초기 유품 입식 후 23-24일 정도 경과하여 포기 수확이 가능할 정도로 성장하였다[7,12]. 국내에서 아쿠아포닉스를 활용한 물고기 양어와 작물재배에 관한 연구

가 이루어졌다. 이 중에서는 황 쏘가리(*Siniperca scherzeri*)와 엽채류[13], 황금 비단잉어(*Cyprinus carpio*)와 엽채류[14], 뱀장어(*Anguilla japonica*)와 엽채류[15], 철갑상어(*Acipenser baeri*)와 엽채류[16] 등 다양한 어류와 상추를 중심으로 한 연구들이 수행되었다.

따라서, 본 연구는 바이오플렉(BFT)을 적용한 순환식 아쿠아포닉스의 친환경 농업으로의 적용을 위해 메기 양어를 통해 생성된 양어수를 활용하여 상추와 치커리의 재배에 따른 작물의 생육과 수질의 변화에 미치는 영향을 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

실험어 및 사육환경

메기 양어 실험은 소형 BFT-AP 실험구에서 실시하였다. 0.6톤 크기의 플라스틱 원형수조(Ø 0.93 m × H 1.23 m)에 메기 50마리(체중 74.0±4.8 g) 약 3.7 kg (단위 면적 5 kg/m²)을 수용하여 1 반복 수행하였다. BFT 시스템을 유지하기 위해 수조 측면과 바닥에 에어스톤을 설치하고 공기를 주입하여 사육수 내 바이오플렉 및 유기물의 침전을 방지하였고, 용존산소(dissolved oxygen, DO)는 7.0±1.0 mg/L, pH는 6.6±0.5, 수온은 23.0±1.0°C에서 유지 관리하였다. 메기 급여 사료는 (주)사조동아원에서 판매하는 메기스프링 2호와 3호(조단백 44%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 1.8%, 조섬유 5%, 조회분 17%)를 시중에서 구입하여 사용하였으며 처음 30일간은 2호(Ø 3.3 mm)를 급여하고 이후로는 3호(Ø 4.2 mm)를 매일 메기 체중의 3%로 오전 9시에 1회 급여하였다. 실험 60일 후, 메기의 성장을 분석하기 위해 실험어 전체를 포획하고 체중을 0.01 g까지 전자저울(MW-500, CAS, Korea)을 사용하여 측정하였다. 실험 시작 체중(initial weight), 실험 종료 체중(final weight)과 사료공급량을 확인하여 증체율(weight gain rate, WGR), 일간성장률(specific growth rate, SGR)을 산출하였으며 최종 생존율(survival rate)을 조사하였다.

간이 바이오플렉(BFT)-아쿠아포닉스(AP) 시스템의 구성

본 실험에서 사용한 간이 바이오플렉(BFT)-아쿠아포닉스(AP) 시스템은 Fig. 1과 같다. BFT-AP를 이용한 메기 사육을 위해 0.6톤 크기의 플라스틱 원형수조(Ø 0.93 m × H 1.23 m)에 산소발생기(SHD-150, 150 L/min, Shinhwa Hotech Co., Ltd.)와 온도조절기(DH-UT180, 2KW, Dowha Co., Ltd.)를 설치하였다. 메기 양어조로부터 과도한 유기물이 작물 재배 베드로 직접 흐르지 않도록 하기 위해 물리적 침전조(120 L, Ø 0.51 m × H 0.82 m)를 사용하였다. 메기 배설물의 분해와 무독화(Nitrification)를 위해 침전조와 동일한 크기의 생물활성조(Biofloc pond)를 설치하였으며, 호기성 미생물의 활성을 촉진하고자 산소발생기(SHD-80, 80L/min, Shinhwa Hotech Co., Ltd.)와 2종의 바이오볼(Ø 16mm white ball, Ø 26mm black ball)을 설치하였다. 또한, BFT-AP시스템의 생물활성을 증진시키고자 본 연구실에서 개발한 항균 세균인 *Bacillus velezensis* AFB2-2 [17]와 식물 생육 촉진 효과가

