

냉수성 어종 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)를 적용한 Coupled aquaponics (CAS) 및 Decoupled aquaponics (DAS) 생산 방식의 엽채류의 성장 비교

이 동 훈[†]

[†]경기도해양수산물연구소(연구사)

Comparison of Leafy Vegetable Growth in Coupled and Decoupled Aquaponic Systems Using Cold-Water Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*)

Dong-Hoon LEE[†]

[†]Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

This field-demonstration study compared the growth performance of five leafy lettuce cultivars grown in coupled aquaponic systems (CAS) and decoupled aquaponic systems (DAS) using cold-water rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Due to the practical constraints of full-scale field facilities, tank-level replication could not be established, presenting a statistical limitation (pseudoreplication) for inferential hypothesis testing. Therefore, growth parameters were evaluated descriptively based on repeated measurements over a 3-week harvest period (weeks 18 to 20). Across all evaluated cultivars, DAS showed a consistent descriptive trend of higher leaf biomass production compared to CAS. Integrated descriptive analysis across all cultivars further demonstrated that DAS maintained higher median and overall biomass distribution ranges than CAS. Higher nutrient accumulation (nitrate and phosphate) in the DAS plant zone contributed to enhanced crop growth. Although the lack of facility-level replication remains a methodological limitation, these field-scale findings suggest that DAS offers a more effective nutrient management strategy than CAS for maximizing leafy vegetable productivity in trout-based aquaponics.

Key words : Aquaponics, Coupled aquaponic system, Decoupled aquaponic system, Rainbow trout, Leafy vegetables

I. 서 론

인구 증가와 함께 수자원 및 식량 공급에 대한 글로벌 수요가 폭증하면서 전통 농어업은 가뭄, 수열 환경 격변 등 심각한 기후 위기와 자원 고갈 문제에 직면해 오고 있으며, 이러한 한계를 타개하고 사육수의 소모를 획기적으로 억제하면서 유기 오염원의 외부 유출을 차단하는 친환경 집약식 양식 방법으로 순환여과시스템(RAS), 마이

오픈락공법(BFT), 그리고 아쿠아포닉스(Aquaponics) 등이 대안으로 급부상하였다(Rakocy et al., 2006; Mariscal-Lagarda et al., 2012; Rijn, 2013; Avnimelech et al., 2015).

아쿠아포닉스는 수산 기술과 수경재배가 유기적으로 연계된 순환형 복합 생산 모델이다. 수산 생물의 건강한 생존을 위해 투입된 배합 사료가 수중 내 독립 및 종속영양 미생물 군집의 대사 메커니즘을 거쳐 유기 영양소와 질산염 형태로

[†] Corresponding author: 031-8008-8357, leedh27@gg.go.kr

분해·산화되며, 식물 뿌리가 이를 성장 필수 인자로 흡수함으로써 사육 수질의 정화와 식물 생체량 증대를 동시에 달성한다. 이 시스템은 주기적인 사육수 환수 없이도 농수산물의 지속 가능한 다각적 수확을 유도하는 친환경 혁신 기술로 평가받고 있다(FAO, 2014).

전형적인 고전 구조인 연계형 시스템(coupled aquaponic system, CAS)은 사육 수조부와 식물의 근권 베드가 단일 관로로 연동되어 동일한 이화학적 용수 환경을 공유한다(Rakocy et al., 2006). 따라서 사육 대상 어종의 생리적 조건과 재배 대상 품종의 성장 조건이 충돌할 경우 양자 간의 적절한 수질 타협안(trade-off)을 수립해야 하는 한계가 존재한다. 반면 개량형인 분리형 아쿠아포닉스(decoupled aquaponic system, DAS)는 어류부와 수경부의 수질 순환 경로를 분리 제어할 수 있는 독자적 구조 모델로, 물고기와 엽채류 모두에게 저해 요인 없는 개별 독립 최적 성장 조건을 구현할 수 있다(Goddek et al., 2016; 2019).

DAS 구조는 어류가 배설한 유기 고형 슬러지를 식물재배지로 이송하기 전 물리적인 스크린 및 정화 장치를 통해 분리 정제시킨다. 이후 수집된 유기 산물에 기계적 또는 생물학적 무기질화 환원 처리를 가하여 식물이 즉각 흡수할 수 있는 이온 상태로 변환하여 공급한다. CAS 시스템과의 가장 극명한 차별점은 식물 재배부 내의 용수가 자체적으로 폐쇄 순환을 이어갈 뿐 어류 사육 수조로 다시 역유입되지 않는다는 점이다. 이는 식물이나 어류 한쪽에 병원성 대사 억제 물질이나 병원체가 출현하더라도 물리적인 차단 제어를 가능하게 하여 전반적인 시스템의 운영 효율성과 생리적 성장 한계를 완벽히 극복하도록 돕는다(Kloas et al., 2015).

현재 국내에서 진행된 아쿠아포닉스 관련 선행 연구의 상당수는 CAS 구조적 모델에 편중되어 조사가 수행되어 왔다(Lee et al., 2019a; Lee et al., 2019b; Lee et al., 2020; Lee and Kim, 2021; Lee, 2022a). 반면 DAS 운영 구조에 관한 심층적

실증 연구는 도입 단계에 머물러 있는 실정이며, 최근 일부 온수성 어종을 활용한 배치 실험에서 DAS 모델이 어류의 증체 효율 및 수질 관리 안정성에 유의미한 이점을 제공함이 단편적으로 보고되었을 뿐이다(Lee, 2022b; Lee, 2023).

