



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy

Study on Freshwater Aquaculture and Aquaponics

Applied with Biofloc Technology (BFT)

바이오플락 양식기술(BFT)을 이용한 담수어류

양식 및 아쿠아포닉스 적용 연구



by Jun Seong Park

Department of Fisheries Biology

The Graduate School

Pukyong National University

August 2022

Study on Freshwater Aquaculture and Aquaponics
Applied with Biofloc Technology (BFT)

바이오플락 양식기술(BFT)을 이용한 담수어류
양식 및 아쿠아포닉스 적용 연구

Advisor: Jeonghwan Park



by

Jun Seong Park

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Doctor of Philosophy

in Department of Fisheries Biology, Graduate School

Pukyong National University

August 2022

박준성의 이학박사 학위논문을 인준함.

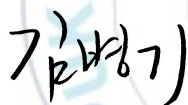
2022년 8월 26일

위 원 장	이학박사	김 병 기 (인)
위 원	이학박사	이 승 형 (인)
위 원	이학박사	김 찬 희 (인)
위 원	이학박사	김 형 수 (인)
위 원	이학박사	박 정 환 (인)

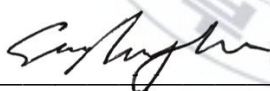
Study on Freshwater Aquaculture and Aquaponics Applied with Biofloc Technology (BFT)

A dissertation
by
Jun Seong Park

Approved by:



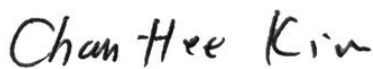
(Chairman) Pyong-Kih Kim



(Member) Seunghyung Lee



(Member) Hyeongsu Kim



(Member) Chan-Hee Kim



(Member) Jeonghwan Park

August 26, 2022

목 차

List of Figures	vi
List of Tables	ix
Abstract	xii
I . Introduction	1
II . Materials and Methods	16
1. BFT 양식시스템 내 수질환경 및 사육효율 개선효과	16
1.1. 내수면 양식대상종의 BFT 적용에 따른 수질환경 요인 분석 ...	16
1.1.1. BFT 사육수 제조에 따른 수질변화 및 미생물 군집분석 ...	16
1.1.2. C/N 비에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석	18
1.1.2.1. 메기(<i>Silurus asotus</i>)	18
1.1.2.2. 뱀장어(<i>Anguilla japonica</i>)	20
1.1.2.3. 향어(<i>Cyprinus carpio</i>)	23
1.1.2.4. BFT 사육수 NGS 분석	24
1.1.3. 어종에 따른 급성독성(TAN, NO ₂ -N) 및 안전농도	25
1.1.3.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	25
1.1.3.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	27

1.1.3.3. 향어(<i>C. carpio</i>)	28
1.2 BFT 사육관리 요인에 따른 성장 및 특징	29
1.2.1. 사육수온에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석	29
1.2.1.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	29
1.2.1.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	31
1.2.1.3. 향어(<i>C. carpio</i>)	32
1.2.1.4. BFT 사육수 NGS 분석	33
1.2.2. 사육밀도에 따른 BFT 적용 어류의 성장비교	34
1.2.2.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	34
1.2.2.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	35
1.2.2.3. 향어(<i>C. carpio</i>)	36
1.2.3. TSS 제거에 따른 성장비교	37
1.2.4. 고밀도 사육을 위한 BFT 적용 및 양식장과의 비교	39
2. BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템 적용 분석	41
2.1. NFT를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장 및 사육수 수질분석	41
2.1.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	41
2.1.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	44
2.1.3. 수질분석	46
2.2. DWC를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장, 사육수 수질 및 성분 분석	47
2.2.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	47
2.2.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	48

2.2.3. 미꾸리(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	49
2.2.4. 작물의 밀도(재식량)에 따른 사육어의 성장도 분석	52
2.2.5. 사육수 성분 분석 및 수질 분석	53
III. Results	54
1. BFT 양식시스템 내 수질환경 및 사육효율 개선효과	54
1.1. 내수면 양식대상종의 BFT 적용에 따른 수질환경 요인 분석 ...	54
1.1.1. BFT 사육수 제조에 따른 수질변화 및 미생물 군집분석 ...	54
1.1.2. C/N 비에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석	57
1.1.2.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	57
1.1.2.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	59
1.1.2.3. 향어(<i>C. carpio</i>)	61
1.1.2.4. BFT 사육수 NGS 분석	63
1.1.3. 어종에 따른 급성독성(TAN, NO ₂ -N) 및 안전농도	68
1.1.3.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	68
1.1.3.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	76
1.1.3.3. 향어(<i>C. carpio</i>)	84
1.1.3.4. 안전농도	92
1.2 BFT 사육관리 요인에 따른 성장 및 특징	94
1.2.1. 사육수온에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석	94
1.2.1.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	94
1.2.1.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	97
1.2.1.3. 향어(<i>C. carpio</i>)	100

1.2.1.4. BFT 사육수 NGS 분석	103
1.2.2. 사육밀도에 따른 BFT 적용 어류의 성장비교	109
1.2.2.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	109
1.2.2.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	112
1.2.2.3. 향어(<i>C. carpio</i>)	115
1.2.3. TSS 제거에 따른 성장비교	118
1.2.4. 고밀도 사육을 위한 BFT 적용 및 양식장과의 비교	121
2. BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템 적용 분석	123
2.1. NFT를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장 및 사육수 수질분석	123
2.1.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	123
2.1.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	125
2.1.3. 수질분석	128
2.2. DWC를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장, 사육수 수질 및 성분 분석	132
2.2.1. 메기(<i>S. asotus</i>)	132
2.2.2. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)	135
2.2.3. 미꾸리(<i>M. anguillicaudatus</i>)	138
2.2.4. 작물의 밀도(재식량)에 따른 사육어의 성장도 분석	141
2.2.5. 사육수 성분 분석 및 수질 분석	142
2.2.5.1. 메기(<i>S. asotus</i>)의 사육수 성분분석	142
2.2.5.2. 메기(<i>S. asotus</i>)의 사육수 수질변화	144
2.2.5.3. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)의 사육수 성분분석	146
2.2.5.4. 뱀장어(<i>A. japonica</i>)의 사육수 수질변화	148

2.2.5.5. 미꾸리(<i>M. anguillicaudatus</i>)의 사육수 수질변화	150
IV. Discussion	152
1. BFT 양식시스템 내 수질환경 및 사육효율 개선효과	152
1.1. 내수면 양식대상종의 BFT 적용에 따른 수질환경 요인 분석 ...	152
1.2 BFT 사육관리 요인에 따른 성장 및 특징	154
2. BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템 적용 분석	158
V. Conclusion	163
VI. References	164
Acknowledgement	179



List of Figures

I. Introduction

Fig. 1.1. The pathway of biofloc aquaculture system.....	3
Fig. 1.2. Biofloc aquaculture systems in aquaculture of global status.....	6
Fig. 1.3. Dendrogram of aquaponics	11
Fig. 1.4. Plants bed and nutrient film technique (NFT) aquaponics based on BFT... 12	
Fig. 1.5. Plants bed and deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT... 13	
Fig. 1.6. Dendrogram of experimental procedures of freshwater aquaculture and aquaponics applied with BFT.....	15

II. Materials and Methods

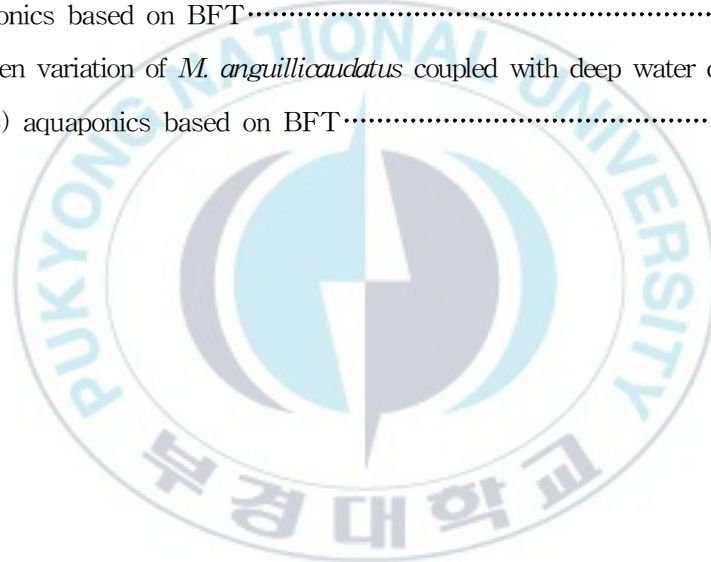
Fig. 2.1. Experimental tank of acute toxicity with water bath system.....	26
Fig. 2.2. Experimental breeding tank installed with temperature controller.....	30
Fig. 2.3. Experimental tank of BFT and BFT with TSS removal filter	38
Fig. 2.4. The experimental BFT fish tank in advanced aquaculture center, Changwon -si, Gyeongsangnam-do Province, Korea and a commercial fish farm in Wanju-si, Jeollabuk-do Province, Korea	40
Fig. 2.5. Nutrient film technique (NFT) aquaponics experimental fish tank installed	

with plants bed.....	43
Fig. 2.6. Deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT and BFT breeding tank ...	51

III. Results

Fig. 3.1. The BFT inoculatingg water during 30 days.....	55
Fig. 3.2. Microorganism of <i>S. asotus</i> based on BFT according to C/N ratio.....	64
Fig. 3.3. Microorganism of <i>A. japonica</i> based on BFT according to C/N ratio.....	65
Fig. 3.4. Survival rate of <i>S. asotus</i> in response to total ammonia nitrogen concentration.....	69
Fig. 3.5. Survival rate of <i>S. asotus</i> in response to NO ₂ -N concentration.....	73
Fig. 3.6. Survival rate of <i>A. japonica</i> in response to total ammonia nitrogen concentration.....	77
Fig. 3.7. Survival rate of <i>A. japonica</i> in response to NO ₂ -N concentration.....	81
Fig. 3.8. Survival rate of <i>C. carpio</i> in response to total ammonia nitrogen concentration.....	85
Fig. 3.9. Survival rate of <i>C. carpio</i> in response to NO ₂ -N concentration.....	89
Fig. 3.10. Species diversity of microorganisms in BFT inoculate water and breeding water.....	104
Fig. 3.11. Analysis of microoorganisms in BFT breeding water according to different temperature and <i>S. asotus</i> and <i>A. japonica</i>).....	106
Fig. 3.12. Anjalysis of 3D PCoA of BFT breeding water.....	108
Fig. 3.13. TSS concentration of <i>C. carpio</i> in BFT and BFT with TSS removal filter for 4 weeks.....	119
Fig. 3.14. Caipira lettuce (<i>Lactuca sativa</i>) harvest of <i>S. asotus</i> coupled with nutrient	

film technique (NFT) aquaponics based on BFT.....	124
Fig. 3.15. Nitrogen variation of <i>S. asotus</i> coupled with nutrient film technique (NFT) aquaponics.....	129
Fig. 3.16. Nitrogen variation of <i>A. japonica</i> coupled with nutrient film technique (NFT) aquaponics based on BFT.....	131
Fig. 3.17. Nitrogen variation of <i>S. asotus</i> coupled with deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT.....	145
Fig. 3.18. Nitrogen variation of <i>A. japonica</i> coupled with deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT.....	149
Fig. 3.19. Nitrogen variation of <i>M. anguillicaudatus</i> coupled with deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT.....	151



List of Tables

Table 1. Contents of feed.....	17
Table 2. Adding molasses by C/N ratio.....	22
Table 3. Total bacterial colonies (CFU/mL) of BFT inoculating water according to temperature for 4 weeks.....	56
Table 4. The growth performance of <i>Silurus asotus</i> based on BFT according to C/N ratio for 4 weeks.....	58
Table 5. The growth performance of <i>Anguilla japonica</i> based on BFT according to C/N ratio for 4 weeks.....	60
Table 6. The growth performance of <i>Cyprinus carpio</i> based on BFT according to C/N ratio for 4 weeks.....	62
Table 7. Total bacterial colonies (CFU/ml) of <i>S. asotus</i> BFT breeding water according to C/N ratio for 4 weeks.....	66
Table 8. Total bacterial colonies (CFU/ml) of <i>A. japonica</i> BFT breeding water according to C/N ratio for 4 weeks.....	67
Table 9. LC ₁₀ , LC ₅₀ and LC ₉₀ values according to total ammonia nitrogen concentrations (mg/L) of <i>S. asotus</i> (96 h).....	71
Table 10. LC ₁₀ , LC ₅₀ and LC ₉₀ values according to NO ₂ -N concentrations (mg/L) of <i>S. asotus</i> (96 h).....	75
Table 11. LC ₁₀ , LC ₅₀ and LC ₉₀ values according to total ammonia nitrogen concentrations (mg/L) of <i>Anguilla japonica</i> (96 h)	79
Table 12. LC ₁₀ , LC ₅₀ and LC ₉₀ values according to NO ₂ -N concentrations (mg/L) of <i>A. japonica</i> (96 h)	83
Table 13. LC ₁₀ , LC ₅₀ and LC ₉₀ values according to total ammonia nitrogen concentrations (mg/L) of <i>C. carpio</i> (96 h).....	87