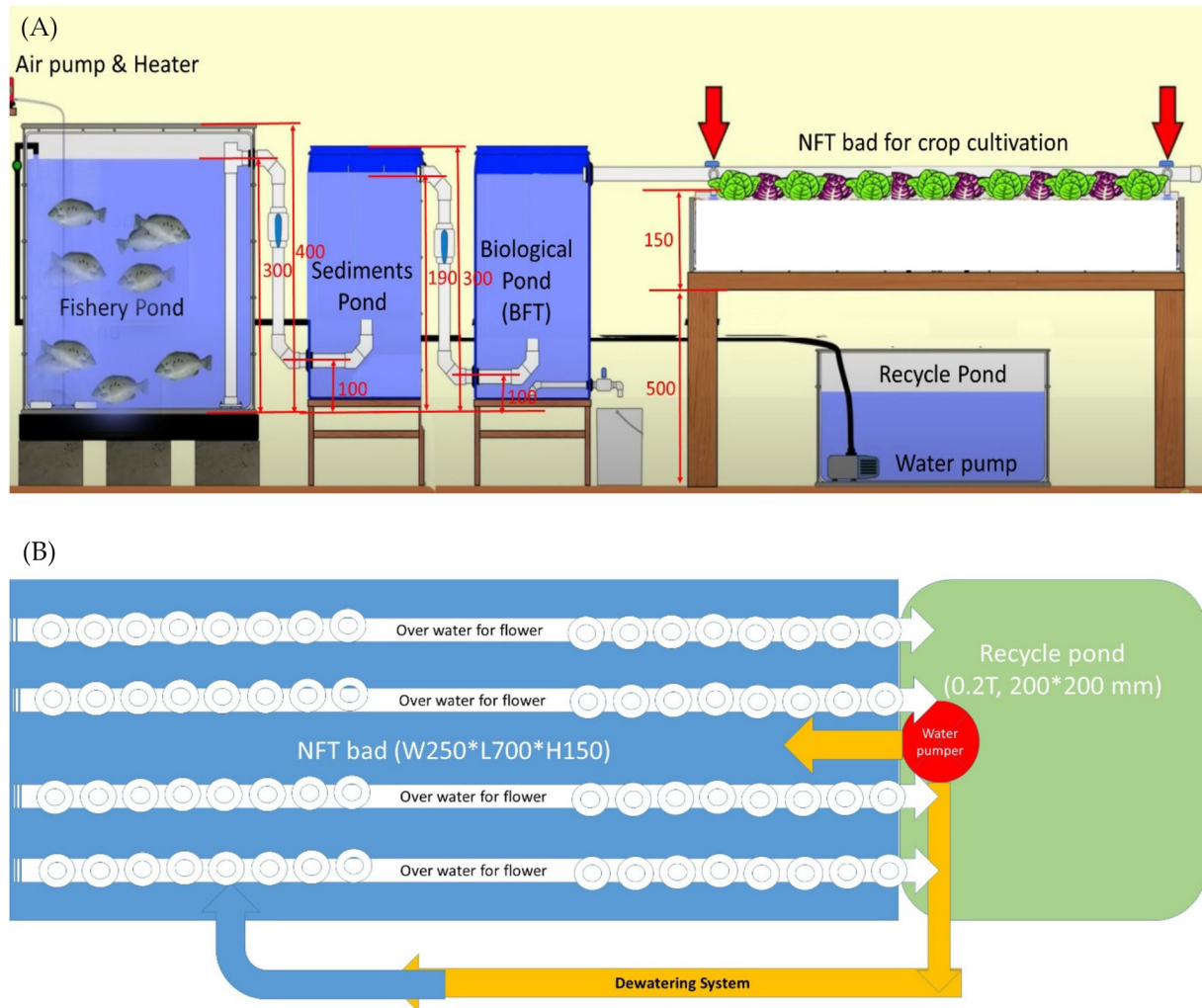


Fig. 1. Schematic images of lab-scale biofloc aquaponics (BFT-AP) system consisted fishery pond, sediments pond, BFT pond (A) and NFT bad (B) used in this study.

있는 미세조류인 *Chlorella fusca* [18]를 액체 배양하여 각각 평균 $0.8 \pm 0.3 \times 10^3$ cfu/ml, 평균 $19.2 \pm 2.1 \times 10^3$ cfu/ml 농도로 접종하였다.

상추와 치커리 엽채류 재배를 위한 식물재배 베드는 NFT (nutrient film technology, L 7.0 m \times W 0.6 m \times H 0.3 m)로 사용하였다(Fig. 1). 이 식물재배 NFT베드는 동일 간격으로 총 70포기의 식물을 재배할 수 있다. 수경재배 실험구는 BFT-AP 실험구와 동일한 크기의 순환수조와 NFT식물재배 베드를 사용하였지만, 메기 사육이 필요하지 않기 때문에 수조는 식물에게 양액을 공급하기 위해 자동 공급시스템으로 연결하여 사용하였다. 상추와 치커리 재배를 위한 양액의 농도는 질소를 기준으로 조절하였다. 100 mg/L 농도로 처리를 하고 자 양액의 다량원소 농도(mM)는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.42, K^+ 0.50, Ca^{2+} 0.24, Mg^{2+} 0.20, $\text{NO}_3\text{-N}$ 1.32, H_2PO_4^- 0.05로 수돗물에 희석하여 양액 자동공급시스템에 공급하여 사용하였다.

재배기간 중의 유리온실 내 환경은 평균 주간온도 30°C, 야간온도 20°C, 상대습도 70-85%로 오전 12시부터 오후 3시까지는 온도 상승을 막기 위해 알루미늄 차광망으로 차광하였

고 야간에는 측창을 열어 상대습도가 50-65%까지 내려가도록 관리하였다.

상추와 치커리 재배

수경재배 시스템과 BFT-AP 시스템에 따른 상추와 치커리의 생육을 비교하기 위해 친환경 공정 육묘장에서 균일하게 재배한 2종의 상추(적측면상추, 청치마)와 2종의 치커리(엔다이브, 치커리) 묘종을 구매하여 BFT-AP 실험구와 HP 실험구의 식물재배 베드에 식재하여 실험하였다. BFT-AP 실험구는 메기를 사육한 BFT 순환수를 식물재배 베드로 유입된 후 침전조로 모아져 다시 메기 사육수조로 돌아오는 순환하도록 운영하였다(Fig. 1). 수경재배 실험구는 메기 양어수 대신 양액이 식물재배 베드를 거쳐 순환하는 시스템으로 구성하였다. BFT-AP 실험구와 수경재배 실험구는 2종의 상추와 2종의 치커리를 균일하게 재식하였고 각 작물별 생육은 60일간 재배 후에 식물의 총엽장(total leaf length), 주당엽수(leaf number per plant), 생체중(fresh weight), 엽록소함량은 SPAD 값(CM-1000, Spectrum Tech. Inc.)을 측정하고 분석하였다.

수질환경 분석

메기 양어 60일 후, BFT-AP 시스템을 구성하는 양어조 (Fishery pond), 침저조(Sediment pond), 생물활성조(Bio-floc pond), 작물재배 베드로 나누어 500 ml씩 채수하여 다양한 수질측정 항목을 분석하였다. 이 중 측정된 항목은 pH, 전기전도도(Electrical Conductivity, EC), 용존산소(DO), 수온, 산화환원전위(Oxidation Reduction Potential, ORP), Ca, K, Na, NO₃-N을 측정하였다. BFT-AP 실험구와 순환수 내 미량원소(mg/L) 분석 중 Ca, K, Na은 유도결합플라즈마 분광광도계(Integra XL Dual, GBC Scientific Equipment, Mexico)를 사용하여 분석하였다. 이를 통해 실험 구간 별로 수질의 변화를 정확하게 파악하고 실험 결과를 평가할 수 있었다.