대표적인 내수면 품종인 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)는 국내외 내수면 양식 산업에서 매우 높은 생산 비중과 시장 가치를 차지하는 핵심 고부가가치 어종이다(KOSIS, 2024; Oh and Paek, 2024). 그러나 기후 격변에 따른 지하수 수량 고갈로 수질 관리가 한층 어려워짐에 따라, 기존 유입식에서 순환여과식(RAS)으로의 패러다임 전환이 시도되고 있다. 다만 냉수성 어종 특유의 저수온 유지 비용(냉각 장치 가동 등)으로 인해 생산 단가 상승을 초래하는 단점이 있다(Oh and Paek, 2024).

따라서 본 연구는 최근의 기후변화에 능동적으로 대응하고 냉수성 양식 구조 전환 시점에서 엽채류 부가 생산을 통한 경제적 시너지를 창출하고자 수행되었다. 동일한 수산 배출수 공급 기반 조건에서 아쿠아포닉스 운영 모델(CAS vs DAS) 구조 차이가 대표적인 유럽산 상추류 5품종의 성장도 및 최종 누적 수확량에 미치는 생리적 영향성을 정밀히 조사 분석하여, 국내 기술 고도화를 위한 식물 중심의 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 실험어 배치

어류를 입식하기 앞서 CAS (coupled aquaponic system) 및 DAS (decoupled aquaponic system) 시스템 내 사육수조 및 식물재배지 용수 소독을 위해 차아염소산나트륨(Yuhanclorox, Ltd., Korea) 20 ppm을 투입하였으며, 이후 염소 독성을 중화시키기 위해 티오황산나트륨(sodium thiosulfate pentahydrate 98.5%, Samchun, Ltd., Korea)을 사용하였고, 최종 O-Tolidine 0.1% 시약(Samchun, Ltd., Korea)으로

잔류 염소가 없음을 확인하였다. 총 20주간의 실험 기간에서 물만들기 과정이 1~8주 소요되었고, 물만들기 방법은 Lee(2022b, 2023)가 제시한 방식에 준하여 이루어졌다. 어류는 9주에 입식하였으며, 실험에 사용된 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)는 경기도 포천시 소재 양식장에서 평균 어체중 930 g을 갖는 개체 92마리를 CAS 42,900 g (46마리) 및 DAS 42,800 g (46마리)으로 나누어 개별 시스템 수조에 분리 배치하였다.

2. 실험 사료 및 급이 조건

실험 기간 동안 제공된 가공 사료는 단백질 46.8%, 지질 9.6%, 회분 12.5%, 수분 7.2% 배합 비율의 상업용 담수어 사료(Supercat F-GR, 5.3~6.7 mm)를 활용하였다(<Table 1>). 사료 공급은 용수 환경의 안정도를 도모하고 섭식되지 않은 잔류 사료의 수중 붕괴를 원천 방지하기 위하여 제한 급이 방식을 도입하였다. 사료 공급 비율은 CAS 시험구의 경우 어체중 대비 일일 0.5%로 제한하였으며, 배출 슬러지의 물리적 분리 및 기계적 수질 정화 조치가 상시 작동되는 DAS 시험구는 환경 관리가 용이함을 감안하여 일일 1.0%의 사료를 배정하여 1일 2회 분할 공급하며 총 12주간 운영하였다.

3. 실험 시스템 및 수질 조절

CAS 시스템은 원형 사육조, 섬프 탱크, 2층 식물재배 베드(L 2.9 m × W 0.6 m × H 0.1 m, 총 20개 베드), 바이오헬릭스 여과 장치 및 순환펌프로 구성되었다. 대조구인 DAS 시스템 역시 동일한 규모의 사육조와 베드로 구축하되, 배출 용수 관로 상에 드럼스크린(망목 50 μ m)을 유기적으로 배치하여 고형 유기물을 별도의 외부 정화조로 전량 집수되도록 조절하였다(Lee, 2023).

DAS 정화조 내부에는 유기물의 무기물화를 유도하기 위하여 *Bacillus subtilis* 미생물 제제를 1주에 300 g 총량으로 주기적으로 투입하였다. 아

<Table 1> Chemical composition of the experimental diet¹

Composition	Diet
Moisture (%)	7.2
Crude protein (%)	46.8
Crude lipid (%)	9.6
Crude ash (%)	12.5

¹Values are means of 2 determinations.

울러 정화조 내부를 침전구역과 유동상 여과재 구역으로 이원화 분리하여 질산화 미생물의 정착과 대사를 활성화하였으며, 처리된 영양수는 식물 베드 섬프 수조를 거쳐 재배 베드로만 일방향 통과시킨 뒤 어류 수조로 유입되지 않도록 순환 경로를 완전 격리하였다(Lee, 2023)..