Table 14. LC ₁₀ , LC ₅₀ and LC ₉₀ values according to NO ₂ -N concentrations (mg/L) of <i>C. carpio</i> (96 h).....	91
Table 15. Safety concentrations (mg/L) of <i>S. asotus</i> , <i>A. japonica</i> and <i>C. carpio</i> (96 h).....	93
Table 16. The growth performance of <i>S. asotus</i> according to different temperature on BFT for 4 weeks.....	95
Table 17. Water quality measurements of <i>S. asotus</i> according to different temperature on BFT for 4 weeks.....	96
Table 18. The growth performance of <i>A. japonica</i> according to different temperature on BFT for 4 weeks.....	98
Table 19. Water quality measurements of <i>A. japonica</i> according to different temperature on BFT for 4 weeks.....	99
Table 20. The growth performance of <i>C. carpio</i> according to different temperature on BFT for 4 weeks.....	101
Table 21. Water quality measurements of <i>C. carpio</i> according to different temperature on BFT for 4 weeks.....	102
Table 22. The growth performance of <i>S. asotus</i> according to different density on BFT for 4 weeks.....	110
Table 23. Water quality measurements of <i>S. asotus</i> according to different density on BFT for 4 weeks.....	111
Table 24. The growth performance of <i>A. japonica</i> according to different density on BFT for 4 weeks.....	113
Table 25. Water quality measurements of <i>A. japonica</i> according to different density on BFT for 4 weeks.....	114
Table 26. The growth performance of <i>C. carpio</i> according to different density on BFT for 4 weeks.....	116
Table 27. Water quality measurements of <i>C. carpio</i> according to different density on BFT for 4 weeks.....	117

Table 28. The growth performance of <i>C. carpio</i> in BFT installed with TSS removal filter for 4 weeks.....	120
Table 29. Comparisons of the growth performances of BFT and fish farm (<i>S. asotus</i> and <i>C. carpio</i>) for 4 weeks.....	122
Table 30. The growth performances of <i>S. asotus</i> and <i>A. japonica</i> coupled with 2 different (BFT, Control) nutrient film technique (NFT) aquaponics system for 4 weeks.....	126
Table 31. The growth of Caipira lettuce (<i>L. sativa</i>) coupled with 3 different nutrient film technique (NFT) aquaponics systems (Control-AP, BFT-AP, Hydroponics) for 4 weeks.....	127
Table 32. The growth performance of <i>S. asotus</i> in BFT (Control) and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems for 4 weeks.....	133
Table 33. The growth of Caipira lettuce (<i>L. sativa</i>) in Hydroponics and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems with <i>S. asotus</i> for 4 weeks.....	134
Table 34. The growth performance of <i>A. japonica</i> in BFT (Control) and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems for 4 weeks.....	136
Table 35. The growth of Caipira lettuce (<i>L. sativa</i>) in Hydroponics and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems by <i>A. japonica</i> for 4 weeks.....	137
Table 36. The growth performance of <i>M. anguillicaudatus</i> in Sham-control (fresh water) BFT and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems for 4 weeks.....	139
Table 37. The growth of Caipira lettuce (<i>L. sativa</i>) in Hydroponics and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems by <i>M. anguillicaudatus</i> for 4 weeks.....	140
Table 38. Mineral components of <i>S. asotus</i> BFT breeding water.....	143
Table 39. Mineral components of <i>A. japonica</i> BFT breeding water.....	147

Abstract

In this study, eco-friendly methods of aquaculture, biofloc technology (BFT) aquaculture system was conducted for growth and water quality improvements on catfish (*Silurus asotus*), eel (*Anguilla japonica*) and carp (*Cyprinus carpio*). In the first experiment, to evaluate growth performance of 3 kinds of fishes, different C/N ratio, temperature and density were conducted for 3 kinds of fishes. The results of different C/N ratio on BFT showed weight gain rate (WGR) of 15:1 (catfish : $140.9 \pm 5.56\%$, Eel : $146.1 \pm 10.22\%$ and Carp : $45.5 \pm 7.12\%$) and 20:1 (Catfish : $123.4 \pm 6.32\%$, Eel : $116.9 \pm 17.44\%$ and Carp : $53.2 \pm 3.33\%$) were adequate for catfish, eel and carp in BFT aquaculture system. The results of different temperature on BFT, catfish (WGR : $106.8 \pm 5.18\%$) and eel (WGR : $30.8 \pm 2.29\%$) showed 30°C was adequate and Eel but BFT carp showed 24°C (WGR : $53.1 \pm 1.17\%$) and 26°C (WGR : $49.5 \pm 2.08\%$). The results of different density on BFT, catfish (WGR : $164.4 \pm 5.02\%$) and carp (WGR : $92.7 \pm 3.12\%$) showed 0.5 kg/m² was adequate and eel (WGR : $134.2 \pm 4.17\%$) showed 1 kg/m² was adequate. Nitrogen components (Total ammonia nitrogen, NO₂-N) of all experiments were stable. Next generation sequencing analysis showed proteobacteria and bacteroidetes were dominate in C/N 15 and C/N 20 of catfish and eel BFT breeding water. The results of acute toxicity experiment of catfish, eel and carp showed, the TAN safety

concentration of catfish were 9.2 mg/L (pH 6), 6.3 mg/L (pH 7) and 4.2 mg/L (pH 8). Eel were 33.2 mg/L (pH 6), 23.5 mg/L (pH 7) and 16.7 mg/L (pH 8). Carp were 6.7 mg/L (pH 6), 4.8 mg/L (pH 7) and 4.4 mg/L (pH 8). NO₂-N safety concentration of carfish were 15.1 mg/L (pH 6), 68.5 mg/L (pH 7) and 247 mg/L (pH 8). Eel were 18.8 mg/L (pH 6), 29.6 mg/L (pH 7) and 71.1 mg/L (pH 8). Carp were 6.9 mg/L (pH 6), 9 mg/L (pH 7) and 10.5 mg/L (pH 8). NFT (Nutrient film technique) aquaponics coupled with BFT showed WGR of catfish BFT-AP was 98.4±0.63% and WGR of eel BFT-AP was 78.3±2.51%. In catfish BFT-AP (NFT) shoot weight of caipira lettuce (*Lactuca sativa*) was 121.9±6.25 g, in hydroponics was 120.5±0.18 g and in control (running water; 3 rotations/day) was 75.5±4.18 g. In eel BFT-AP (NFT) shoot weight of caipira lettuce (*Lactuca sativa*) was 124.1±8.21 g, in hydroponics was 120.5±0.18 g and in control (running water; 3 rotations/day) was 79.2±6.12 g. DWC (Deep water culture) aquaponics of different plants (100 individuals, 200 individuals) density coupled with BFT showed WGR of catfish BFT-AP 200 was 142.6±5.55% and WGR of eel BFT-AP 200 was 178.4±5.06%. In catfish BFT-AP 200 (DWC) shoot weight was 143±45.7 g, in eel BFT-AP 200 (DWC) shoot weight was 190±32.5 g. NO₃-N of NFT and DWC aquaponics coupled with BFT was decreased during the experiment. The survival rate of BFT-AP(DWC) weather loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) was 91.6±2.55%. The components of BFT-AP catfish breeding water showed N was 58.26 mg/L, Ca was 17.23 mg/L, Fe was 0.10 mg/L, Zn was 0.41 mg/L, Cu was 0.11 mg/L, Si was 13.17 mg/L,

Ca was 63.35 mg/L, K was 34.25 mg/L, Mg was 10.15 mg/L and Cl was 50.90 mg/L. The components of BFT-AP eel breeding water showed N was 26.68 mg/L, P was 6.81 mg/L, Na was 99.77 mg/L, Fe was 0.13 mg/L, Zn was 0.16 mg/L, Si was 13.31 mg/L, Ca was 37.48 mg/L, K was 0.33 mg/L, Mg was 9.41 mg/L, Cl was 27.18 mg/L.

Therefore, in this study, the results indicated that freshwater aquaculture and aquaponics applied with BFT could be a new eco-friendly aquaculture in future.



Abstract

이번 연구에서는 친환경 양식의 방법 중 하나인 바이오플락 양식기술(BFT)을 이용하여 담수어류양식 및 아쿠아포닉스 적용에 따른 적용 어류의 성장 및 수질개선효과에 관한 연구를 위해 메기(*Silurus asotus*), 뱀장어(*Anguilla japonica*), 향어(*Cyprinus carpio*)를 대상으로 C/N 비, 수온, 밀도에 따라 사육실험을 진행했다. 실험종료 후 성장도와 수질, 그리고 바이오플락 사육수 내 미생물 특성을 알아보기 위해 NGS 분석을 실시하였으며, 효과적인 어종별 사육을 위해 총 암모니아성 질소 및 아질산성 질소에 따른 급성독성실험을 진행하였다. 또한, 바이오플락 양식기술(BFT) 기반의 아쿠아포닉스 적용을 통해 메기, 뱀장어 및 미꾸리의 성장도와 수질개선효과 및 사육수 성분분석을 진행하였다. C/N 비에 따른 실험결과, 메기의 증체율(Weight gain rate)은 C/N 20:1에서 $140.9 \pm 5.56\%$, 15:1에서 $123.4 \pm 6.32\%$ 로 나타났으며, 뱀장어에서는 경우, C/N 20:1에서 $146.1 \pm 10.22\%$, 15:1에서 $116.9 \pm 17.44\%$ 로 나타났다. 향어는 C/N 20:1에서 $53.2 \pm 3.33\%$, 15:1에서 $45.5 \pm 7.12\%$ 로 나타나 모두 15:1~20:1의 조건에서 사육 시 개선된 효과가 나타났다. 수온에 따른 실험결과 메기는 증체율이 30℃에서 $106.8 \pm 5.18\%$, 25℃에서 $91.6 \pm 0.13\%$, 20℃에서 $69.9 \pm 2.18\%$ 로 나타났다. 뱀장어에서는 30℃에서 $30.8 \pm 2.29\%$, 25℃에서 $29.3 \pm 4.48\%$, 20℃에서 $25.0 \pm 3.33\%$ 로 나타났다. 향어는 24℃에서 $53.1 \pm 1.17\%$, 26℃에서 $49.5 \pm 2.08\%$ 로 나타났다. 밀도에 따른 실험결과, 메기는 밀도가 가장 낮은 실험구인 0.5 kg/m^2 에서 증체율이 $164.4 \pm 5.02\%$ 로 성장률이 가장 높게 나타

낮으며, 뱀장어의 경우, 1 kg/m²에서 증체율이 134.2±4.17%로 가장 높게 나타났다. 향어는 0.5 kg/m²에서 증체율이 92.7±3.12%로 가장 높게 나타났다. 수질의 경우 모든 실험구에서 낮은 수치로 안전하게 유지되었으며, 질병이나 기생충으로 인한 폐사는 나타나지 않았다. 이후 미생물 분석결과, 메기와 뱀장어 사육수에서 C/N비에 따른 미생물 다양성 및 시간(0, 2, 4 주)에 따른 미생물 다양성의 NGS 분석 결과 두 사육수 모두 Proteobacteria와 Bacteroidetes 문이 우세로 나타났으며, 메기 사육수의 경우, Verrucomicrobia, Planctomycetes, Actinobacteria, Acidobacteria, Firmicutes의 상대풍부도(Relative abundance, R.A)가 증가하였으며, C/N 비 15:1, 20:1에서 우세한 모습을 나타냈다. 뱀장어 사육수에서는 Chlamydiae 문의 상대풍부도는 감소한 반면 Planctomycete와 Firmicutes 문의 상대풍부도는 증가하였으며, C/N 비 15:1에서 가장 우세한 모습을 나타냈으며, 온도에 따른 미생물 다양성 및 시간(0, 2, 4)주에 따른 미생물 다양성의 NGS 분석 결과 메기 사육수의 경우 온도가 높아질수록 Fusobacteria의 총량이 높아졌다. 뱀장어 사육수의 경우 온도가 높아질수록 Proteobacteria의 총량은 줄고, Firmicutes의 총량은 높아지는 경향이 나타났다. pH에 따른 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소의 독성에 대한 안전 농도는 총 암모니아성 질소 메기는 pH 6에서 9.2 mg/L, pH 7에서 6.3 mg/L, pH 8에서 4.2 mg/L로 나타났으며, 뱀장어는 pH 6에서 33.2 mg/L, pH 7에서 23.5 mg/L, pH 8에서 16.7 mg/L로 나타났고, 향어는 pH 6에서 6.7 mg/L, pH 7에서 4.8 mg/L, pH 8에서 4.4 mg/L로 나타났다. 아질산성 질소 메기는 pH 6에서 15.1 mg/L, pH 7에서 68.5 mg/L, pH 8에서 247 mg/L로 나타났으며, 뱀장어는 pH 6에서 18.8 mg/L, pH 7에서 29.6 mg/L, pH 8에서 71.1 mg/L로 나타났고, 향어는 pH 6에서 6.9 mg/L, pH 7에서 9 mg/L, pH 8에서 10.5 mg/L로 나타났다.