생물활성조의 미생물 분석

BFT-AP 시스템에서 메기를 양어하는 60일 동안, 생물활성조(biofloc pond, BFT)의 미생물 활성 정도를 조사하기 위해 실험 시작일부터 15일 간격으로 BFT의 순환수를 100 ml씩 채수하였다. 이를 3반복으로 멸균증류수에 순차적으로 희석하고, 클로렐라 전용배지(Modified micro algae cultural medium)[18]와 세균 배양용 TSA (Tryptic Soy Agar)배지[17]에 희석평판법으로 도말한 후, 25°C 항온기에서 4일간 배양한 후 균총(Colony forming unit)의 수를 조사하여 순환수 내 미세조류와 세균의 밀도 변화를 조사하였다.

통계분석

본 실험은 실험구 당 1반복 실험만 수행하였다. 따라서, 메기 생육과 식물 생육은 실험구 내에서 개체별 측정결과 값을 3개의 구역으로 나누어 평균과 표준편차를 제시하였다. 그러나, 실험 결과로부터 얻어진 자료의 유의성 검증은 조사한 결과를 Microsoft Excel 2016으로 정리한 후 처리 평균 간의 효과를 비교하고자 SAS 통계패키지의 BFT-AP 실험구와 수경재배 간의 작물생육을 비교 분석하였다. 이를 위해 두 집단 간의 평균을 비교할 수 있는 t-test를 사용하였으며, 유의수준은 $p < 0.001$ 로 설정하여 통계 처리하였다.

결 과

메기 성장 분석

BFT-AP 실험구에서 양식한 메기의 성장을 조사한 결과는 Table 1과 같다. 생존율은 96.0%이었으며, 60일 후에 공시한

메기의 평균 어체중은 252.5 ± 7.5 g로, 처음 평균 어체중이 74.0 ± 4.8 g이었던 것에 비해 약 178.5 g 증가하였다. BFT-AP 시스템에서 60일 동안 양식한 결과, 메기의 WGR은 평균 어체중 3,698 g에서 12,626 g으로 241.4% 증가하였고 SGR은 3.0%으로 BFT-AP에 의한 메기의 높은 생산성을 확인할 수 있었다(Table 1).

수경재배 양식이 상추와 치커리 생육에 미치는 영향

상추 2종(청상추, 적상추)과 치커리 2종(엔다이브, 치커리)을 메기 양어수를 이용한 BFT-AP와 관행 양액배지(미야자키)를 이용하는 수경 재배 30일 후, 각 작물의 생육(초장, 주당 잎수, 생체중)에 미치는 영향을 조사하였다.

메기 양어수를 이용한 BFT-AP에서 재배한 상추 2품종과 치커리 2품종 모두 관행 양액 배지를 이용하는 수경재배보다 초장은 11.0-49.2% 유의적으로 촉진되었으며, 주당 잎수도 30.3-45.5% 유의적으로 증가하였고 생체중도 30.3-68.6% 유의적으로 증가하였다(Table 2).

재배 양식의 변화에 따른 초장에 미치는 영향은 BFT-AP에서 재배한 상추와 치커리의 초장은 공시한 2종의 상추 중에서 청상추보다 적상추가 16.4 ± 2.4 mm로 관행의 양액 수경재배보다 25.2% 길이가 더 증가한 것으로 나타났으며, 치커리는 일반 치커리보다 엔다이브가 17.6 ± 1.2 mm로 관행의 양액 수경재배보다 49.2% 길이가 더 증가하였다(Table 2). 주당 엽수에 미치는 영향은 BFT-AP에서 재배한 적상추가 20.2 ± 1.6 개/plant이었고, 일반 치커리가 62.0 ± 6.2 개/plant로 관행의 양액 수경재배보다 각각 37.5%와 45.5% 더 증가하였다(Table 2). 생체중에 미치는 영향은 BFT-AP에서 재배한 청상추가 28.5 ± 4.5 g/plant이었고 엔다이브가 28.4 ± 4.7 g/plant으로 관행의 양액 수경재배보다 각각 68.6%와 60.3% 더 증가하였다(Table 2).

수경재배 양식이 상추와 치커리의 엽록소 함량에 미치는 영향

BFT-AP와 관행 수경으로 재배한 청상추, 적상추와 엔다이브, 치커리의 엽록소 함량(SPAD value)에 미치는 영향을 SPAD 값으로 조사하였더니, 일반 치커리를 제외하고 메기 양어수를 이용한 BFT-AP에서 재배한 것이 관행 양액배지를 이용하여 수경한 것보다 SPAD value이 15.4-43.3% 유의적으로 증가하였다(Table 3). 엽록소 함량에 미치는 영향은 BFT-AP에서 재배한 적상추가 36.5 ± 9.1 이었고 엔다이브가 50.5 ± 15.0 로 관행의 양액 수경재배 청상추와 일반치커리보다 각각 39.3%와

Table 1. The growth performance of *Silurus asotus* in BFT-aquaponics (AP) groups at 60 days after

	Survival rate (%)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Initial total weight (g)	Final total weight (g)	WGR (%)	SGR (%)
BFT-AP	96.0	74.0±4.8	252.5±7.5	3,698	12,626	241.4	3.0

BFT-AP, Aquaponics based on biofloc technology; WGR (weight gain rate), (final total weight-initial total weight)/initial total weight $\times 100\%$; SGR (specific growth), (final weight-initial weight)/days $\times 100\%$

Table 2. Evaluation of growth characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.), endive (*Cichorium endivia*) and chicory (*Cichorium intybus*) cultivated for 30 days in catfish aquaponics and hydroponic culture

Crop	Culture types	Growth characteristics		
		Height (mm)	Lafe number (number/plant)	Fresh weight (g/plant)
Green lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Aquaponics	28.2±5.0 a	16.5±2.4 a	28.5±4.5 a
	Conventional	24.4±2.6 b	12.0±1.3 b	16.9±1.3 b
	F-value (<i>p</i>)	47.45	68.76	155.95
Red lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Aquaponics	16.4±2.4 a	20.2±1.6 a	20.1±3.2 a
	Conventional	13.1±1.3 b	15.5±3.0 b	15.4±0.9 b
	F-value (<i>p</i>)	37.83	48.05	51.47
Endive (<i>Cichorium endivia</i>)	Aquaponics	17.6±1.2 a	22.2±1.8 a	24.2±1.9 a
	Conventional	11.8±2.7 b	16.0±1.1 b	15.1±0.6 b
	F-value (<i>p</i>)	98.83	209.70	513.00
Chicory (<i>Cichorium intybus</i>)	Aquaponics	16.2±1.2 a	62.0±6.2 a	28.4±4.7 a
	Conventional	12.0±0.9 b	42.6±8.7 b	21.8±1.7 b
	F-value (<i>p</i>)	197.80	82.42	44.11

Data represent the mean±SE of four replicates. Different lowercase letters indicate significant difference according to LSD test at $p=0.001$.