수질 초기 안정화를 위해 유용 미생물 복합 제제(BFT-ST 및 Eco-Nit)를 시스템별로 각각 7.6 L씩 접종하였으며, 초기 2주간 발생하는 암모니아 농도 발생 수준에 맞추어 유기 탄소원인 정제 포도당을 계산 공급함으로써 화학적 C:N(6:1) 비율을 정밀 관리하였다. 알칼리도 처리는 CAS 구의 pH가 6.5 이하로 강하할 때 KOH 40 g을 투입하는 방식을 취했고, DAS 구는 사육조(pH 7.0 이하 시 KOH 20 g)와 식물 재배 베드(pH 6.0 이하 시 KOH 5 g) 영역을 이원화하여 각각 독립 조절하였다. 또한, DAS 식물부의 초기 질산염 결핍 현상을 보완하기 위하여 복합 비료(N 21%, P 17%, K 17%)를 실험 15주 차부터 매일 50 g씩 정화조 내에 보충 투입하였다.

4. 수질 측정

수질 변화 측정은 주 6회 주기로 수행되었다. 수온($^{\circ}$ C), 용존산소(DO, mg/L), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC; μ S/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), NO₂-N (mg/L), NO₃-N (mg/L) 및 PO₄-P (mg/L)은 분석시약 (NitraVer[®]X Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia Reagent Set 2604545-KR, NitraVer[®]3 Reagent Set 2608345-KR, PhosVer[®]3 Phosphater Reagent, HACH Ltd., Loveland, Co, USA)과 다목적 수질측정기인 DR6000 (HACH Ltd., Loveland, Co, USA)을 이용하여 비색법으로 측정하였다.

5. 엽채류 생산

실험에 사용된 품종은 유럽산 상추류(*Lactuca sativa*)로, 버터헤드(butterhead lettuce), 스کیل톤(skilton lettuce), 이자벨(izabel lettuce), 적상추(red leafy lettuce), 샤로마(xaroma lettuce) 5품종이 적용되었다. 엽채류는 품종당 180개체가 입식되었고, 상단(태양광) 및 하단(형광등)의 광량 차이(상단 15,000 lx ~ 35,000 lx, 하단 9,000 lx ~ 9,600 lx)로 엽채류는 각 품종별 상·하단을 교차하여 광량 차이에 의한 생산성 오차를 배제토록 배치하였다. 본 연구는 연구실 내 소형 수조 실험이 아닌 현장 실증(field-scale demonstration) 형태로 수행되어, 공간 및 시설 규모의 한계로 인해 CAS 및 DAS 시스템 자체의 물리적 반복구(true replication)를 별도로 두지 못하는 구조적 제약이 존재하였다. 이를 보완하고자 동일한 재배 조건 내에서 엽채류 입식(15주차) 후 18주, 19주, 20주차까지 1주 간격으로 총 3회에 걸쳐 중량을 반복 측정하여 시간에 따른 변화를 모니터링하였다.

6. 통계분석

본 연구는 소형 수조 기반의 연구실 실험이 아닌 상업적 규모의 현장 실증(field-scale demonstration) 시설에서 수행되어, 물리적·공간적 제약으로 인해 수조 단위의 반복구(true replication)를 구축하지 못하였다. 따라서 동일 시스템 내 시간 경과에 따른 반복 측정 데이터는 pseudoreplication의 통계적 한계를 지니므로, 가설 검정을 위한 추론 통

계(p-value) 대신 현장 실증 데이터의 경향을 파악하기 위한 기술통계(descriptive statistics) 분석을 적용하였다. 재배 시스템(CAS vs DAS) 및 시간(18, 19, 20주차) 변화에 따른 엽채류 생체량 비교는 품종별 및 주차별 평균값과 표준편차(Mean $\pm$ SD), 수확량 합계, 그리고 전체 품종 통합 데이터의 중앙값(median) 및 사분위 분포(Boxplot)를 이용하여 경향성 위주로 서술하였다. 모든 데이터의 정리 및 기술통계량 산출은 SPSS(Version 10.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 활용하였다.

III. 연구 결과

1. 어류 성장

실험구(CAS, DAS)별 12주간 사육된 무지개송어의 성장 결과는 <Table 2>와 같다. DAS 실험구의 경우 드럼스크린과 슬러지 청소 펌프 설치를 감안하여 CAS 실험구 보다 사료 공급량을 어체중당 0.5%를 초과 공급한 결과, 평균 체중이 실험 종료에서 1,190.0 g을 나타내어 CAS 실험구의 1,054.8 g보다 135.2 g이 높았다. 생존율(survival rate)은 2 실험구 모두 일부 폐사 개체가 출현하였으며, CAS 실험구에서 7마리 폐사하여 DAS 실험구의 4마리 폐사에 비해 3마리가 더 많이 폐사하였다.

2. 수질 측정

수질 측정 결과는 [Fig. 1], [Fig. 2], [Fig. 3]에 나타내었다. 실험 초기 1~3주 차의 2 실험구(CAS, DAS) 모두 DO는 8.0~9.0 mg/L 수준이었으나, 시스템 안정화 및 물만들기가 진행됨에 따라 5주 차 이후부터 실험 종료 시(20주 차)까지 9.5 mg/L 안팎의 높은 수준을 안정적으로 유지하였다. 수온의 경우 초기 1~2주 차에는 20~21°C 이상을 기록하였으나, 냉수성 어종인 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)의 적정 사육 환경 조성을

위해 수온을 점진적으로 하강시켜 5주 차 이후부터는 16-17°C 범위를 일정하게 유지하였다([Fig. 2], [Fig. 3]).