바이오플락 양식기술(BFT)을 이용한 아쿠아포닉스 적용에 관한 실험결과 박막필름식(NFT) 아쿠아포닉스 적용 시 메기의 경우, BFT-AP에서 증체율이 $98.4 \pm 0.63\%$ 로 나타났으며, 대조구에서는 $50.4 \pm 4.70\%$ 로 나타났다. 뱀장어의 경우, BFT에서 증체율이 $78.3 \pm 2.51\%$ 로 나타났으며, 대조구에서는 $62.3 \pm 4.94\%$ 로 나타났다. 또한 메기를 적용한 식물의 성장의 경우, 뿌리를 제외한 상층부 무게(Shoot weight)는 BFT-AP에서 121.9 ± 6.25 g, 수경재배에서 120.5 ± 0.18 g, 대조구에서 75.5 ± 4.18 g로 나타났다. 뱀장어의 경우 BFT-AP에서 124.1 ± 8.21 g, 수경재배에서 122.6 ± 3.13 g, 대조구에서 79.2 ± 6.12 g로 나타났다. 수질은 메기와 뱀장어 모두 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)가 감소하는 모습이 나타났다. 담액식(DWC) 아쿠아포닉스 적용 시 식물의 밀도에 따라 100, 200 포기를 적용하여 사육을 진행한 결과, 메기의 증체율은 BFT-AP 200에서 $147.3 \pm 6.17\%$ 로 가장 좋게 나타났으며, BFT-AP 100에서 $142.6 \pm 5.55\%$, 대조구(BFT)에서 $137.1 \pm 4.25\%$ 로 나타났다. 뱀장어의 경우, BFT-AP 200에서 증체율이 $178.4 \pm 5.06\%$ 로 가장 좋게 나타났으며, BFT-AP 100에서 $136.2 \pm 1.35\%$, 대조구(BFT)에서 $100.8 \pm 2.48\%$ 로 나타났다. 또한 메기를 적용한 식물의 성장의 경우, 뿌리를 제외한 상층부 무게(Shoot weight)는 BFT-AP 200에서 143 ± 45.7 g, 수경재배에서 138 ± 32.6 g, BFT-AP 100에서 136 ± 15.5 g로 나타났으며, 뱀장어의 경우 BFT-AP 200에서 190 ± 32.5 g, 수경재배에서 178 ± 35.7 g, BFT-AP 100에서 168 ± 30.8 g로 나타났다. 수질은 두 어종 모두 질산성 질소가 감소하는 경향이 나타났다. 미꾸리의 경우 BFT-AP의 증체율과 생존율은 $51.1 \pm 3.65\%$, $91.6 \pm 2.55\%$ 로 나타났으며, BFT에서는 $24.0 \pm 4.24\%$, $82.1 \pm 11.12\%$, 대조구(직수)에서 -15.7 ± 1.41 , $66.8 \pm 2.78\%$ 로 BFT 기반의 아쿠아포닉스 및 BFT에서 대조구보다 개선된 효과가 나타났다. BFT 기반의 아쿠아포닉스 사육수 분석 결과, 메기의 경우, N은 58.26 mg/L, P는 17.23 mg/L, Na는 83.95

mg/L, Fe는 0.10 mg/L, Zn은 0.41 mg/L, Cu는 0.11 mg/L, Si는 13.17 mg/L, Ca는 63.35 mg/L, K는 34.25 mg/L, Mg는 10.15 mg/L, Cl은 50.90 mg/L로 나타났다. 대부분의 성분은 양액에서 높은 값이 나타났지만, BFT-AP에서는 Mn이 검출되지 않았으나, Zn, Cu는 미량으로 존재하는 것으로 나타났으며, Na, Cl은 양액보다 높은 값이 나타났고, 뱀장어의 경우, N은 26.68 mg/L, P는 6.81 mg/L, Na는 99.77 mg/L, Fe는 0.13 mg/L, Zn은 0.16 mg/L, Si는 13.31 mg/L, Ca는 37.48 mg/L, K는 0.33 mg/L, Mg는 9.41 mg/L, Cl은 27.18 mg/L로 나타났다. 실험결과, BFT를 이용한 담수어류 양식 및 아쿠아포닉스 적용 시 새로운 친환경 양식방법으로서의 적용이 가능할 것이다.



I. Introduction

수산양식은 일정한 구역이나 시설을 독점적으로 소유하면서 그곳에서 양식자가 선택한 유용 수중 생물의 생활과 환경을 잘 관리하여 그생물의 번식과 성장을 꾀하면서 자원조성 및 상품용으로 수산동물 뿐 아니라, 식물, 해조류 등의 생물을 키워내는 방법이다(Boyd et al., 1979). 수산 양식 방법은 해조류, 부착 및 포복동물, 유영 동물의 대상 생물에 따라 차이점이 있다. 이 중 유영 동물의 양식방법은 자연상태이거나 인공적으로 만든 공간에서 유영 동물을 키우는 방법이며 크게 지수식, 유수식, 순환여과식, 가두리식 양식으로 구분할 수 있다. 그러나 최근 양식산업이 발달하고 양식장의 수가 늘어나면서 최근 여러가지 문제가 발생하고 있다. 가두리 양식은 태풍과 적조와 같은 자연재해에 취약하며, 지수식과 유수식 양식은 사육수를 조달하는 데 있어 많은 비용이 소모되는 단점이 있다. 이러한 환경에 영향을 받는 양식방법은 주변 수역의 수질 악화와 양식장 내 자가오염 등으로 등으로 질병이 빈번히 발생할 우려가 있고 생산성이 감소하고 있다. 또한, 양식장 설치에 의한 환경파괴와 탈출 개체의 생태계 교란으로 인한 토착종들의 서식지감소, 근친 교배에 의한 열성화 등도 중요한 문제로 대두되고 있다(Longo et al., 2019). 양식장에서 발생하는 항생제, 오물 등이 포함된 배출수 등 역시 양식산업의 지속가능성에 위협을 주고 있다.

이에 따라 소비자들의 안전한 먹거리 확보를 위해 친환경적이고 지속가능한 양식방법의 접근이 필요한 실정이다(Tacon et al., 2015). 최근 친환경 양식에 대한 중요성이 증가함에 따라 주변환경과 사육환경이 분리된 폐쇄

형 양식방법인 순환여과양식(Recirculation Aquaculture System, RAS)과 바이오플락 양식기술(Biofloc Technology, BFT)에 대한 관심이 많아지고 있다. 이러한 친환경 양식방법은 배출수와 외부 영향을 최소화할 수 있어 환경을 보호하면서도 질병의 유입을 근원적으로 차단할 수 있다(Qiao et al., 2018). 또한 폐쇄형 양식 방법으로서 적정 수온을 유지하기 위한 에너지를 절감할 수 있고, 사육 기간을 단축함으로써 사료효율성을 높일 수 있는 장점도 있다. 대표적인 두 친환경 양식 방법 중 RAS는 상대적으로 높은 사육 밀도를 유지할 수 있으나 시설비가 비싸고 기계의 결함 및 오류의 발생 가능성이 있다(Rijn, 1996). 또한 여과조 등 부대 시설을 설치하기 위해 여분의 부지가 필요하며, 부대 시설에 대한 물리·기계적 측면에서 높은 수준의 운영 기술이 필요하다(Blancheton, 2000). BFT의 경우, 미생물을 이용한 효과적인 수질정화를 위해서는 적절한 탄소원의 공급, 수질환경, 사육생물 간의 상관관계에 대한 높은 수준의 관리 지식이 필요하다(Xu et al., 2016). BFT는 생물의 최대 사육밀도는 RAS에 비해 상대적으로 낮으나 설치 경비가 매우 적고, 시설 설치와 운영이 비교적 용이하다(Hargreaves, 2006).. 이러한 장점으로 BFT는 양식 어민에 대한 기술 수용성이 높다. 다른 여과조, 드럼필터 등의 부속시설이 필요한 RAS와는 다르게 시설비가 저렴하고 적용에 용이하며, 어류생산량이 일반적인 아쿠아포닉스에 비해 높다는 이점이 있다

우리나라는 계절적 영향으로 특정 양식 어종에 대해 연중 적정 성장 수온을 유지할 수 있는 사육 기간이 짧다. 국내 양식장의 대부분은 지수식, 유수식, 가두리식으로 운영되고 있는데 이는 외부 환경 변화에 양식 생산 효율이 매우 민감하게 영향을 받는다는 단점이 있다. 우리나라 내수면 양식 어업은 낮은 생산성, 값이 저렴한 외국산 담수어류의 수입, 정부의 수질 환경 규제 강화에 따른 환경문제 대두 등으로 새로운 성장동력이 필요한

실정이다. 또한 국내 양식시설의 노후화와 소규모 영세 양식장이 대부분 이어서 이로 인한 생산성 저하 및 생산 비용의 상승은 경영 압박의 주요 요인이 되고 있다. 대부분은 지수식 노지 양식 방법을 이용하고 있어 외부 바이러스 및 질병 유입에 쉽게 노출되어 있고 양식장 배출수로 인한 환경 규제가 강화되고 있어 양식장을 운영하는데 많은 제약을 받고 있다.

BFT를 이용한 양식기술은 양식 과정에서 발생하는 배설물이나 사료찌꺼기를 양식장 안에 존재하는 유용 미생물을 이용하여 효율적으로 제거한다. 이를 통해 배출수를 줄일 수 있으며, 기존의 양식방법의 단점을 극복할 수 있다(Fig. 1.1.).

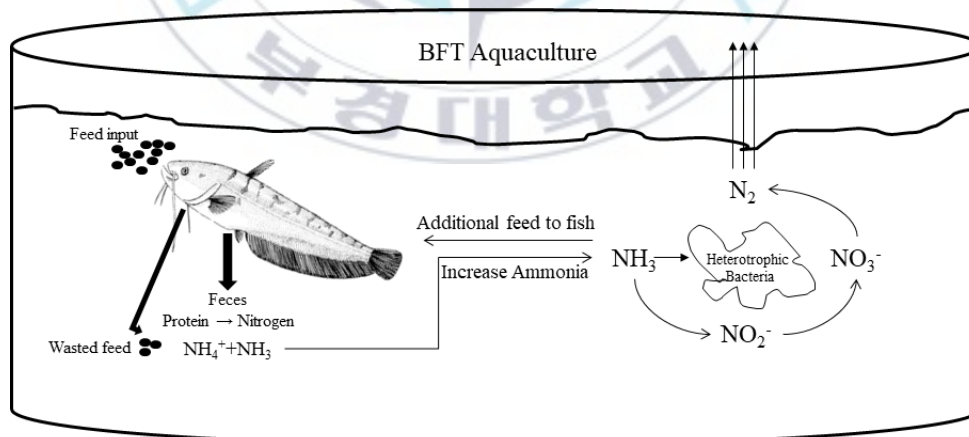


Fig. 1.1. The pathway of biofloc aquaculture system.

BFT는 양식 수조 내에서 당밀, 전분 등의 유기탄소원(Carbon, C)을 공급하여 유용미생이 증식을 하도록 돕는다. 풍부하게 증식한 유용미생물은 양식 생물의 대사 산물인 질소화합물을 효과적 분해하여 사육수를 환수하지 않고 양식생물을 사육할 수 있다(Caipang et al., 2015). 따라서, 성공적인 BFT 운영을 위해서는 상대적으로 높은 수준의 물관리 기술이 필요하다(Hargreaves, 2013; Xu et al., 2016; Ahmad et al., 2017). 이러한 측면에서 BFT는 외부 환경과 독립적으로 운영될 수 있어 폐쇄적인 특징을 가질 수 있다. 이러한 특징으로 BFT는 가온 에너지 절감, 생산원가 절감, 양식장 배출수 저감을 통한 환경오염 저감, 약제 이용 저감, 친환경 수산물 생산이 가능하다(Crab et al., 2012).