Table 3. Estimation of SPAD value of lettuce (*Lactuca sativa* L.), endive (*Cichorium endivia*) and chicory (*Cichorium intybus*) in aquaponics and hydroponic culture

Culture type	SPAD value			
	Green lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Red lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Endive (<i>Cichorium endivia</i>)	Chicory (<i>Cichorium intybus</i>)
Aquaponics	24.5±4.3 a	36.5±9.1 a	50.5±15.0 a	31.9±7.1 a
Hydroponics	20.7±3.7 b	21.2±5.0 b	30.5±8.2 b	28.6±6.9 a
F-value (<i>p</i>)	12.58	50.07	68.54	2.20
Pr > F	0.0014	0.0001	0.0001	0.1488

Data represent the mean±SE of four replicates. Different lowercase letters indicate significant difference according to LSD test at $p=0.01$.

43.3% 더 증가하였다(Table 3).

수경재배 양식이 상추와 치커리 생육에 미치는 영향

상추와 치커리의 생육이 우수하게 나타난 메기 양어수를 이용한 BFT-AP 시스템에서 상추와 치커리 재배 30일 동안 재배한 후, 엽채소 수확 시점에서 BFT-AP을 구성하는 양어조, 침전조, 생물반응조(Biofloc) 및 작물재배 베드의 수질을 나타내는 pH와 EC 및 Ca^{2+} , K^+ , Na, NO_3 의 함량을 조사하였더니, 각 시스템 구성마다 K과 Na함량을 제외하고 BFT-AP를 구성하는 양어조, 침전조, 생물반응조 및 작물재배 베드마다 순환수의 수질에서 차이가 있었다(Table 4).

본 실험에서 조성한 BFT-AP 시스템의 pH의 범위는 4.5-4.8이었고 평균 4.7 ± 0.1 로 생물반응조와 상추와 치커리 재배 베드의 pH가 각각 평균 4.8 ± 0.1 와 4.7 ± 0.1 로 다른 것에 비해 유의적으로 높은 값을 보였다(Table 4). EC의 범위는 0.182-0.187 dS/m이었고 평균 0.184 ± 0.02 으로 침전조의 EC가 평

균 0.187 ± 0.07 dS/m으로 유의적으로 가장 높은 값을 보였다(Table 4). 순환수의 Ca함량의 범위는 71.8-78.0 ppm이었고 상추와 치커리 재배 베드의 Ca함량이 평균 73.6 ± 2.1 으로 유의적으로 가장 높은 값을 보였다(Table 4). 순환수의 K 함량은 BFT-AP 시스템 구성마다 차이를 보이지 않았으며 평균 10.0 ± 0 ppm이었다(Table 4). 순환수의 Na함량은 평균 53.0-57.0 ppm으로 나타났으나 BFT-AP시스템을 구성하는 수조마다 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 4). 작물의 양분 공급에 중요한 지표인 NO_3 함량의 범위는 40.0-46.0 ppm이었고 평균 42.4 ± 1.9 으로, 침전조의 NO_3 함량이 평균 45.3 ± 1.0 으로 다른 구성요소에 비해 유의적으로 높은 값을 보였다(Table 4).

순환식 아쿠아포닉스 시스템의 메기 양어조와 작물재배 베드의 온도 및 이화학적 변화

메기 양어수를 이용한 BFT-AP 시스템에서 상추와 치커리

Table 4. Comparison of water quality of aquaponics systems, fishery pond, sediment pond, biofloc pond, and crop cultural bed in harvest time

Pond/bed	Water quality					
	pH	EC (dS/m)	Ca (ppm)	K (ppm)	Na (ppm)	NO ₃ (ppm)
Fishery	4.6±0 b	0.182±0.02 b	72.8±3.1 b	10.0±0 a	55.0±1.1ba	41.8±0.4 b
Sediment	4.5±0.1 b	0.187±0.07 a	73.5±2.7 ab	10.0±0 a	55.0±1.6 a	45.3±1.0 a
Biofloc	4.8±0.1 a	0.183±0.07 b	72.5±2.8 b	10.0±0 a	54.8±1.7 a	40.8±1.0 b
Crop	4.7±0.1 a	0.183±0.08 b	75.8±2.9 a	10.0±0 a	56.3±1.8 a	41.8±1.1 b
MIN	4.5	0.182	71.0	10.0	53.0	40.0
MAX	4.8	0.187	78.0	10.0	57.0	46.0
MEAN±SE	4.7±0.1	0.184±0.02	73.6±2.1	10.0±0	55.3±1.1	42.4±1.9
F-value (<i>p</i>)	23.33	64.80	3.08	-	1.63	37.40
Pr > F	0.0001	0.0001	0.0683	-	0.2346	0.001

Data represent the mean±SE of four replicates. Different lowercase letters indicate significant difference according to LSD test at $p=0.05$.