<Table 2> Growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in two experimental groups (CAS and DAS) for 20 weeks

Item	Culture method	
	CAS	DAS
Initial fish No.	46	46
Final fish No.	39	42
Initial total fish weight (g)	42,900	42,800
Final total fish weight (g)	41,140	49,980
Mean fish weight (g)	1,054.8	1,190.0
Feed intake (g, DM)	12,730	27,350
Survival rate (%)	84.8	91.3

pH는 실험 초기 약 7.5 내외를 기록하였으나 전반적으로 완만하게 하강하는 경향을 보였다. CAS구의 경우 15주 차 이후 6.5 이하로 떨어지는 경향을 보여 KOH 투입을 통한 중화 관리가 이루어졌으며, DAS구의 식물 재배지 영역([Fig. 3]) 역시 15주 차(pH 6.5)부터 18주 차(pH 6.0)까지 지속적으로 강하한 후 미세하게 반등하였다. 반면 EC는 초기 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 수준에서 어류 입식(9주 차) 이후 급격히 상승하여 17주 차에는 최대 210-220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CAS) 및 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상(DAS 식물재배지)까지 축적된 후 실험 말기에 소폭 감소하거나 유지되었다.

탁도는 CAS구의 경우 전 실험 기간에 걸쳐 0.4-0.6 NTU 범위에서 안정적인 완충 상태를 보였으나, DAS 어류 사육조의 경우 어류 입식 이후 CAS 실험구 대비 사료 공급량이 많은 관계로 인해 12주 차 이후 최대 1.2 NTU 이상으로 상승하는 경향을 보였다. DAS 식물 재배부([Fig. 3])의 탁도는 숙기 수확이 시작되는 17주 차에 0.2 NTU로 일시적 피크를 친 후 다시 0.1 NTU로 유

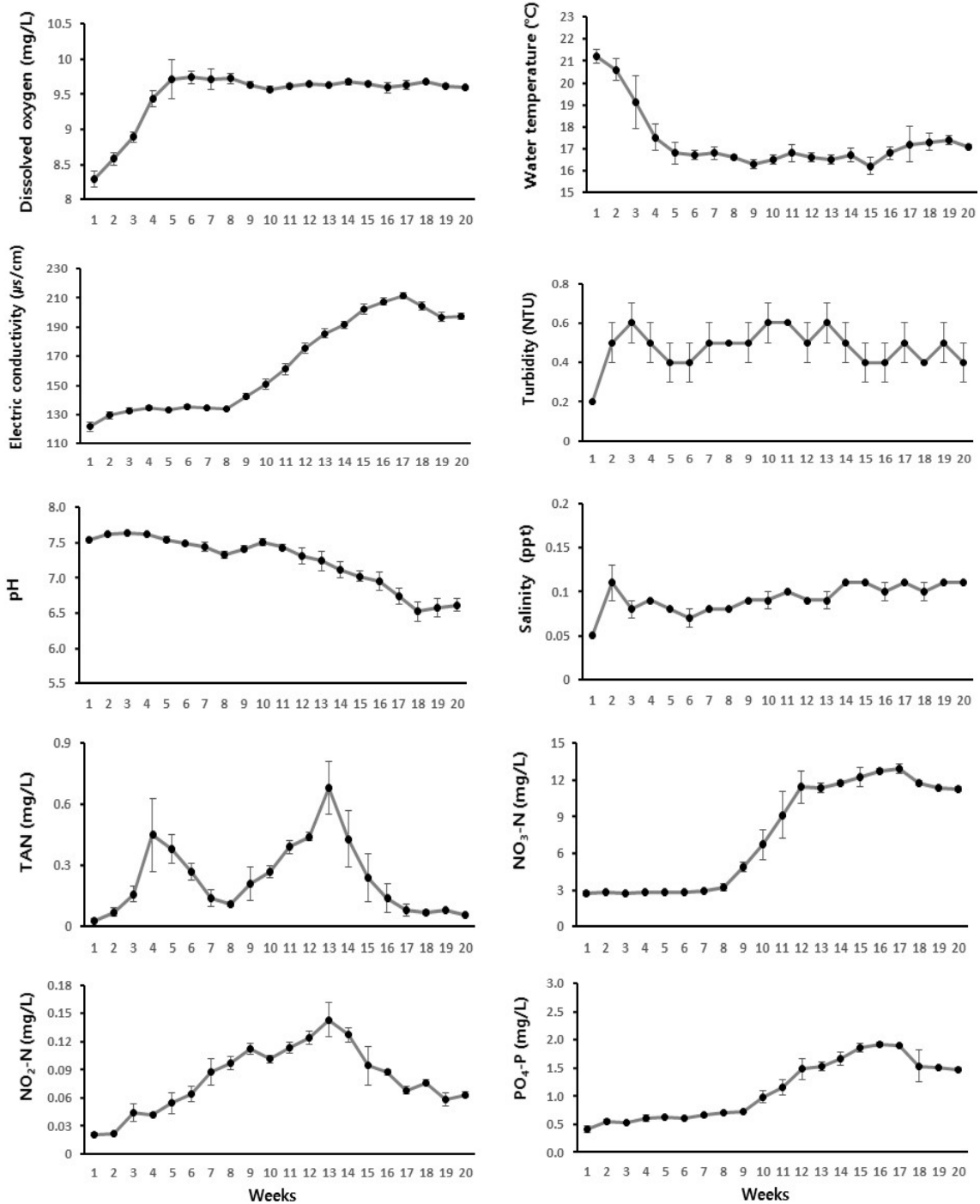
지하였다. 염분은 초기 0.05 ppt에서 사료 급이와 함께 증가하여 0.10-0.13 ppt (CAS, DAS 사육조) 및 0.20-0.23 ppt (DAS 식물재배지) 수준으로 완만하게 축적되었다.