BFT는 1990년대 이스라엘에서 틸라피아(*Oreochromis mossambicus*)를 대상으로 시작되었다. 미국, 브라질, 중국, 태국, 말레이시아 등 많은 국가에서 새우류를 대상으로 BFT 양식기술을 개발하고 있다(Day et al., 2016). 세계양식학회에서도 'Biofloc session'을 분리하여 개최하고 있다. 전 세계적으로 많은 국가에서 BFT 연구가 수행되고 있으며 바이오플락을 이용한 다양한 어종들을 대상으로 사육이 진행되고 있다(Vyas, 2020)(Fig. 1.2.). 그럼에도 불구하고 BFT 양식 산업화는 전 세계적으로 갑각류인 흰다리새우(*Litopenaeus vannamei*), 틸라피아(*O. mossambicus*, *O. niloticus*), 아프리카 메기(*Clarias gariepinus*) 등 소수 대상종에 국한되어 있다(Choo and Caipang, 2015). 최근에는 단일어종의 사육시스템 뿐 아니라, 해산새우류와 나일틸라피아 등 여러 종의 통합된(Integrate) 양식시스템 개발도 진행되고 있다(Poli et al., 2019). 그러나 국내 내수면 주요 양식품종에 대해서는 산업화 기술이 개발되지 않아 배출수 저감 및 탄소배출 규제 등의 문제를 해결하기 위해 친환경 BFT 양식적용기술개발에 대한 필요성이 대두되고 있다(Tidwell, 2012).

우리나라에서는 국립수산물과학원 서해수산연구소에서 흰다리새우(*L. vannamei*)의 BFT 양식산업화 기술을 개발하여 민간에 보급하고 있으며, 2017년 기준 전국 약 57여개소의 BFT 양식장이 운영되고 있다(NIFS, 2018). 한편, 내수면 양식품종의 경우, 잉어, 메기, 뱀장어, 미꾸라지, 큰징거미새우 등을 이용한 BFT 양식 기술을 개발하고 있으며, 일부 품종에 대해서는 산업화 가능성이 확인되었다.

바이오플락(Bioflocs)은 식물플랑크톤, 사육생물 배설물, 사료찌꺼기, 원생동물 및 세균성미생물 등이 결합된 미세 유기물로써 미생물총(플락, flocs)이라고도 한다(Avnimelech, 1999). 큰 것은 육안으로 관찰이 가능하지만 대부분은 현미경적 단위로 크기는 수 μm 에서 1 mm까지 다양하다. 각각의 플락은 세균을 포함한 점액 세사형 미생물의 분비물에 의해 직간접적으로 결합되거나 플락 간의 정전기적 인력에 의해 느슨하게 연결된 유기복합체이다. 따라서 BFT 양식기술 이러한 플락을 이루는 미생물이 수질환경을 적절히 유지하고 재섭식 보조 먹이로서 양식생물의 사료효율을 극대화 할 수 있도록 적당한 밀도로 수중에 유지되도록 하는 것이 중요하다(Azim et al., 2008; Perez-Fuentes et al., 2016; Zhao et al., 2010). BFT 양식기술은 충분한 양의 플락이 형성되지 않은 사육 초기에 질소화합물의 농도가 높아지거나 변동 심한 사육환경으로 인해 불안정한 상황이 종종 벌어진다(Ray et al., 2011). 이러한 사육수의 초기 질소화합물의 증가는 양식생물에게 있어서 초기 폐사의 원인이 되며, 초기 폐사를 낮추기 위한 해결방안이 필요하다(Poli et al., 2019, Zaki et al., 2020).

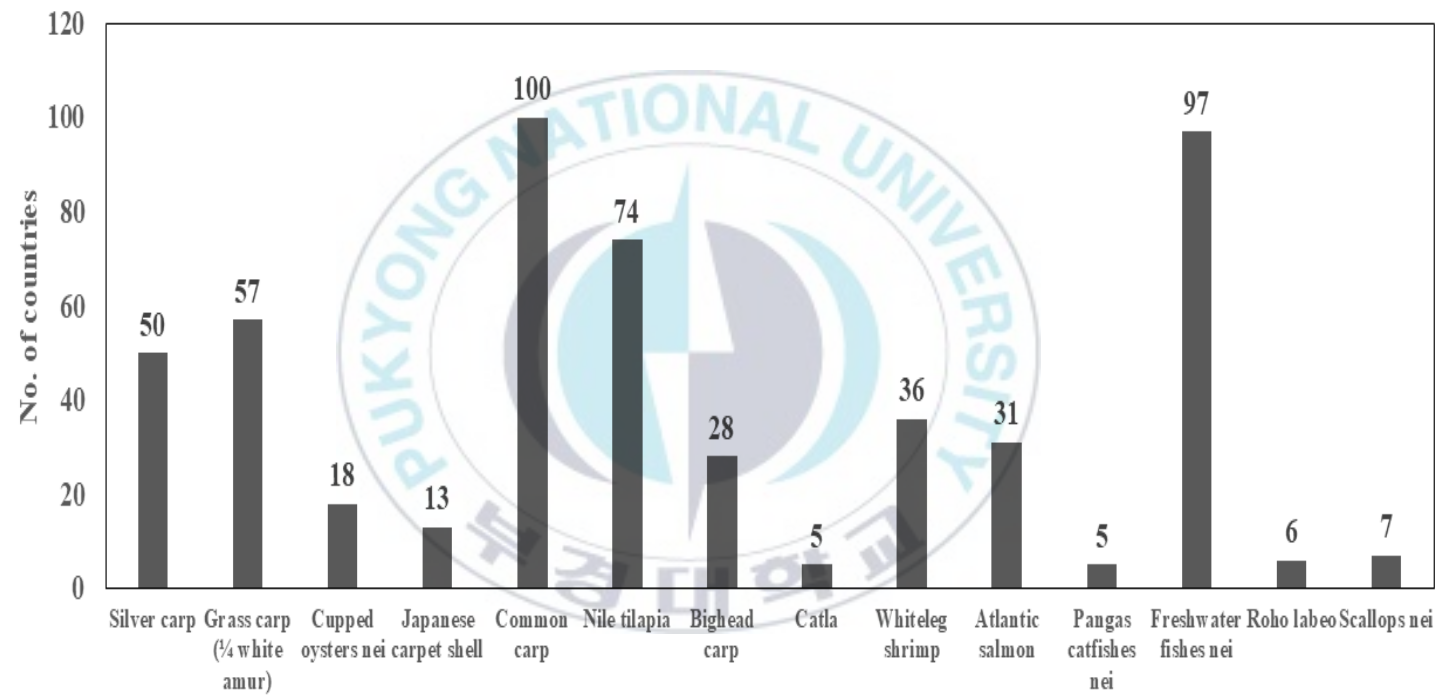


Fig. 1.2. Biofloc aquaculture systems in aquaculture of global status.

어류 양식 시 발생하는 수중 총 암모니아성 질소(Total ammonia nitrogen, TAN)는 이온화된 암모늄(NH_4^+)과 이온화되지 않은 유리 암모니아(NH_3)로 구성된다. 두 형태의 암모니아성 질소는 pH에 따라 구성비율이 달라지는데 pH가 증가 하면 NH_3 비율이 증가하여 독성이 강해진다(Emmerson et al., 1975). 특히 BFT 적용 시 고밀도 사육에 따른 NH_3 농도의 증가는 아가미 상피 세포의 괴사, 가스 교환 저하, 점액 과다분비 등의 문제가 발생하여, 양식 대상종의 성장과 생존에 큰 위험 일으킨다(Thurston et al., 1984). 또한 질산화 과정으로 생성된 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)의 경우 헤모글로빈과 반응하여 혈액의 산소 전달계 기능을 부분적으로 상실시킨다. 이러한 한계치와 안전한 질소화합물의 농도범위를 구하여 BFT 양식에 적용하기 위해서는 암모니아 및 아질산 급성독성에 따른 연구를 통해 양식장 내 사육 지표로서 적용할 시 효과적인 수질관리를 통해 안전한 양식을 통한 높은 생산량이 나타날 것이며, 이는 BFT 뿐 아니라 지수식, 순환여과양식 등의 다른 양식방법에도 적용이 가능할 것이다.

BFT의 효율을 가장 높게 유지하기 위한 핵심 기술은 생성된 플락의 표면적을 높여 암모니아 동화작용이 일어날 수 있도록 수중에서 침전이 되지 않도록 하는 것이다. 또한, 공급하는 사료 내 포함된 질소량 혹은 조단백질(CP, Crude protein %) 함량을 기준으로 추가적인 유기탄소원을 공급함으로써 수중에 적절한 Carbon/Nitrogen 비(C/N ratio)를 유지하며 양식생물에게 알맞은 수질을 유지하는 것이다(Liu et al., 2019).

그러나 C/N 비 도출 및 적용에 있어서 어종, 크기, 나이 및 사육환경에 따라 소화율이 다르기 때문에, 먼저 대상어종에 따른 적절한 C/N비의 구명이 필요하다. 유기탄소원인 클리세롤 기반의 BFT 시스템에서 C/N비의 변화가 바이오플락의 생화학적 조성 및 성장성, 생리학적 특성 및 질병 저항성에 영향을 준다는 연구보고가 있다(Dauda et al., 2018). 이 연구에서는

0~20의 C/N 비 중, C/N 비가 20일 때 다른 실험구에 비해 바이오플락의 부피와 생체량이 유의적으로 가장 높은 값이 나타났다. 이러한 결과는 C/N비의 변화가 사육수 내 플락을 이루는 미생물의 군집구조뿐만 아니라, 나아가 BFT 적용 시스템 내 사육 생물의 장내 미생물의 군집구조에 영향을 줄 수 있다는 것을 시사한다.

차세대 염기서열 분석(Next generation sequencing, NGS) 분석은 모든 유전자의 집합체인 유전체를 무수히 많은 조각으로 나누어 읽은 후, 얻어진 염기서열 조각을 조립하여 전체 유전체의 서열을 분석하는 방법이다. 미생물은 자연 해양 생태계의 필수 구성요소이며, 양식을 포함한 인위적으로 조성된 생태계에서도 중요한 역할을 한다. BFT 사육수의 미생물 군집의 분석은 해산새우류 및 틸라피아류 양식을 통한 분석이 많으며(Silva et al., 2016), BFT를 구성하는 biofloc 내 미생물은 플락의 크기에 따라 미생물의 구성이 다르다(Souza et al., 2019). 유익균의 탐색과 분리균주를 통한 세포외 효소생산 및 유용균주의 탐색으로의 이용을 진행하고 있으며, 적절한 C/N비에 따른 미생물의 분리에 따른 BFT 적용 유용균주의 개발로 사용할 수 있다. 또한 C/N비와 마찬가지로, 어류 장내 미생물의 경우 어종에 따라 다양하게 분포하고 있고, 우점하는 종이 다른 모습을 보여준다. 따라서 어종, 수온 등 사육 특성 및 다른 수질 환경의 적용을 통한 미생물군집의 특성변화의 확인과 이에 따른 적용생물의 성장도에 대한 관계를 밝혀 BFT 적용 시 어종 및 조건에 따른 사육방법을 제공할 수 있다.

아쿠아포닉스(Aquaponics)란 수산양식(Aquaculture)과 수경재배(Hydroponics)를 합친 농수융합 생산시스템이다. 이 시스템은 어류가 배출하는 유기물(배설물 및 사료찌꺼기)을 식물베드를 통해 제거한 후 사육수가 양식 수조로 재순환 되도록 한다(Fig. 1.3.). 식물은 식물베드에 축적된 유기물에서 용출되는 영양염을 흡수하면서 성장하고 정화된 물을 어류양식

에 이용함으로써 어류와 식물을 동시에 생산할 수 있는 양식방법이다 (Diver, 2006, Seginer and Halachmi, 2008). 아쿠아포닉스는 양식 배출수 내 영양염이 식물의 성장에 이용될 수 있어 배출수가 외부환경으로 방출되지 않아 지속가능한 어류와 식물의 생산이 가능하다. 따라서 토지와 물의 사용이 제한적인 곳에서 이용가능하며 생산성과 경제성을 확보하기 용이하다. 그러나 기존의 아쿠아포닉스는 어류의 저밀도 수용으로 발생하는 영양염이 부족한 실정이다. 이로 인해 인공영양분(양액)의 적절한 비율에 따른 투입을 통하여 적절한 영양분의 농도(전기전도도, Electric conductivity, EC)를 인위적으로 만들어 부족한 영양분을 해소하고 있는 실정이다 (Solis-Toapanta et al., 2020). 영양염의 비율이 부적절할 경우, 사육수는 부영양화가 발생하며, 이로 인하여 식물 생육에 장애를 발생시키는 녹조, 남조류 등이 증식한다. 아쿠아포닉스 이용된 양액은 시간이 지남에 따라 영양염의 비율이 달라진다. 이러한 양액은 염체의 성장에 적절하지 못하므로, 시스템 외부로 배출되며, 배출된 폐양액은 환경 오염을 일으키게 된다 (Rajesh and Cho, 2014).