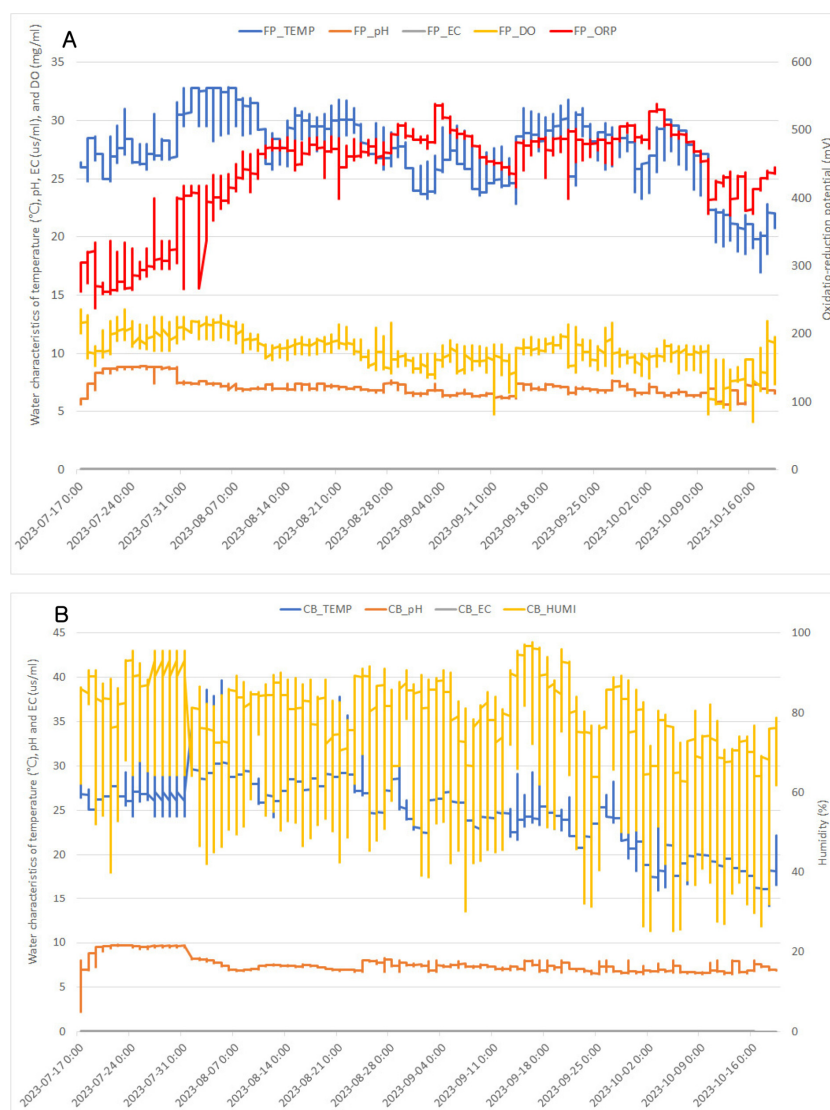


Fig. 2. Monitoring of water characteristics, temperature, pH, EC, dissolved oxygen (DO), and oxidative-reduction potential (ORP) of catfish culture pond (A) and crop culture bed (B) for aquaponics systems for lettuce and chicory.

Table 5. Water temperature, dissolved oxygen (O₂), pH, electrical conductivity (EC) and redox potential (ORP) in differently planted aquaponics systems during the study period

Month	Range	Fishery pond					Crop cultural bed		
		Temp (°C)	pH	EC (dS/m)	DO (ppm)	ORP (mV)	Temp (°C)	pH	EC (dS/m)
July	Min	24.8	5.7	0.06	9.0	238.7	24.3	2.3	0.08
	Max	32.8	8.9	0.11	13.8	418.3	36.1	9.8	0.12
	Mean	27.4	8.7	0.10	11.6	299.1	27.2	9.6	0.11
Aug.	Min	24.0	6.4	0.06	8.3	267.4	22.9	6.8	0.06
	Max	32.9	7.7	0.10	13.3	510.0	39.7	8.3	0.12
	Mean	29.2	7.0	0.07	10.7	471.6	29.1	7.4	0.08
Sep.	Min	17.0	5.5	0.06	4.2	375.8	18.2	6.5	0.08
	Max	30.3	7.4	0.09	12.8	538.9	36.1	8.0	0.14
	Mean	24.1	6.5	0.08	9.3	455.5	25.2	7.3	0.11
Oct.	Min	22.9	6.2	0.06	4.8	400.1	13.9	6.5	0.05
	Max	31.8	7.7	0.10	12.6	538.9	32.4	8.0	0.12
	Mean	27.6	6.8	0.08	9.9	479.9	20.7	6.9	0.10

를 재배할 경우 2023년 7월 상순부터 10월 중순까지 메기 양어조와 작물 재배 베드의 수질과 연관된 수온, pH, 전기전도도(EC), 용존산소량(DO) 및 산화환원전위(ORP) 변화를 조사하였더니 메기 양어조(Fig. 2A, Table 5)와 작물 재배 베드(Fig. 2B, Table 5)에서 수온, pH, EC, DO 및 ORP 값이 월에 따라 조금씩 다른 양상을 보였다. 메기 양어조와 상추와 치커리 재배 베드의 월평균 수온은 7월부터 9월까지 유사하게 나타났으나 10월에는 상추와 치커리 재배 베드의 수온이 메기 양어조의 수온보다 6.9°C 낮은 것으로 나타났다(Fig. 2, Table 5). 순환수의 pH는 상추와 치커리 재배 베드의 순환수보다 메기 양어조 순환수의 pH가 0.3-1.2 정도 낮은 것으로 나타났다(Fig. 2, Table 5). 순환수의 EC도 상추와 치커리 재배 베드의 순환수보다 메기 양어조 순환수의 EC가 0.01-0.03 dS/m 정도 낮은 것으로 나타났다(Fig. 2, Table 5).

메기 양어조에서 월 평균 수온은 10월을 제외하고 각 월별로 유사한 값을 보였으며 8월에 29.2°C로 가장 높았다. 월평균 최저 기온은 9월경 17.0°C이었으며 최고 기온은 7월 32.8°C와 8월 32.9°C이었다(Fig. 2A, Table 5).

메기 양어조의 월평균 pH는 9월까지 지속적으로 감소하였으며, 7월의 월평균 pH는 8.7로 가장 높게 나타났으며 9월 월평균 pH는 6.5로 가장 낮았으며 10월 월평균 pH가 6.8로 다시 상승하였다(Fig. 2A, Table 5).

메기 양어조에서 순환수의 월평균 EC는 7월에 0.10 dS/m로 가장 높았으며, 10월까지 지속적으로 감소하여 월평균 EC가 0.08 dS/m이었다. 메기 양어조에서 월평균 용존산소요구량(DO)은 7월에 11.6 ppm으로 가장 높게 나타났으며 9월까지 지속적으로 감소하여 9.3 ppm이었으며 10월에는 DO가 9.9 ppm으로 다시 상승하는 것으로 나타났다(Fig. 1A, Table 4).