TAN 농도는 물만들기 기간인 4주 차에 1차 피크(0.45-0.61 mg/L)를 친 후 강하하였다가, 9주 차 어류 입식 이후 다시 상승하여 13주 차(CAS, 0.7 mg/L) 및 10주 차(DAS 사육조, 0.45 mg/L)에 2차 피크를 형성한 후 15주 차 이후부터는 0.1 mg/L 이하로 급격히 안정화되었다. $\text{NO}_2\text{-N}$ 역시 TAN의 변동에 맞춰 점진적으로 상승하여 10-13주 차에 최대 정점(0.142-0.208 mg/L)에 도달한 후, 16주 차 이후부터는 0.063 mg/L 이하의 안전한 수준으로 감소하였다. 생물에게 독성이 없는 최종 대사산물인 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 어류 입식 전까지는 3.0 mg/L 이하를 유지하다가, 9주 차 이후 급격한 선형 상승을 시작하여 16-17주 차에 최고치(CAS, 13.4 mg/L, DAS 사육조: 8.5 mg/L)를 기록하였다. 특히 DAS 식물부([Fig. 3])의 경우 15주 차 5.0 mg/L에서 시작하여 20주 차에는 25.0 mg/L까지 폭발적으로 축적되었다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 역시 유사한 경향으로, CAS에서는 17주 차에 2.2 mg/L까지 증가 후 완화되었으나, DAS 식물 재배지에서는 15주 차 5.3 mg/L에서 19주에 최대 11.6 mg/L까지 지속적으로 상승하였다.

3. 엽채류 생산

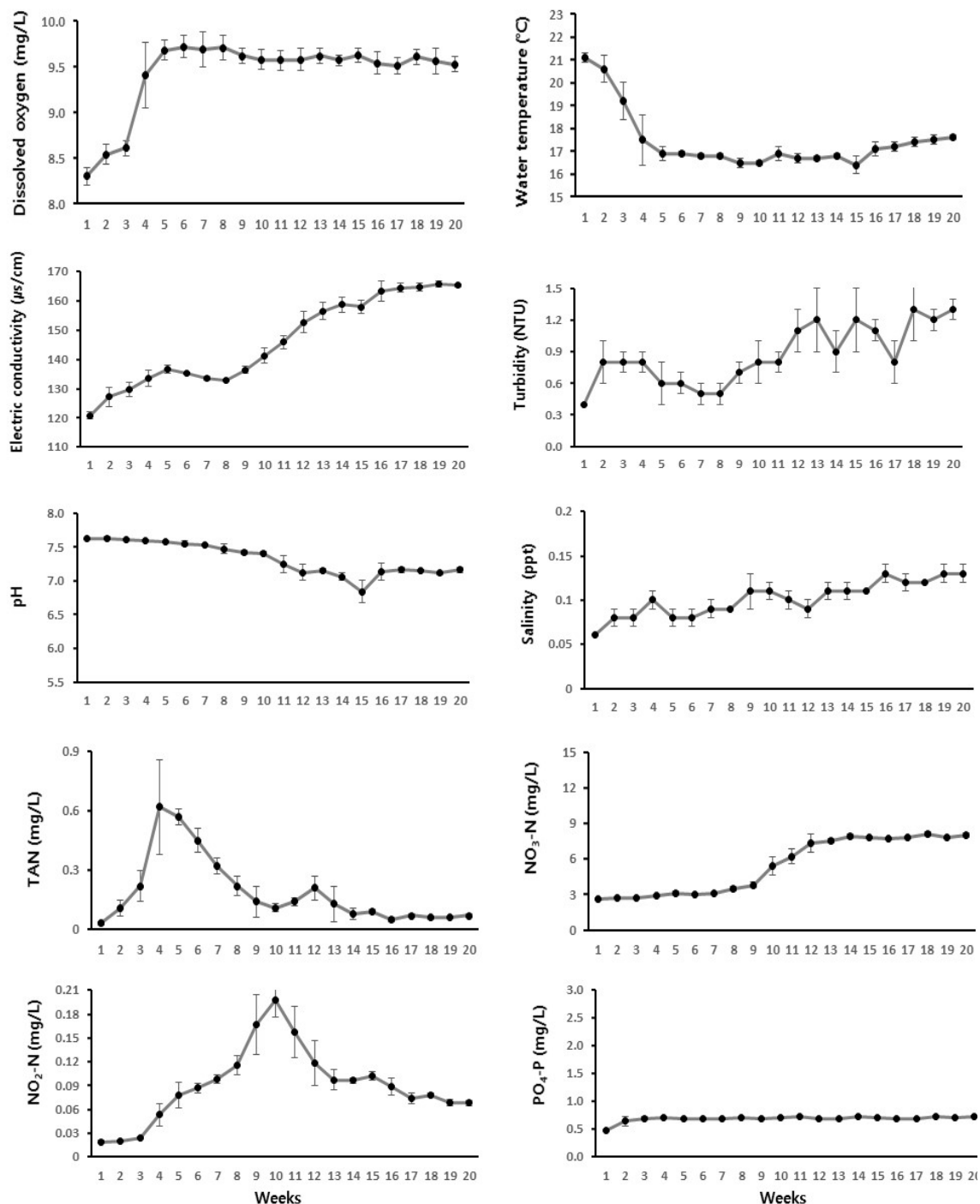
CAS 및 DAS 시스템에서 생산된 엽채류 성장 조사 결과는 <Table 3> 및 [Fig. 4]와 같다.