BFT 사육수는 유기탄소원의 투입과 사료의 공급으로 인해 영양염의 농도가 높고 무기물이 풍부하다. 이러한 측면에서 BFT 내 발생하는 영양염은 아쿠아포닉스 내 식물 성장에 필요한 균형잡힌 영양염을 별도의 양액 공급없이 제공할 수 있는 장점이 있다. 또한 BFT 시스템은 과도하게 발생할 수 있는 여분의 플락을 별도의 생물학적/물리학적 여과장치 없이 제거할 수 있다. 이에 기존의 아쿠아포닉스와는 달리 최근에는 BFT를 기반으로 한 아쿠아포닉스에 대한 관심이 커지고 있고 관련 기술이 개발되고 있다. 미생물의 활성도를 높이기 위한 유기탄소원의 공급은 사육수 내 식물이 이용가능한 무기물 및 미량원소들이 존재하게 한다. BFT 기반의 아쿠아포닉스의 구조는 일반 아쿠아포닉스와 마찬가지로 어류를 사육하는 생물

사육조와 대상 작물을 재배할 수 있는 식물재배베드의 두가지로 구성된다. 아쿠아포닉스는 식물재배베드의 모습에 따라 박막필름식(NFT, Nutrient film technique)과 담액식(DWC, Deep water culture)로 나뉜다. NFT의 구조는 수평의 파이프를 이용하는 수경재배 방법이다. 각 파이프에 물이 흐르도록 어류사육조에서 이동한 사육수가 마치 막(film)의 형태로 식물베드에 주입된다. 주입된 사육수는 식물의 뿌리를 거친 뒤 다시 어류사육조로 이동하는 구조로 다층형 재배가 가능하다(Fig. 1.4.). DWC의 구조는 어류사육조에서 이동한 사육수가 뿌리가 잠기는 수준의 식물재배베드에 주입된다. 주입된 사육수는 식물재배베드를 거쳐 다시 어류사육조로 이동하는 구조이다. NFT와 물의 흐름은 같으나, 물량이 많아 온도유지, 갑작스런 수질 변화에 대해 NFT에 비해 대응이 쉽다(Fig. 1.5.).

전 세계적으로 아쿠아포닉스를 이용한 엽채류, 과채류, 관상용 식물등 다양한 고부가 식물을 이용한 재배실험이 진행되고 있다, BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 시 어류와 식물 각각의 성장에 따른 상관관계와 BFT 기반의 아쿠아포닉스 사육수 내 무기성분을 안정적으로 식물이 흡수할 수 있는 효과에 대한 연구가 필요하다.

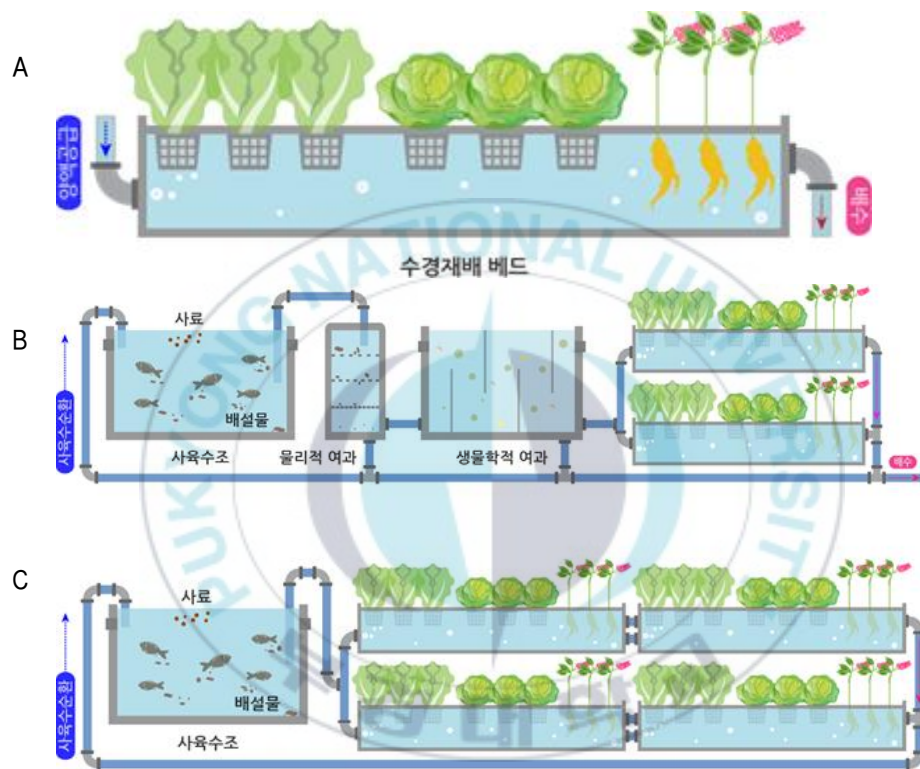


Fig. 1.3. Dendrogram of aquaponics (A: hydroponics, B: aquaponics, C: aquaponics based on BFT).



Fig. 1.4. Plants bed (above) and nutrient film technique (NFT) aquaponics based on BFT (below).



Fig. 1.5. Plants bed (above) and deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT.

이번 연구에서는 BFT 현장 적용시 양식어가의 소득증대와 국내 내수면 양식산업의 대외경쟁력 강화를 위해 내수면양식어종을 대상으로 담수를 이용한 BFT 양식 기술에 관한 연구를 진행하였다. 먼저, BFT 적용 시 초기 폐사문제를 해결하기 위해 안정된 사육수를 만들어 사육실험에 이용하였다. BFT 적용 시 수질환경과 사육효율의 개선을 위해 어종에 따른 C/N비, 미생물 군집을 분석하였으며, 어종 별 효과적인 양식이 가능하도록 급성독성 및 안전농도를 구명하였다. 이후 BFT 적용 시 사육관리 요인의 적절한 조건의 구명을 위해 수온, 밀도별 사육실험을 진행하였다. 추가적으로 사육시 증가하는 총 부유성 고형물(TSS)의 제거에 따른 사육효율을 평가하였고 상업 양식장과의 성장 정도를 비교 하였다. 또한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용시 대상어종의 성장 및 수질개선효과를 확인하기 위해 어종별 적용실험을 실시하였다. 실험 종료 후 사육수 내 미량원소(성분)분석을 진행하여 BFT 기반의 아쿠아포닉스 사육수의 성분 분석을 통해 무기물 및 영양분의 함유량을 도출하였다. 본 연구 결과를 토대로 BFT 양식기술의 산업화 및 BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템 적용을 통하여 친환경 먹거리 생산을 위한 자료 제공을 하고자 한다.

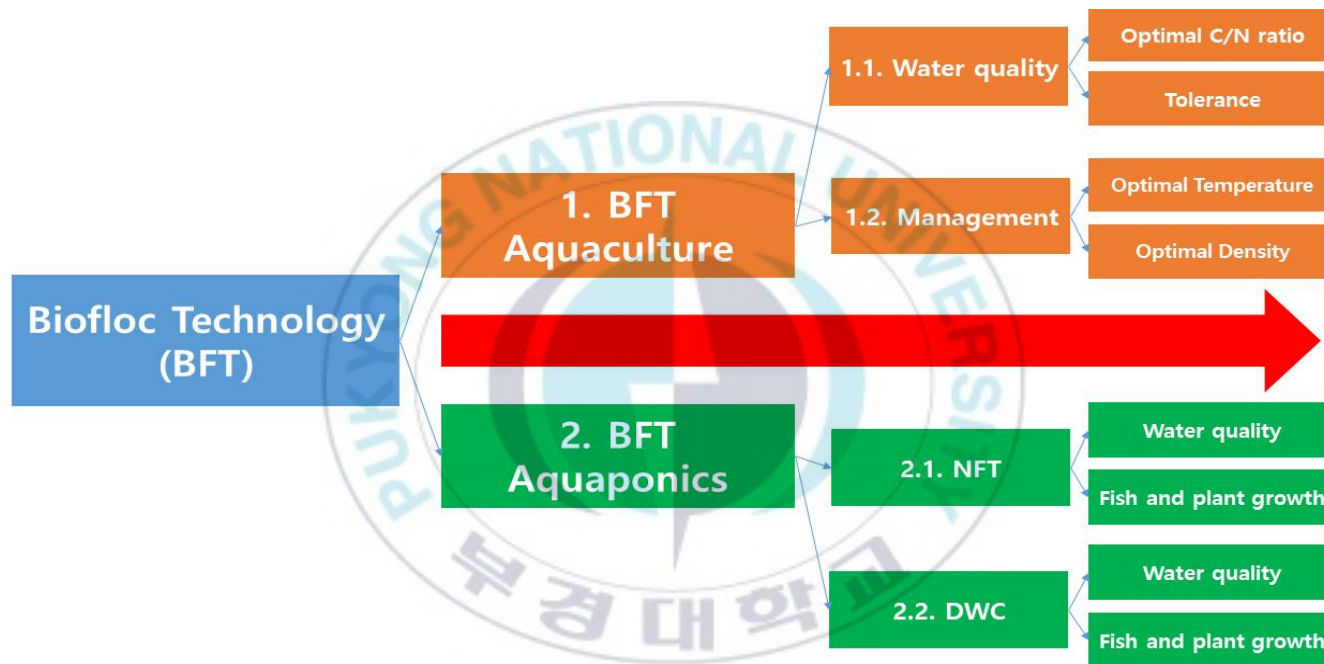


Fig. 1.6. Dendrogram of experimental procedures of freshwater aquaculture and aquaponics applied with BFT.

II. Materials and Methods

1. BFT 양식시스템 내 수질환경 및 사육효율 개선효과

1.1. 내수면 양식대상종의 BFT 적용에 따른 수질환경 요인 분석

1.1.1. BFT 사육수 제조에 따른 수질변화 및 미생물 군집분석

안정적인 BFT 사육수를 만들기 위해 1 TON ($\varnothing$ 1.3 m $\times$ h 0.8 m) FRP(Fiber reinforced plastics) 원형수조에 0.5 μ m-micro filter로 여과된 지하수를 이용하여 Avnimelech (1999)와 장 등(2014)의 계산식에 따라 탄소원을 이용하여 당밀(evermiracle, 한국) 1 L와 질소원인 (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호 사료를 1 kg을 투입하였다(Table 1). 바이오플락의 구성균인 BFT 전용 생균제(BFT-ST, EgeeTech, Ltd, USA)를 사용법에 따라 30 mg/L 접종하였으며, 수온에 따라 20℃, 25℃, 30℃의 온도를 설정하여 3반복 BFT 물만들기 실험을 진행하였다. 일정한 용존산소 및 수온을 유지하기 위하여 산소 발생시스템(금호마린, 대한민국)과 냉, 가온 일체형 자동온조 조절기(1 kw, DH-1000 ACW, 동화전자, 대한민국)을 이용하였다. 또한 플락의 침전을 방지하기 위해 수중펌프(60 W, CT-50, 필그린) 설치 및 에어스톤을 설치하였으며, 분당 1회전 순환하도록 설정하였다. 질소원으로 (주)대한 고효율담수어(조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하였으며, 총 4주간 사육수 배양을 진행하였다. 실험기간동안 0, 2, 4주간 사육수를 샘플링 하여 NA(일반균)배지, MRS(유산균)배지, R2A(용수시험) 배지에 접종 후 총균수를 측정하였으며, 이후 모든 사육실험은 BFT 배양수를 모두 물만들기를 통하여 공급하였다.

Table 1. Contents of feed

Nutrient	%
Moisture	14.0
Crude protein	43.0
Crude lipid	8.0
Crude fiber	5.0
Crude ash	15.0
Ca	1.0
P	2.7
Others (Vitamins, Minerals)	11.3

1.1.2. C/N 비에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석

1.1.2.1. 메기(*Silurus asotus*)

C/N 비에 따른 BFT 적용 어류의 성장도 개선효과 및 미생물 다양성과 군집을 확인하기 위해 내수면 주요 양식대상종인 메기(*Silurus asotus*) 치어 100마리(총 1.28 kg, 12.1 ± 1.06 g)를 200 L (W 80 cm × L 80 cm, × H 80 cm) FRP 사각수조에 입식하였으며 C/N 비에 따라 10:1, 15:1, 20:1, 25:1, 30:1 5구간을 설정하였으며, 사육수 내 독성(TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$)증가로 인한 폐사, 먹이반응 감소를 방지하기 위해 대조구(Sham-control)는 3 rotation/day로 직수가 순환되도록 하였다. 대조구 포함 총 6개의 실험구를 나누어 사육수조에 수용하여 3반복 사육실험을 수행하였으며, (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하여 어체중의 5%의 사료를 매일 공급하였다(Table 1.2). 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. C/N 비는 Avnimelech (1999)와 장 등(2014)의 방법에 따라 공급된 사료에 따른 당밀 추가량을 다음과 같은 계산방법을 이용하여 투입하며 4주간 사육실험을 진행하였다(Table 2.2). 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 매일 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)은 총 암모니아성 질소(Total ammonia nitrogen, TAN), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, $\text{NO}_2\text{-N}$)를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 분석하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였으며, 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석

(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다. C/N비는 다음과 같은 공식을 이용하여 계산하였다.