메기 양어조의 월평균 산화환원전위(ORP)는 7월에 299.1 mV를 나타내었으며 월별로 지속적으로 증가하여 10월에 479.9

mV로 가장 높은 수치를 보였(Fig. 2A, Table 5).

상추와 치커리 재배 베드의 월평균 수온은 8월에 29.1°C로 가장 높았으며 9월부터 월평균 기온은 지속적으로 감소하여 10월에는 20.7°C로 점점 낮아지는 것으로 나타났다(Fig. 2B, Table 5). 상추와 치커리 재배 베드의 월평균 pH는 10월까지 지속적으로 감소하였으며, 7월의 월평균 pH는 9.6으로 가장 높게 나타났다. 10월 월평균 pH는 6.3으로 가장 낮았으며 10월까지 지속적으로 감소하였다(Fig. 2B, Table 5). 상추와 치커리 재배 베드의 순환수의 월평균 EC는 8월에 0.08 dS/m로 가장 낮은 값을 보였으나 7월, 9월, 10월의 월평균 EC는 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2B, Table 5).

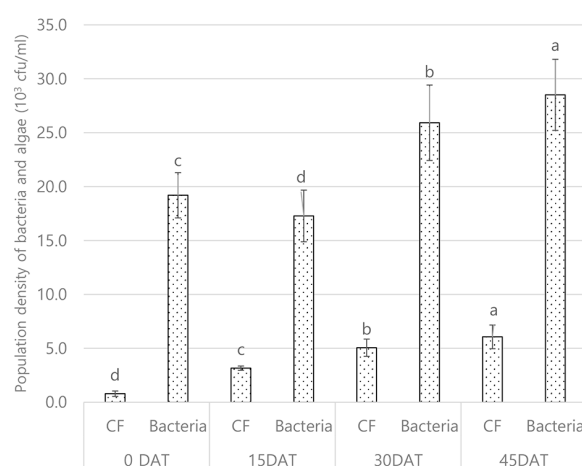


Fig. 3. Monitoring population density of bacterial and algae (CF) in biofloc pond after run the catfish culture aquaponics systems for lettuce and chicory cultivation. Data represent the mean±SE of four replicates. Bar with different letters are significantly different from each another (Duncan's test at 95 % confidential level).

항균 세균과 미세조류 처리시간의 경과에 따른 생물반응조의 밀도 변화

메기 양어수를 이용한 BFT-AP시스템에서 상추와 치커리 재배를 위해 생물활성조에 투여한 식물병원균에 항균력을 가지는 세균과 식물 생육 촉진 효과가 알려진 *B. velezensis* AFB2-2와 미세조류(*C. fusca*) 재배 시간의 경과에 따라 15일 간격으로 밀도 변화를 조사하였다. 미세조류(*C. fusca*)는 접종 일 수가 경과함에 따라 처음 접종한 농도(평균 $0.8 \pm 0.3 \times 10^3$ cfu/ml)보다 유의적으로 증가하는 것으로 나타났다. 45일 후에는 평균 $6.1 \pm 3.3 \times 10^3$ cfu/ml로 처음 접종한 농도에 비해 평균 1.1×10^3 cfu/ml 이상 증가한 것으로 나타났다(Fig. 3). 세균 AFB2-2의 경우는 접종 15일 후에는 처음 접종한 밀도(평균 $19.2 \pm 2.1 \times 10^3$ cfu/ml)보다 1.9×10^3 cfu/ml 낮은 밀도를 보였으나, 점차 회복하여 45일 후에는 평균 $28.5 \pm 9.3 \times 10^3$ cfu/ml로 3.3×10^3 cfu/ml 이상 증가하였다(Fig. 3).

고 찰

최근에는 전 세계적으로 인구가 증가하고 있어 농업 부문에서 식량 생산의 필요성이 더욱 중요해지고 있다. 그러나, 급격한 기후 변화 속에서 농업은 물소비량이 많아지는 부문 중의 하나로, 식량 생산량의 증가가 수자원에 대한 부정적인 영향을 미칠 수 있어 지속가능한 작물 생산 체계의 개발이 필요하다[4,19,20].

도심형 물고기 양식 시스템으로 바이오플락 양식기술과 아쿠아포닉스 시스템을 활용하여 양어수를 교체하지 않고 메기를 양어한 결과 151일의 사육 후에 2.8 g의 중묘가 평균 무게 171.3 g (총중량 56.53 kg)과 235.5 g (총 중량 71.1 kg)로 성장하였으며, 분조 이후 메기의 생존율은 78.0% 이상인 것으로 보고되었다[21].

본 연구에서는 BFT-AP 실험구에서 사육한 지 60일간 사육한 후, 메기의 성장을 조사한 결과 생존율은 96.0%이었고, 평균 어체중은 처음 평균 어체중보다 약 178.5 g 증가하였다. 또한 메기의 WGR은 241.4%로 성장하였고, SGR은 3.0%로 메기의 생산성이 높은 것으로 확인되어 유사한 기술적 숙련도를 보이고 있다고 판단된다.

아쿠아포닉스 시스템에서 질소 순환이 수생식물재배에 있어 주요한 역할을 한다. 물고기가 생성하는 암모니아는 박테리아의 질화작용을 통해 식물에 유용한 질소원인 질산(NO₃-N)으로 변환된다. 이 과정은 식물, 물고기 및 박테리아가 균형 잡힌 공동 시스템에서 공존할 수 있게 하며, 물고기 양어에서 발생하는 폐기물을 자원으로 전환하는 데 기존의 수경재배 시스템과 비교했을 때 경제적 이익을 가져올 수 있다고 예측되고 있다[22,23].

일반적으로 수경재배에서는 배양액내 특정 성분의 농도를 파악하기 어렵기 때문에 양분 관리의 기준으로 각각의 무기성분 농도에 대한 정확한 정보를 파악하기 어렵다. 그래서 총 이온 농도를 파악하기 위해 EC 값을 기준으로 설정하는 경우가 많다[24].