모든 품종에서 재배 시스템 간 잎 중량의 차이가 관찰되었으며, 전반적으로 CAS 처리구에 비해 DAS 처리구에서 높은 생체량 값을 보였다. 품종별로 살펴보면, skilton과 izabel 품종이 실험 기간 동안 타 품종에 비해 높은 잎 중량을 유지하였다.

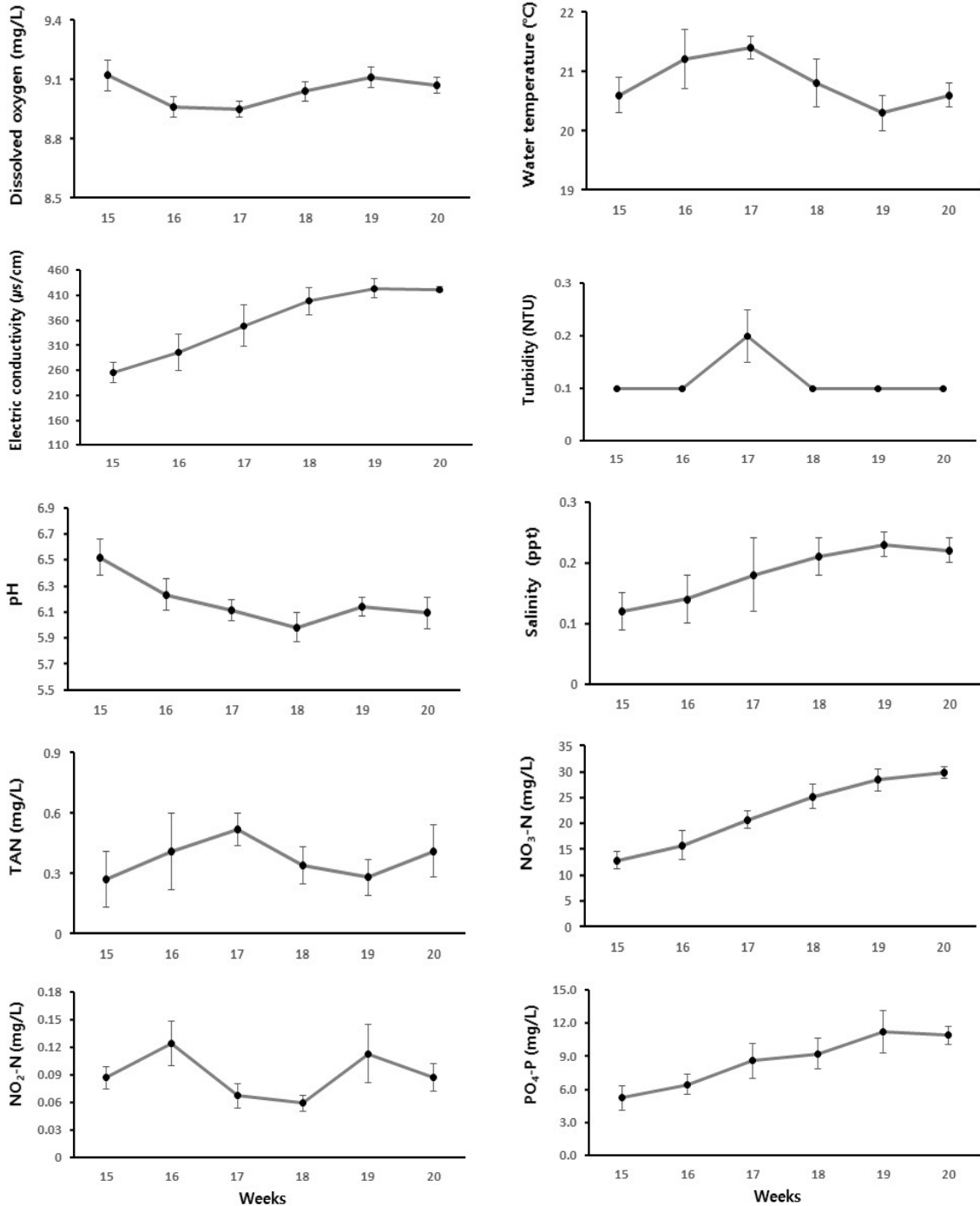


[Fig. 1] Change of water quality (dissolved oxygen, water temperature, electric conductivity, turbidity, pH, salinity, TAN; total ammonium nitrogen, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$) in CAS for 1-20 weeks. CAS, coupled aquaponic system.