[Formula of C and N calculation]

C in Carbon source (Molasses) = 50%

N in feed = feed (kg) $\times$ CP (%) $\times$ 0.155 (N in CP)

[Formula of adding molasses according to C/N ratio]

고효율 담수어 사료(3호) CP 43%

사료 내 질소량 :

$$0.065 \text{ (kg)} \times 0.43 \text{ (CP in feed)} \times 0.155 \text{ (N in CP)} = 0.004 \text{ kg}$$

어류의 사료소화율은 약 80% 이므로 20%가 배설된다.

$$\begin{aligned} \text{Feed in C/N} &: 0.065 \text{ (kg)} \times 0.5 / 0.004 \text{ (kg) (N)} \\ &= 8.125 \end{aligned}$$

$\therefore$ 추가유기탄소량의 경우 소화율 80%을 감안하여 100%기준으로 계산 후 1/5로 나누어 준다.

8.125:1 $\rightarrow$ 10:1, 15:1, 20:1, 25:1, 30:1 의 C/N 비율에 따라 매일 다음과 같은 량의 당밀을 추가하거나, 한 주간 공급된 사료공급량에 따라 당밀을 투입한다.

1.1.2.2. 뱀장어(*Anguilla japonica*)

C/N 비에 따른 BFT 적용 어류의 성장도 개선효과 및 미생물 다양성과 군집을 확인하기 위해 내수면 주요 양식대상종인 뱀장어(*A. japonica*) 치어 75마리(총 1.28 kg, 18.3 ± 4.38 g)를 200 L (W 80 cm × L 80 cm, × H 80 cm) FRP 사각수조에 입식하였으며 C/N 비에 따라 C/N 비에 따라 10:1, 15:1, 20:1, 25:1, 30:1 5구간을 설정하였으며, 사육수 내 독성(TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$)증가로 인한 폐사, 먹이반응 감소를 방지하기 위해 대조구(Sham-control)는 3 rotation/day로 직수가 순환되도록 하였다. 대조구 포함 총 6개의 실험구를 나누어 사육수조에 수용하여 3반복 사육실험을 수행하였으며, (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하여 사육수에 공급하였다(Table 2). 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. 어체중의 5%의 사료를 매일 공급하였다. C/N 비는 Avnimelech (1999)와 장 등(2014)의 방법에 따라 공급된 사료에 따른 당밀추가량을 다음과 같은 계산방법을 이용하여 투입하며 4주간 사육실험을 진행하였다(Table 1.2). 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 매일 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)은 총 암모니아성 질소(Total ammonia nitrogen, TAN), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, $\text{NO}_2\text{-N}$)를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 분석하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였으며, 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해

Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.



Table 2. Adding molasses by C/N ratio (*Silurus asotus* and *Anguilla japonica*).

C/N ratio	molasses/day
C/N 10:1	7.5 g/day
C/N 15:1	27.5 g/day
C/N 20:1	47.5 g/day
C/N 25:1	67.5 g/day
C/N 30:1	87.5 g/day

1.1.2.3. 향어(*Cyprinus carpio*)

C/N 비에 따른 BFT 적용 어류의 성장도 개선효과를 확인하기 위해 내수면 주요 양식대상종인 향어(*Cyprinus carpio*) 치어(총 2.25 kg, 21.4 ± 3.81 g)를 500 L ($\varnothing$ 92 cm $\times$ H 90 cm) PP (Polypropylene) 원형수조에 입식하였으며, C/N 비에 따라 10:1, 15:1, 20:1, 25:1, 30:1 5구간을 설정하였으며, 사육수 내 독성(TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$)증가로 인한 폐사, 먹이반응 감소를 방지하기 위해 대조구(Sham-control)는 3 rotation/day로 직수가 순환되도록 하였다. 대조구 포함 총 6개의 실험구를 나누어 사육수조에 수용하여 3반복 사육실험을 수행하였으며, (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하여 어체중의 3%의 사료를 매일 공급하였다. 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. C/N 비는 Avnimelech (1999)와 장 등(2014)의 방법에 따라 공급된 사료에 따른 당밀추가량을 다음과 같은 계산방법을 이용하여 투입하며 4주간 사육실험을 진행하였다(Table 2.3). 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650 Inc, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 매일 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)은 총 암모니아성 질소(Total ammonia nitrogen, TAN), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, $\text{NO}_2\text{-N}$)를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 분석하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였으며, 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다.

1.1.2.4. BFT 사육수 NGS 분석

C/N 비에 따른 BFT 사육수와 BFT 적용 메기 및 뱀장어의 미생물 군집과 총 균수를 구명하기 위해, 실험 시작 및 종료 시 사육수 3반복 샘플을 하였으며, 차세대 염기서열 분석(Next generation sequencing, NGS)을 이용하였다. 미생물 총 균수(CFU/ml)를 분석하기 위해 Genomic DNA kit (Qia gen, USA)를 사용하여 미생물 DNA를 추출하였으며, 추출된 genomic DNA를 주형으로 16S rDNA amplicon을 확보하기 위해 V1-V3 영역의 27 F (5'-ATCGTACGACGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3')과 518 R (5'-ATCGTACGACWTTACCGCGGCTGCTGG-3') Universal primers를 사용하여 중합효소 연쇄 반응(Polymerase chain reaction, PCR)을 진행하였다. 이 후 C/N비에 따른 종 조성 및 총 균수(CFU/ml)를 비교분석 하였다.

1.1.3. 어종에 따른 급성독성(TAN, NO₂-N) 및 안전농도

1.1.3.1. 메기(*S. asotus*)

효과적인 BFT 적용 어류의 질소화합물에 따른 독성에 대한 내성과 안전농도(LC₅₀×0.1) (Sprague, 1971) 도출을 위하여 내수면 양식대상종인 메기의 총 암모니아성 질소(Total ammonium nitrogen, TAN) 및 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N) 노출에 따른 급성 독성 실험을 진행하였다. 아크릴 원형수조(Ø 35 cm × H 35 cm) 54개를 이용하여 수조마다 어체중 18±7.8 g의 메기 50마리를 실험에 이용하였다(Fig. 2.1.). pH는 3 구간(6, 7, 8)을 설정하였으며, 다항목 수질측정기(YSI-650 Inc, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하였다. 초기 실험수의 pH값은 7.12로 측정되었으며, pH 구간 설정을 위해 pH 8은 중조(NaHCO₃), pH 7, 6은 황산(H₂SO₄)을 투입하며 매일 8시간 간격으로 수질측정을 통하여 보정하였다. TAN의 농도는 NH₄Cl 시약을 투입하여 0, 20, 40, 60, 80, 100 mg/L, NO₂-N의 농도는 NaNO₂ 시약을 투입하여 0, 50, 100, 150, 200, 250 mg/L를 설정하였다. Tomasso (1994)의 선행 독성실험을 적용하여 96 시간 동안 3반복 실험을 통해 LC (Lethal concentration)₁₀, LC₅₀, LC₉₀ 및 폐사율을 분석하였다. 실험기간 동안 먹이는 공급하지 않았다.



Fig. 2.1. Experimental tank of acute toxicity with water bath system.

1.1.3.2. 뱀장어(*A. japonica*)

효과적인 BFT 적용 어류의 질소화합물에 따른 독성에 대한 내성과 안전 농도($LC_{50} \times 0.1$) (Sprague, 1971) 도출을 위하여 내수면 양식대상종인 뱀장어의 총 암모니아성 질소(Total ammonium nitrogen, TAN) 및 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO_2-N) 노출에 따른 급성 독성 실험을 진행하였다. 아크릴 원형수조($\varnothing$ 35 cm $\times$ H 35 cm) 54개를 이용하여 수조마다 어체중 13 ± 3.5 g의 뱀장어 50마리를 실험에 이용하였다(Fig. 2.4.). pH는 3 구간(6, 7, 8)을 설정하였으며, 다항목 수질측정기(YSI-650 Inc, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하였다. 초기 실험수의 pH값은 7.12로 측정되었으며, pH 구간 설정을 위해 pH 8은 중조($NaHCO_3$), pH 7, 6은 황산(H_2SO_4)을 투입하며 매일 8시간 간격으로 수질측정을 통하여 보정하였다. 뱀장어의 경우 독성에 대한 내성이 강하기 때문에 TAN 농도는 NH_4Cl 시약을 투입하여 0, 100, 200, 300, 400, 500 mg/L, NO_2-N 의 농도는 $NaNO_2$ 시약을 투입하여 0, 100, 200, 300, 400, 500 mg/L를 설정하였다. Tomasso (1994)의 선행 독성실험을 적용하여 96 시간 동안 3반복 실험을 통해 LC (Lethal concentration)₁₀, LC_{50} , LC_{90} 및 폐사율을 분석하였다. 실험기간 동안 먹이는 공급하지 않았다.

1.1.3.3. 향어(*C. carpio*)

효과적인 BFT 적용 어류의 질소화합물에 따른 독성에 대한 내성과 안전 농도($LC_{50} \times 0.1$) (Sprague, 1971) 도출을 위하여 내수면 양식대상종인 향어의 총 암모니아성 질소(Total ammonium nitrogen, TAN) 및 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO_2-N) 노출에 따른 급성 독성 실험을 진행하였다. 아크릴 원형수조($\varnothing$ 35 cm $\times$ H 35 cm) 54개를 이용하여 수조마다 어체중 11 ± 4.6 g의 향어 50마리를 실험에 이용하였다(Fig. 2.4.). pH는 3 구간(6, 7, 8)을 설정하였으며, 다항목 수질측정기(YSI-650 Inc, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하였다. 초기 실험수의 pH값은 7.12로 측정되었으며, pH 구간 설정을 위해 pH 8은 중조($NaHCO_3$), pH 7, 6은 황산(H_2SO_4)을 투입하며 매일 8시간 간격으로 수질측정을 통하여 보정하였다. TAN 농도는 NH_4Cl 시약을 투입하여 0, 20, 40, 60, 80, 100 mg/L, NO_2-N 의 농도는 $NaNO_2$ 시약을 투입하여 0, 50, 100, 150, 200, 250 mg/L를 설정하였다. Tomasso (1994)의 선행 독성실험을 적용하여 96 시간 동안 3반복 실험을 통해 LC (Lethal concentration)₁₀, LC_{50} , LC_{90} 및 폐사율을 분석하였다. 실험기간 동안 먹이는 공급하지 않았다.

1.2. BFT 사육관리 요인에 따른 성장 및 특징

1.2.1. 사육수온에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석

1.2.1.1. 메기(*S. asotus*)

BFT 사육수의 수온에 따른 어류의 성장도 개선효과 와 미생물 다양성과 군집을 확인하기 위해 1.5 Ton($\varnothing$ 1.8 m, H 80 cm) FRP 원형수조를 이용하여 주요 양식대상종인 메기(어체중 66.5 ± 4.28 g)을 이용하였으며, 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. 수온은 20, 25, 30℃ 3구간을 설정하여 5 kg/m²의 밀도(총 12.7 kg)을 입식한 후 사육수조에 수용하여 (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 매일 체중의 5% 공급하였으며, 사료공급 이후 당밀을 추가하며 C/N비 15~20:1를 유지하며 3반복 사육실험을 수행하였다.

실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였다. 실험기간 동안 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료 공급 전에 측정하였다. 또한 사육수온의 조절을 위하여 온도조절기(대한, 대한민국)를 설치하여 사육온도를 유지하였다(Fig. 2.2.). 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N)를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다.



Fig. 2.2. Experimental breeding tank (above) installed with temperature controller (below).

1.2.1.2. 뱀장어(*A. japonica*)

BFT 사육수의 수온에 따른 어류의 성장도 개선효과 와 미생물 다양성과 군집을 확인하기 위해 1.5 Ton($\varnothing$ 1.8 m, H 80 cm) FRP 원형수조를 이용하여 주요 양식대상종인 뱀장어(어체중 104 ± 6.3 g)를 이용하였으며, 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. 수온은 20, 25, 30℃ 3구간을 설정하여 5 kg/m²의 밀도(총 12.70 kg)을 입식한 후 사육수조에 수용하여 (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 매일 체중의 5% 공급하였으며, C/N 비는 15:1 ~ 20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 수행하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였다. 실험기간 동안 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료공급 전에 측정하였다. 또한 사육수온의 조절을 위하여 온도조절기(대한, 대한민국)를 설치하여 사육온도를 유지하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N)를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다.