본 연구에서는 작물재배 베드보다 메기 양어조 순환수의 pH가 0.3-1.2 정도 낮았으며 EC도 작물재배 베드보다 메기 양어조 순환수가 0.01-0.03 dS/m정도 낮았다. 그러나, 메기 양어조의 월평균 산화환원전위(ORP)는 7월에 299.1 mV를 나타내었으며, 월별로 지속적으로 증가하여 10월에 479.9 mV로 가장 높아지는 것으로 보아 실험에 적용한 아쿠아포닉스 시스템에서 각 부분별로 설계한 기능이 잘 작동되고 있는 것을 시사한다.

틸라피아를 양어하는 아쿠아포닉스 운영 시, 물고기에 양분을 보충할 경우 물고기의 성장률은 높아졌지만 식물의 뿌리 미생물군에는 영향을 미치지 않았으며, 환경적 영향을 줄이기 위한 효과적인 영양 관리를 설계하는 데 작물의 기능적 반응을 모니터링하는 것이 중요함을 강조하였다[12].

국내에서도 메기 양어수를 이용한 아쿠아포닉스 가동 시 생산된 상추, 바질, 적근대, 적치커리 등이 원활한 성장을 보여 5개월간 총 148.85 kg의 식물을 생산하였고, 식물 재배에 따른 양어수 내의 질산 제거 능력과, 질산이 제거된 양어수는 메기 양어수로 재사용이 가능한 것으로 확인되었다[21].

본 연구에서는 상추와 치커리 재배 30일 후, BFT-AP 시스템을 구성하는 양어조, 침전조, 생물반응조 및 작물 재배 베드의 수질을 조사하였더니, 전체 시스템의 NO₃ 평균 함량은 42.4 ± 1.9 이었고 침전조에서 평균 45.3 ± 1.0 으로 유의적으로 높은 값을 보였지만 BFT-AP 시스템의 구성마다 K과 Na 함량을 제외하고 서로 다른 수질의 차이를 보였으며 매우 안정된 수질을 나타내었다.

토양 대신 무기배양액을 사용하는 식물공장이나 온실을 이용한 수경재배 방식이 적용되고 있다. 이 중에는 담액식(Deep Flow Technique, DFT), 분무식(Aeroponics), 박막식(Nutrient Film Technique, NFT) 등이 주로 사용되고 있다[8, 25,26].

이상으로 순환형 아쿠아포닉스 시스템을 이용하여 메기 양어와 상추, 치커리 등의 작물을 재배할 때, 작물의 종류에 따라 질소 흡수 패턴과 재배 종료 후 잔여 양분의 양이 달라질 수도 있고 작물의 생육 단계나 작물을 둘러싼 환경변화에 의해 질소 흡수가 저해되거나 재배 초기 투입량이 과다할 경우 재배종료 시까지 배양액내 다량의 질소 성분이 배양액에 남을 경우 물고기의 폐사와 작물 생육의 불균형을 초래할 수 있는 것으로 보고되었다[26,27].

따라서 아쿠아포닉스 시스템을 설계할 때, 무엇을 급여할 지에 따라 물고기의 특성과 사료의 특성을 정확하게 고려하고 *B. velezensis*나 *C. fusca*와 같은 유용한 미생물을 생물활성조에 투여하여 작물의 생산성과 수질의 변화에 큰 영향을 줄 수 있도록 하는 것이 중요하다.

결 론

BFT-AP 실험구에서 사육 60일 후, 메기의 생존율은 96.0%이었고, 평균 어체중은 처음보다 약 178.5 g 증가하였다. 또한 메기의 WGR은 241.4%로 성장하였고 SGR은 3.0%로 생

산성이 높은 것으로 확인되었다.

메기 양어수를 이용한 BFT-AP에서 재배한 상추 2품종과 치커리 2품종 모두 수경재배보다 초장, 엽수 및 생체중이 각각 11.0-49.2%, 30.3-45.5%, 30.3-68.6% 유의적으로 증가하였다. 또한 일반 치커리를 제외하고 BFT-AP에서 재배한 것이 관행의 수경재배보다 SPAD 값이 15.4-43.3% 유의적으로 높았다.

BFT-AP 시스템의 구성마다 K과 Na 함량을 제외하고 서로 다른 수질의 차이를 보였고 전체 NO₃ 평균 함량은 42.4±1.9이었고 침전조는 평균 45.3±1.0으로 유의적으로 가장 높은 값을 보였다.

메기 양어조와 작물재배 베드의 월평균 수온은 7월부터 9월까지 유사하였으나 10월에는 작물재배 베드의 수온이 메기 양어조의 수온보다 6.9°C 낮았다. 또한 작물재배 베드보다 메기 양어조 순환수의 pH가 0.3-1.2 정도 낮았고 EC도 메기 양어조 순환수가 0.01-0.03 dS/m 정도 낮았다. 메기 양어조의 월평균 산화환원전위(ORP)는 월별로 지속적으로 증가하여 10월에 479.9 mV로 가장 높았다.

상추와 치커리 재배를 메기를 이용한 BFT-AP 시스템에서 생물활성조에 투여한 *C. fusca*는 접종 45일 후에는 평균 1.1 × 10³ cfu/ml 이상이었고 *B. velezensis* AFB2-2는 45일 후에는 3.3 × 10³ cfu/ml 이상으로 높은 밀도를 보였다.

이상의 결과를 토대로 바이오플릭(BFT)을 적용한 순환식 아쿠아포닉스 재배기술은 메기의 양어뿐만 아니라 메기 양어 순환수를 이용하여 상추와 치커리를 재배하여 생산하는데 관행의 수경재배와 비교할 때 오히려 생육이 증진되는 것으로 보아 친환경 상추와 치커리 재배에 메기 순환수를 이용한 순환식 아쿠아포닉스 재배기술 적용이 가능할 것으로 본다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was funded by a research program (PJ 015796) of Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea.