냉수성 어종 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)를 적용한 Coupled aquaponics (CAS) 및 Decoupled aquaponics (DAS) 생산 방식의 업체류의 성장 비교



[Fig. 2] Change of water quality (dissolved oxygen, water temperature, electric conductivity, turbidity, pH, salinity, TAN; total ammonium nitrogen, NO₂-N, NO₃-N and PO₄-P) in fish tank of DAS for 1-20 weeks. DAS, decoupled aquaponic system.



[Fig. 3] Change of water quality (dissolved oxygen, water temperature, electric conductivity, turbidity, pH, salinity, TAN; total ammonium nitrogen, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$) in plant cultivation area of DAS for 15-20 weeks. DAS, decoupled aquaponic system.

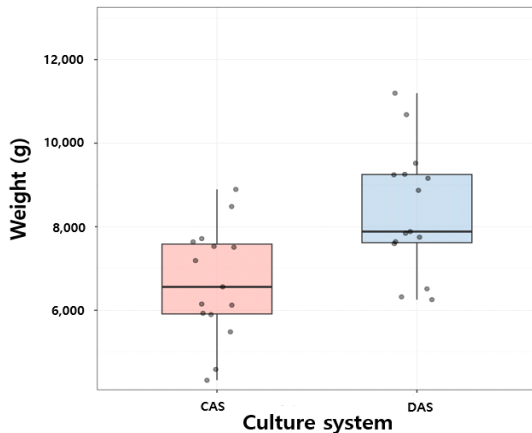
<Table 3> Comparison of Cas and Das experimental groups on the weekly leaf weight (g) of five leafy lettuce (*Lactuca sativa* L) cultivar from weeks 18 to 20.

Leafy vegetable cultivar	week	Experimental group	
		Cas	Das
Butterhead (No. 180)	18	6,560	7,748
	19	5,484	6,254
	20	7,638	9,244
	Sum	19,682	23,246
	Mean±SD	6,560±1,077	7,749±1,495
Skilton (No. 180)	18	7,189	9,520
	19	5,897	7,845
	20	8,482	11,197
	Sum	21,568	28,562
	Mean±SD	7,189±1,292	9,521±1,676
Izabel (No. 180)	18	7,508	9,161
	19	6,124	7,641
	20	8,894	10,682
	Sum	22,526	27,484
	Mean±SD	7,508±1,385	9,161±1,520
Red leafy lettuce (No. 180)	18	6,151	7,595
	19	4,587	6,321
	20	7,716	8,870
	Sum	18,454	22,786
	Mean±SD	6,151±1,564	7,595±1,274
Xaroma (No. 180)	18	5,928	7,884
	19	4,326	6,514
	20	7,531	9,256
	Sum	17,785	23,654
	Mean±SD	5,928±1,602	7,884±1,371

¹Values represent the leaf weight (g) of each leafy vegetable cultivar and are calculated based on the weekly measurements from week 18 to week 20. SD, standard deviation.
Cas, coupled aquaponic system; Das, decoupled aquaponic system.

특히 skilton 품종의 DAS 처리구는 20주차에 11,197 g으로 전체 실험군 중 가장 높은 주차별 수확량을 기록하였으며, 18~20주차 평균값(Mean ± SD) 역시 9,521 ± 1,676 g으로 가장 우수하였다. 반면, xaroma 품종은 19주차 CAS 처리구에서 4,326 g으로 가장 낮은 중량을 보였으나, 20주차에는 7,531 g으로 회복되는 양상을 나타내었다. 실험 기간 중 19주차에는 모든 품종과 처리구에서 일시적으로 잎 중량이 감소하는 경향을 보였으나, 20주차에 다시 최대 성장량에 도달하였다.

품종 전체 데이터를 통합하여 재배 시스템 간 생체량 분포 경향을 비교한 결과([Fig. 4]), DAS 처리구는 CAS 처리구에 비해 중앙값(median) 및 전체 분포 범위에서 지속적으로 높은 생체량을 형성하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 수조 반 복구 부재라는 현장 실증의 통계적 한계(pseudoreplication)로 인해 유의성 검정 수치로 확증할 수는 없으나, 5개 품종 전체 통합 관점에서 도 DAS 시스템이 CAS 시스템보다 식물 생체량 증대에 긍정적인 결과를 직관적으로 보여준다.



[Fig. 4] Aggregate comparison of biomass between CAS and DAS across all evaluated varieties. Each point represents an individual observation, and the central horizontal line indicates the median. CAS, the coupled aquaponic system; DAS, decoupled aquaponic system.

IV. 결 론

본 연구는 냉수성 어종인 무지개송어를 기반으로 구축한 아쿠아포닉스 실증 시스템에서 연계형(CAS)과 분리형(DAS) 구조가 5종 엽채류의 성장 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 본 연구는 대규모 현장 실증 시설 특성상 수조 단위의 반복구를 두지 못해 통계학적 한계를 지니고 있으나, 기술통계적 모니터링 결과 모든 품종에서 DAS 처리구가 CAS 처리구보다 우수한 잎 생체량 형성 경향을 나타내었으며, 전체 품종 통합 분포에서도 DAS의 생체량 우위 경향이 명확히 관찰되었다.