1.2.1.3. 향어(*C. carpio*)

BFT 사육수의 수온에 따른 어류의 성장도 개선효과 와 미생물 다양성과 군집을 확인하기 위해 500 L ($\varnothing$ 92 cm $\times$ H 90 cm) PP 원형수조를 이용하여 주요 양식대상종인 향어(어체중 5.5 ± 0.49 g)를 이용하였으며, 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. 수온은 20, 22, 24, 26, 28, 30℃ 6구간을 설정하여 수조당 2 kg을 사육수조에 수용하여 (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 2호를 매일 체중의 3% 공급하였으며, C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 수행하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였다. 실험 기간 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료 공급 전에 측정하였다. 또한 사육수온의 조절을 위하여 온도조절기(대한, 대한민국)를 설치하여 사육온도를 유지하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, $\text{NO}_2\text{-N}$)를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다.

1.2.1.4. 사육수온에 따른 BFT 사육수의 NGS 분석

사육수온에 따른 BFT 사육수와 BFT 적용 메기 및 뱀장어의 미생물 군집과 총 균수(CFU/ml)를 구명하기 위해, 실험 시작 및 종료 시 사육수 3 반복 샘플을 통하여 차세대 염기서열 분석(Next generation sequencing, NGS)을 이용하였다. 미생물 총 균수(CFU/ml)를 분석하기 위해 Genomic DNA kit (Qiagen, USA)를 사용하여 미생물 DNA를 추출하였으며, 추출된 genomic DNA를 주형으로 16S rDNA amplicon을 확보하기 위해 V1-V3 영역의 27 F (5'-ATCGTACGACGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3')과 518 R (5'-ATCGTACGACWTTACCGCGGCTGCTGG-3') Universal primers를 사용하여 증합효소 연쇄 반응(Polymerase chain reaction, PCR)을 진행하였다. 이 후 사육수온에 따른 종 조성 및 총 균수(CFU/ml)를 비교분석하였다.

1.2.2. 사육밀도에 따른 BFT 적용 어류의 성장비교

1.2.2.1. 메기(*S. asotus*)

BFT 적용 어류의 밀도(kg/m²)에 따른 성장도를 구명하기 위해 내수면 양식 대상종인 메기 (어체중 8.3±0.28 g)를 이용하여 1.5 TON (Ø 1.8 m × 높이 0.9 m) PP 원형수조를 이용하여 사육밀도 0.5 kg/m², 1 kg/m², 5 kg/m², 10 kg/m², 20 kg/m² 5개의 밀도 실험구를 설정하여 사육실험을 진행하였다. (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 2호를 체중의 5%를 공급하며 C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 수행하였다. 일정한 용존 산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존 산소를 공급하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였다. 실험기간 동안 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료 공급 전에 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N)을 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.

1.2.2.2. 뱀장어(*A. japonica*)

BFT 적용 어류의 밀도(kg/m²)에 따른 성장도를 구명하기 위해 내수면 양식 대상종인 뱀장어(어체중 8.1±4.48 g)를 이용하여 500 L (Ø 92 cm × h 90 cm) PP 원형수조를 이용하여 사육밀도 1 kg/m², 3 kg/m², 5 kg/m² 3개의 밀도 실험구를 설정하여 사육실험을 진행하였다. (주)대한 고효율담수 어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조 섬유 5%, 조회분 15%) 2호를 체중의 5%를 공급하며 C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 수행하였다. 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였다. 실험기간 동안 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료 공급 전에 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N)를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.

1.2.2.3. 향어(*C. carpio*)

BFT 적용 어류의 밀도(kg/m²)에 따른 성장도를 구명하기 위해 내수면 양식 대상종인 향어(어체중 8.7±1.12 g)를 이용하여 1.5 TON (Ø 1.8 m × 높이 0.9 m) PP 원형수조를 이용하여 사육밀도 0.5 kg/m², 1 kg/m², 5 kg/m², 10 kg/m², 20 kg/m² 5개의 밀도 실험구를 설정하여 사육실험을 진행하였다. (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 2호를 체중의 5%를 공급하며 C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 수행하였다. 일정한 용존 산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존 산소를 공급하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였다. 실험기간 동안 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료 공급 전에 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N)을 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.

1.2.3. TSS 제거에 따른 성장효과

BFT 사육수 내 총 부유 물질(Total suspended solids, TSS) 제거에 따른 성장비교를 위해 1 TON ($\varnothing$ 1.3 m $\times$ H 0.8 m) PP 원형수조에 향어 200 마리 (어체중 9.1 ± 0.22 g)을 실험에 이용하였다. TSS 제거 필터는 L 20 $\times$ W20 $\times$ H 35 cm의 플라스틱 통 안에 10 ppi 폴리나젤 스펀지 필터를 이용하였으며, 필터는 실험기간 동안 매일 2회 세척을 하여 필터막힘현상으로 인한 제거장치의 물 넘침현상(Overflow)을 최소화 시켰다(Fig. 2.3.). 수온은 사육온도에 따른 결과값에 따라 25°C 전후로 적용하였다. (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 체중의 3%를 공급하였으며, 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였고, TSS 제거 필터가 설치된 실험구와 일반 BFT 실험구(대조구)를 설정하여 C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 매일 사료공급 이후 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 진행하였다. 실험 종료 후, 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였다. 실험 기간 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료공급 전에 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산성 질소($\text{NO}_2 - \text{N}$) 2가지를 측정하였으며, 실험기간 동안 매일 오전 사료공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 t -test를 이용하여 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다.

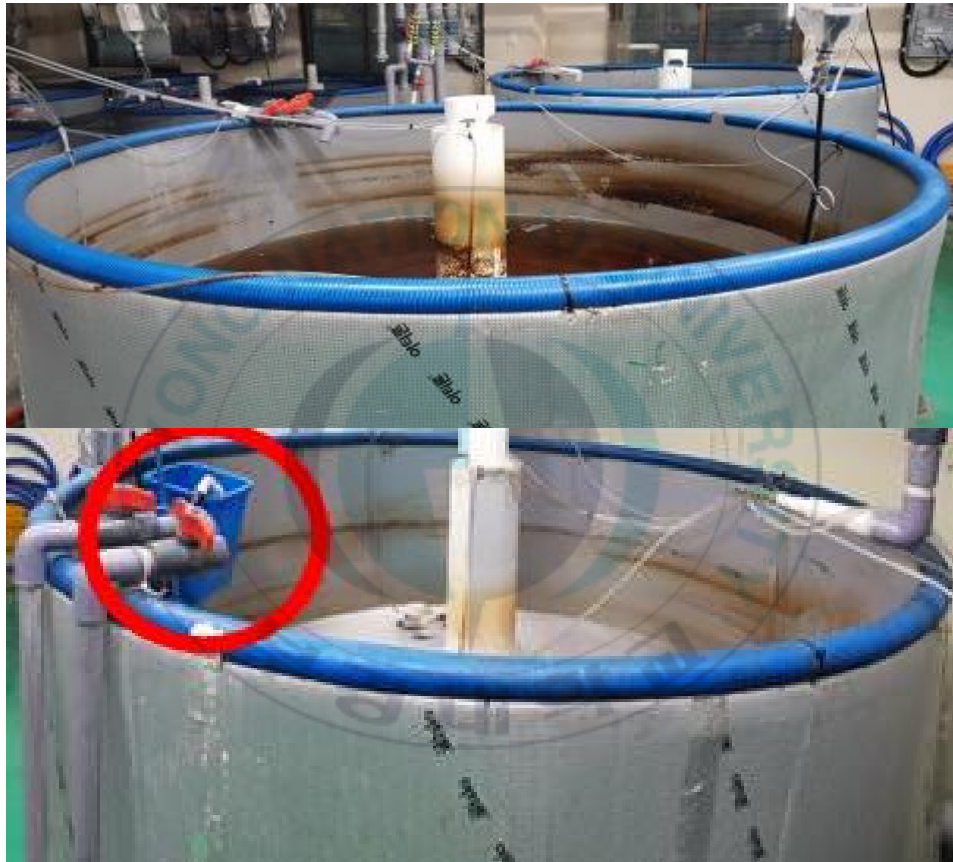


Fig. 2.3. Experimental tank of BFT (above) and BFT with TSS removal filter (red circle) (below).

1.2.4. 고밀도 사육을 위한 BFT 적용 및 양식장과의 비교

BFT 적용 어류의 고밀도 양식을 위해 향어와 메기를 일반 양식장과 같은 크기의 개체를 이용하여 10 TON ($\varnothing$ 3.6 m $\times$ H 0.8 m) 원형 BFT 수조에 향어(28.5 ± 0.23 g) 약 2,700마리(총 77.9 kg), 메기(8.3 ± 2.24 g) 약 10,000마리(총 95 kg)를 수용한 후 30일간 (주)대한 고효율담수어(사료지대: 조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 체중의 5%의 먹이를 공급하여 3반복 실험을 수행하였으며, 일정한 용존산소를 유지하기 위해서 산소발생기(금호마린, 대한민국)를 이용하여 용존산소를 공급하였다. 실험 종료 후, 전라북도 완주시 소재의 양식장의 사육결과를 이용하여 성장도, 사료계수 등을 비교분석하였으며, 통계학적 분석은 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 *t*-test를 이용하여 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다(Fig. 2.4.).



Fig. 2.4. The experimental BFT fish tank in advanced aquaculture center, Changwon-si, Gyeongsangnam-do Province, Korea (above) and a commercial fish farm in Wanbju-si, Jeollabuk-do Province, Korea (below).

2. BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템 적용 분석

2.1. NFT를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장 및 사육수 수질분석

2.1.1. 메기(*S. asotus*)

NFT 적용에 따른 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장과 사육수 분석을 위해 BFT, 사육수 내 독성(TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$)증가로 인한 폐사, 먹이반응 감소를 방지하기 위해 대조구(Sham-control)는 유수식; 3 rotation/day로 설정하여 2가지 실험구를 1 TON ($\varnothing$ 1.3 m $\times$ h 0.8 m) FRP 원형수조와 6000 lux의 인공광을 공급하는 식물 3단 재배기(늘푸른채, 대한민국)를 50 W 식물수중펌프(협신 세드라, 대한민국)와 PVC 파이프를 결합하여 물의 순환이 가능하도록 하였다. 내수면 양식대상종인 메기(어체중: 62.5 ± 1.23 g)를 이용하였으며, 총 5.75 kg의 어류를 입식하여 5 kg/m²의 밀도로 사육실험을 진행하였다. 작물은 유럽형 상추인 카이피라(*Lactuca sativa*) 상추를 선정하여 발아 후 10일 된 모종을 이용하여 3단 재배기에 각각 46포기를 재식하였으며, 식물성장에 대한 비교를 위하여 대조구로 수경재배(Hydroponics)를 추가로 진행하였다(Fig 2.5.). 실험기간 동안 광주기는 12 L:12 D, 기온은 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. BFT 및 대조구의 사육수는 재배기로 유입되는 양이 1일 1회전 순환이 가능하도록 순환펌프의 속도를 조절하며 관리하였다. 또한 수경재배 시 요구되는 전기전도도(Electrical conductivity, E.C.)의 수치는 0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상(FAO 2014)으로 설정하여 0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 BFT 사육수를 공급하였으며, 수경재배의 경우, 인공양액(물푸레, Dae-yu, Seoul, Korea) 1호 (A액, B액)를 0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상으로 맞추어 수경재배를 진행하였다. 사료는 (주)대한 고효율담수어(조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하였으며, C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료

공급 이후 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 진행하였다. 수온은 식물의 뿌리녹음현상을 방지하기 위해 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 어류 실험구 간의 분석은 t -test를 이용하였으며, 식물 실험구의 경우 일원분산분석(One-Way ANOVA test)을 통해 Tukey's test를 이용하여 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.





Fig. 2.5. Nutrient film technique (NFT) aquaponics experimental BFT fish tank installed with plants bed.

2.1.2. 뱀장어(*A. japonica*)

NFT 적용에 따른 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장과 사육수 분석을 위해 BFT, 사육수 내 독성(TAN, NO₂-N)증가로 인한 폐사, 먹이반응 감소를 방지하기 위해 대조구(Sham-control)는 유수식; 3 rotation/day로 설정하여 2가지 실험구를 1 TON (Ø 1.3 m × 높이 8 m) FRP 원형수조와 6000 lux의 인공광을 공급하는 식물 3단 재배기(늘푸른채, 대한민국)를 50 W 식물수중펌프(협신 세드라, 대한민국)와 PVC 파이프를 결합하여 물의 순환이 가능하도록 하였다. 적용 어류는 메기(전장: 162.2±3.2 mm, 무게: 62.5±1.2 g), 뱀장어(전장: 156.8±6.32, 무게: 48.4±3.29 g)를 이용하였으며, 총 5.75 kg의 어류를 입식하여 5 kg/m²의 밀도로 사육 실험을 진행하였다. 작물은 유럽형 상추인 카이피라(*L. sativa*) 상추를 선정하여 발아 후 10일 된 모종을 이용하여 3단 재배기에 각각 46포기를 재식하였으며, 식물성장에 대한 비교를 위하여 대조구로 수경재배(Hydroponics)를 추가로 진행하였다. 실험기간 동안 광주기는 12 L:12 D, 기온은 23±1℃로 유지하였다. BFT 및 대조구의 사육수는 재배기로 유입되는 양이 1일 1회전 순환이 가능하도록 순환펌프의 속도를 조절하며 관리하였다. 또한 수경재배 시 요구되는 전기전도도(Electrical conductivity, E.C.)의 수치는 0.5 µs/cm 이상(FAO 2014)으로 설정하여 0.5 µs/cm 이상의 BFT 사육수를 공급하였으며, 수경재배의 경우, 인공양액(물푸레, Dae-yu, Seoul, Korea) 1호 (A액, B액)를 0.5 µs/cm 이상으로 맞추어 수경재배를 진행하였다. 사료는 (주)대한 고효율담수어(조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하였으며, C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 진행하였다. 수온은 식물의 뿌리녹음현상을 방지하기 위해 25±1℃로 유지하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat

version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 어류 실험구 간의 분석은 *t*-test를 이용하였으며, 식물 실험구의 경우 일원분산분석(One-Way ANOVA test)을 통해 Tukey's test를 이용하여 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.