References

- Kim WG (2003) Strategies for addressing water scarcity in response to 21st century water demand outlook. *Atmospheres* 13(3), 64-67.
- Lee DJ, Son HJ, Yoo JY, Kim TW (2023) Spatial analysis of water shortage areas considering spatial clustering characteristics in the Han River basin. *Journal Korea Water Resources Associations*, 56(5), 325-336. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2023.56.5.325>.
- Lim YA, Seong JH, Kim HS (2017) Agricultural water demand characteristics and water shortage measures. Research Report 816. Korean Rural Economic Institute.
- Atzori G, Nissim WG, Caparrotta S, Santantoni F, Masi E (2019) Seawater and waterfootprint in different cropping systems: A chicory (*Cichorium intybus* L.) case study. *Agricultural Water Management*, 211, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.040>.
- Rodriguez-Jurado S, Garcia-Trejo JF, Mejia-Ugalde I, Vera-Morales JM, Vargas-Hernandez M, Avila-Juarez L (2020) Water and fertilizer efficiency in a polyculture cropping system under three production systems. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10, 95-105. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.027>.
- Rosa-Rodriguez RDL, Lara-Herrera A, Trejo-Tellez LI, Padilla-Bernal LE, Solis-Sanchez LO, Ortiz-Rodriguez JM (2020) Water and fertilizers use efficiency in two hydroponic systems for tomato production. *Horticultura Brasileira*, 38(1), 47-52. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620200107>.
- Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim KB, Kim JM, Kim JD (2019) 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 Journal of Fisheries and Aquatic Science* 52(5), 482-495. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0482>.
- Khan K, Yan Z, He D (2018) Impact of light intensity and nitrogen of nutrient solutions on nitrate content in three lettuce cultivars prior to harvest. *Journal of Agricultural Science*, 10(6), 99-109. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p99>.
- Kumar RR, Cho JY (2014). Reuse of hydroponic waste solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(16), 9569-9577. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3024-3>.
- Haddad M, Mizyed N (2011) Evaluation of various hydroponic techniques as decentralized wastewater treatment and reuse systems. *International Journal of Environmental Studies*, 68(4), 461-476. <https://doi.org/10.1080/00207233.2011.582701>.
- Fayezizadeh MR, Ansari NAZ, Albaji M, Khaleghi E (2021) Effects of hydroponic systems on yield, water productivity and stomatal gas exchange of greenhouse tomato cultivars. *Agricultural Water Management* 258, 107171. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107171>.
- Tsoumalakou E, Mente E, Kormas KA, Katsoulas N, Vlahos N, Kapsis P, Levizou E (2022) Precise monitoring of lettuce functional responses to minimal

- nutrient supplementation identifies aquaponic system's nutrient limitations and their time-course. *Agriculture* 12, 1278.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12081278>.
13. Kim DW, Kim JS, Kim JD, Lee SW, Lee DH (2021). Effects of dietary monobasic potassium phosphate levels on water quality and growth of gold madarin fish, *Siniperca scherzeri* and leafy vegetables in a hybrid BFT-aquaponic system. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* 33(4), 844-858.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.8.33.4.844>.
 14. Lee DH (2021) Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using yellow koi fish, *Cyprinus carpio* and hydroponics. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* 33(5), 1027-1037.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.10.33.5.1027>.
 15. Lee DH, Kim JD (2021). Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using Japanese eel, *Anguilla japonica* and hydroponics. *Fisheries Aquatic Sciences* 24(7), 260-275.
<https://doi.org/10.47853/FAS.2021.e26>.
 16. 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. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* 34(1), 133-148. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.2.34.1.133>.
 17. Kim MJ, Shim CK, Park JH (2021) Control efficacy of *Bacillus velezensis* AFB2-2 against potato late blight caused by *Phytophthora infestans* in organic potato cultivation. *The Plant Pathology Journal* 37(6), 580-595. <https://doi.org/10.5423/PPJ.FT.09.2021.0138>.
 18. Kim MJ, Shim CK, Kim YK, Ko BG, Park, Hwang SG, Kim BH (2018) Effect of biostimulator *Chlorella fusca* on improving growth and qualities of Chinese chives and spinach in organic farm. *The Plant Pathology Journal* 34(6), 567-574.
<https://doi.org/10.5423/PPJ.FT.11.2018.0254>.
 19. Albaji M, Golabi M, Egdernejad A, Nazarizadeh F (2014) Assessment of different irrigation systems in: Albaji M. *Plain Water Sciences Technology: Water Supply*, 14(5), 778-786
 20. Neissi L, Albaji M, Nasab SM (2020) Combination of GIS and AHP for site selection of pressurized irrigation systems in the Izeh plain, Iran. *Agricultural Water Management* 231, 106004.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106004>.
 21. Kim SR, Jang JW, Kim BJ, Jang IK, Lim HJ, Kim SK (2019) Urban aquaculture of catfish, *Silurus asotus*, using biofloc and aquaponics systems. *Korean Journal of Environmental Biology* 37, 545-553.
<https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.4.545>.
 22. Rakocy JE, Bailey DS, Shultz KA, Cole WM (1997) Evaluation of a commercial scale aquaponic unit for the production of tilapia and lettuce. pp. 357-372. In: Fitzsimmons K (ed.). *Tilapia Aquaculture: Proceedings of the Fourth International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, Orlando, Florida.
 23. Delaide B, Delhaye G, Dermience M, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2017) Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. *Aquatic Engineering* 78, 130-139.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>.
 24. Bailey W, Haggett B, Svanberg R (1988) Monitoring nutrient film solutions using ion-selective electrodes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 40(2), 129-142.
[https://doi.org/10.1016/0021-8634\(88\)90110-2](https://doi.org/10.1016/0021-8634(88)90110-2).
 25. Alan R, Zulkadir H, Padem H (1994) The influence of growing media on growth yield, and quality of tomato grown under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*, 336, 429-436.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.366.53> 7.
 26. Bugbee B (2004) Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Horticulturae*, 648, 99-112.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.12>.
 27. Heo J, Park K, Lee J, Hong S, Lee G, Baek J (2018) Design of cloud-based data analysis system for culture medium management in smart greenhouses. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 37, 251-259.
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2018.37.4.38>.