기존의 CAS 시스템은 어류 사육부와 식물 재배부가 하나의 순환 경로를 공유하는 구조로, 어류와 식물의 상이한 생리적 요구 조건 사이에서 적절한 균형점을 설정해야 하는 한계가 존재한다(Rakocy et al., 2006). 반면 DAS 시스템은 어류와 식물의 재배 환경을 독립적으로 제어할 수 있기

때문에 각각의 생물에 적합한 환경 조건을 유지할 수 있다(Goddek et al., 2016; Goddek et al., 2019). Kloas et al.(2015)은 DAS 시스템이 환경적 지속가능성과 생산성을 동시에 향상시킬 수 있다고 보고하였으며, 본 연구 결과 역시 이러한 선행 연구와 유사한 경향을 나타내었다.

본 연구에서 DAS 식물 재배부의 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)와 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$)은 실험 종료 시 각각 25.0 mg/L와 11.6 mg/L 수준까지 지속적으로 증가하였다. 반면 CAS에서는 상대적으로 낮은 수준을 유지하였다. 질산성 질소는 엽채류 성장 과정에서 단백질 합성과 엽록소 형성에 직접적인 영향을 미치는 주요 영양원으로 알려져 있으며, 인 역시 세포 분열과 에너지 대사에 중요한 역할을 수행한다. 따라서 DAS 처리구에서 관찰된 높은 영양염 축적은 식물 생체량 증가에 직접적으로 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

또한 DAS 식물 재배부에서는 실험 후반부 전기전도도(EC)가 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상으로 증가하였으며, 이는 용존 영양염 농도의 축적을 의미한다. Lee and Kim(2021) 및 Lee et al.(2020)은 아쿠아포닉스 환경에서 영양염 농도와 EC 수준이 엽채류 생산성에 영향을 미친다고 보고하였다. 본 연구에서도 DAS 시스템의 상대적으로 높은 EC 수준이 식물의 양분 흡수 효율 증가와 생체량 향상에 기여하였을 가능성이 높다.

한편 실험 기간 중 19주차에서 모든 품종의 잎 중량이 일시적으로 감소하였다가 20주차에 다시 증가하는 경향이 나타났다. 이는 숙아내기 수확 과정에서 식물체 밀도 감소에 따라 개체 간 광경쟁 및 양분 경쟁이 완화되면서 나타난 보상성 성장(compensatory growth) 현상으로 판단된다. Suzuki and Sakamoto(2015)는 환경 조건 변화가 상추류 성장에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였으며, 본 연구에서도 유사한 경향이 관찰되었다.

품종별로는 skilton과 izabel 품종이 비교적 높은 생산성을 나타냈으며, 특히 skilton 품종의 DAS 처리구는 20주차에 11,197 g으로 전체 실험

군 중 가장 높은 수확량을 나타내었다. 이는 품종별 유전적 특성 및 영양 이용 효율 차이에 의한 결과로 판단된다. Lee et al.(2019b), Lee(2021), Lee(2022a)에서도 업체류 품종 간 생산성 차이가 존재한다고 보고한 바 있어 본 연구 결과와 일치하였다.

다만 본 연구에서는 DAS 처리구가 CAS 처리구보다 사료 공급량이 높은 조건에서 운영되었다. DAS 처리구는 어체중 대비 1.0%, CAS 처리구는 0.5% 수준으로 급이되어, 결과적으로 DAS 처리구 내 영양염 공급량이 증가하였다. Rakocy et al.(2006)은 사료 투입량이 아쿠아포닉스 시스템 내 영양 공급의 핵심 요인이라고 보고하였으며, 본 연구에서도 DAS의 향상된 생산성 일부는 높은 영양 유입량의 영향일 가능성을 배제하기 어렵다.

종합적으로, 본 연구는 통계적 유의검정의 제한점에도 불구하고 실제 현장 규모에서 DAS 시스템이 무지개송어 양식 배출수를 활용한 업체류 생산성 향상에 유용한 구조적 모델임을 입증한 실용적 기초자료로서 의미를 가진다. 향후 수조 반복구가 확보된 정밀 시설에서의 검증 및 무기질 이용률, 경제성 평가 등에 대한 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

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

Emerenciano MGC, Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M and Miranda-Baeza A(2017). Biofloc 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.

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(2024). Korean Statistical Information Service. Statistics by type of fishery, breed and fishing method for 2006-2023 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(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>.
- Lee DH(2022). 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.2022.2.34.5.750>.
- Lee DH(2023). Comparative study on growth of leafy vegetables reared in the different culture systems between coupled aquaponics and decoupled aquaponics. JFMSE 35(5), 951~964.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2023.10.35.5.951>.
- Mariscal-Lagarda MM, Pérez-Osuna F, Esquer-Méndez JL, Guerrero-Monroy I, Vivar AR and Félix-Gastelum R(2012). Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: management and production. Aquaculture 366, 76~84.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.09.003>.
- Oh JM and Paek JY(2024). An economic analysis of rainbow trout aquaculture with the introduction of IBK recirculating aquaculture system. JFMSE 36(5), 911~920.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2024.10.36.5.911>.
- Rakocy JE, Masser MP and Losordo TM(2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Retrieved from
http://www.gem-stone.umd.edu/team-sites/classof2014/mega/documents/Rakocy_RAS.PDF on May 16, 2018.
- Rijn J(2013). Waste treatment in recirculation aquaculture systems. Aquac Eng 53, 49~56.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>.
- 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>.

-
- Received : 07 July, 2026
 - Revised : 05 August, 2026
 - Accepted : 12 August, 2026