2.1.3. 수질분석

실험 기간 동안 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료 공급 전에 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 4일 간격으로 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산염($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산염($\text{NO}_3\text{-N}$) 3가지를 측정하였으며, 실험기간 동안 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 사육실험 종료 후 BFT 아쿠아포닉스 적용 사육수 내 존재하는 식물 생장에 필요한 미량원소 함유량을 분석하기 위해 성분분석을 진행하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.

2.2. DWC를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류와 작물의 성장, 사육수 수질 및 사육수 수질분석

2.2.1. 메기(*S. asotus*)

DWC 적용에 따른 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장과 사육수 분석을 위해 BFT와 BFT 아쿠아포닉스(BFT-AP)적용에 따른 어류의 성장과 수질 비교를 위해 1 TON ($\varnothing$ 1.3 m $\times$ H 0.8 m) FRP 원형수조와 DWC 사각 식물제배베드(L 1.8 m $\times$ W 1.8 m $\times$ H 0.6 m)의 사육수 순환을 위해 70 W 수중펌프(협신 세드라, 대한민국)를 이용하여 PVC 파이프로 연결하여 물의 순환이 가능하도록 하였다(Fig. 2.6.). 내수면 양식대상종인 메기(어체중: 49.1 ± 8.13 g)을 이용하여 수조당 5.75 kg (5 kg/m^2)를 수용하여 사육실험을 진행하였다. 작물은 카이피라(*L. sativa*) 상추의 모종을 이용하여 발아 후 7일 차 모종을 이용하여 재식 하였으며 DWC 식물제배베드에 200포기의 식물을 재식 하였다. 식물의 대조구로는 인공양액(물푸레, Dae-yu, Seoul, Korea) 1호 (A액, B액)를 공급하며 수경재배를 진행하였다. 또한, DWC 식물 제배베드에 효과적인 인공광을 공급하기 위해 LED를 설치하여 6000 lux를 조사하였다. 실험기간 동안 광주기는 12 L:12 D, 기온은 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 사료는 (주)대한 고효율담수어(조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하였으며, 매일 체중의 5%를 공급하였다. C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 진행하였다. 식물의 뿌리녹음현상을 방지하기 위해 수온은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산 분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다.

2.2.2. 뱀장어(*A. japonica*)

DWC 적용에 따른 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장과 사육 수 분석을 위해 BFT와 BFT 아쿠아포닉스(BFT-AP) 적용에 따른 어류의 성장과 수질 비교를 위해 1 TON ($\varnothing$ 1.3 m $\times$ H 0.8 m) FRP 원형수조와 DWC 사각 식물재배베드(L 1.8 m $\times$ W 1.8 m $\times$ H 0.6 m)의 사육수 순환을 위해 70 W 수중펌프(협신 세드라, 대한민국)를 이용하여 PVC 파이프로 연결하여 물의 순환이 가능하도록 하였다. 내수면 양식대상종인 뱀장어(어체중: 21.8 ± 2.48 g)을 이용하여 수조당 5.75 kg (밀도 5 kg/m^2)를 수용하여 사육실험을 진행하였다. 작물은 카이피라(*L. sativa*) 상추의 모종을 이용하여 발아 후 12일 차 모종을 이용하여 재식 하였으며 DWC 식물재배베드에 200포기, 100포기의 식물을 재식 하였다. 식물의 대조구로는 인공양액(물푸레, Dae-yu, Seoul, Korea) 1호 (A액, B액)를 공급하며 수경재배를 진행하였다. 또한, DWC 식물 재배베드에 효과적인 인공광을 공급하기 위해 LED를 설치하여 6000 lux를 조사하였다. 실험기간 동안 광주기는 12 L:12 D, 기온은 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 사료는 (주)대한 고효율담수어(조단백질 43%, 조지방 8%, 칼슘 1%, 수분 14%, 인 2.7%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 3호를 이용하였으며, 매일 체중의 5%를 공급하였고, C/N 비는 15:1 ~ 20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 진행하였다. 식물의 뿌리녹음현상을 방지하기 위해 수온은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어 (Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였다.

2.2.3. 미꾸리(*Misgurnus anguillicaudatus*)

DWC 적용에 따른 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장과 사육수 분석을 위해 BFT와 BFT 아쿠아포닉스(BFT-AP)적용에 따른 어류의 성장과 수질 비교를 위해 1 TON ($\varnothing$ 1.3 m $\times$ H 0.8 m) FRP 원형수조와 DWC 사각 식물재배베드(L 1.8 m $\times$ W 1.8 m $\times$ H 0.6 m)의 사육수 순환을 위해 수중펌프(협신 세드라 70 w, Korea)를 이용하여 PVC 파이프로 연결하여 물의 순환이 가능하도록 하였다. 내수면 양식대상종인 미꾸리(어체중: 1.3 ± 0.41 g)를 이용하여 수조당 3 kg를 수용하여 사육실험을 진행하였다. 작물은 카이피라(*Lactuca sativa*) 상추의 모종을 이용하여 발아 후 7일 차 모종을 이용하여 재식 하였으며 DWC 식물재배베드에 100포기의 식물을 재식 하였다. 사육수 내 독성(TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$)증가로 인한 폐사, 먹이반응 감소를 방지하기 위해 대조구(Sham-control)는 유수식; 3 rotation/day로 설정하였으며, 식물의 대조구로는 인공양액(물푸레, Dae-yu, Seoul, Korea) 1호 (A액, B액)를 공급하며 수경재배를 진행하였다. 또한, DWC 식물 재배베드에 효과적인 인공광을 공급하기 위해 LED를 설치하여 6000 lux를 조사하였다. 실험기간 동안 광주기는 12 L:12 D, 기온은 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 사료는 (주)우성 웰빙미꾸리(조단백질 40%, 조지방 4%, 칼슘 0.8%, 수분 14%, 인 1.8%, 조섬유 5%, 조회분 15%) 부상 1호를 이용하여 매일 체중의 5%를 공급하였다. C/N 비는 15:1~20:1로 유지하기 위해 사료공급 이후 C/N 비를 유지하기 위해 당밀을 추가하며 3반복 사육실험을 진행하였다. 식물의 뿌리녹음현상을 방지하기 위해 수온은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 어류 실험구 간의 분석은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)을

통해 Tukey's test를 이용하였으며, 식물 실험구의 경우 t -test를 이용하여 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.



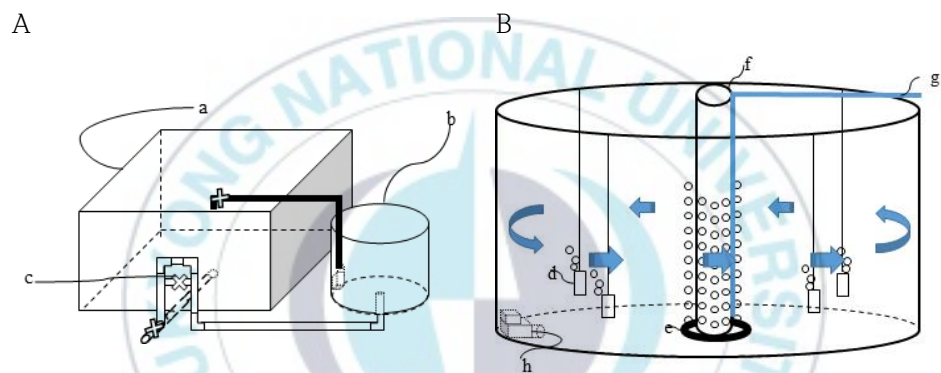


Fig. 2.6. Deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT (A) and BFT breeding Tank (B) (a: aquaponics bed, b: BFT fish breeding tank, c: valve, d: air stone, e: union hose, f: venturi pipe, g: air hose, h: water pump).

2.2.4. 작물의 밀도(재식량)에 따른 사육어의 성장도 분석

DWC 아쿠아포닉스 적용시 재배작물의 밀도에 따른 수질의 변화 및 어류의 성장도 비교를 위해 메기와 뱀장어를 대상으로 추가적으로 100포기의 실험구를 추가하여 200포기와 100포기를 재식하여 4주간 사육실험을 진행하였으며 실험 종료 후 어류 및 작물의 성장도를 비교분석하였다.



2.2.5. 사육수 성분 분석 및 수질분석

DWC 적용 BFT 기반의 아쿠아포닉스의 사육수와 수경재배의 사육수 내 미량원소(mg/L) 분석을 위해 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES Optima 8300; Perkin Elmer Co., Waltham, MA, USA)를 이용하여 Total-N, Total-P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Si의 양을 측정하였으며, Cl은 이온크로마토그래피(930 Comact IC Flex;p Metrohm Co., Herisau, Switzerland)를 사용하여 분석하였다. 실험 기간 동안 사육수의 수질분석은 다항목 수질측정기(YSI-650, Yellow Spring Instruments, Ohio, USA)를 이용하여 사료 공급 전에 측정하였다. 질소화합물(Nitrogen components)의 측정은 4일 간격으로 총 암모니아성 질소(Total Ammonia Nitrogen), 아질산염($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산염($\text{NO}_3\text{-N}$) 3가지를 측정하였으며, 실험기간 동안 오전 사료 공급 전 채수를 하여 다목적 수질측정기인 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법을 이용하여 측정하였다. 수질의 통계학적 분석은 SYSTAT 소프트웨어(Systat version 18, SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)를 이용하였다. 유의성 검증은 일원분산분석(One-Way ANOVA test)를 통해 Tukey's test를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$ 로 설정하였다.

III. Results

1. BFT 양식시스템 내 수질환경 및 사육효율 개선효과

1.1. 내수면 양식대상종의 BFT 적용에 따른 수질환경 요인 분석

1.1.1. BFT 사육수 제조에 따른 수질변화 및 미생물 군집분석

실험결과, 주차가 진행 될수록 수색이 변하는 모습이 확인되었다(Fig 3.1.). 사육 원수에서는 미생물이 발견되지 않았으나, 살균 후 저장탱크에서 채수한 샘플에서는 미생물이 10^2 CFU/ml로 존재하여 관로 내 혹은 탱크 내에 미생물이 존재하는 것으로 추정된다. NA배지(일반균)에서는 20°C BFT 배양수에서 10^6 CFU/ml 정도로 다른 온도에서보다 가장 높은 균총을 보였다. MRS배지(유산균)에서는 평균 10^3 CFU/ml 정도로 유지하였으며, 4주차 30°C 에서 총균수가 10^4 CFU/ml로 가장 높았다. R2A배지에서는 평균 10^5 CFU/ml 정도의 균총을 보였다. BFT 배양수(25°C)는 NA 배지에서 2주차에 비해 4주차에 10배 이상 균체수가 증가하였다. 20°C 에서는 총 균수가 10^6 CFU/ml, 25°C 와 30°C 에서는 10^5 CFU/ml 정도로 존재하여 20°C 물에서 보다 많은 미생물이 존재하였다(Table 3).



Fig. 3.1. The BFT inoculating water during 30 days (A: 1 day, B: 7 days, C: 14 days, D: 21 days, E: 28 days, F: 30 days).

Table 3. Total bacterial colonies (CFU/ml) of BFT inoculating water according to temperature for 4 weeks

Weeks	Sample	¹ NA	² MRS	³ R2A
		(CFU / ml)		
0	Fresh water	0	0	0
	Stored water	3.33×10^1	0	2.37×10^2
2	BFT-20°C	1.93×10^6	1.87×10^3	2.65×10^5
	BFT-25°C	3.92×10^4	1.8×10^3	2.1×10^5
	BFT-30°C	4.13×10^5	8.67×10^1	5.57×10^5
4	BFT-20°C	2.33×10^6	3.9×10^3	3.24×10^6
	BFT-25°C	4.1×10^5	7.66×10^3	6.2×10^5
	BFT-30°C	9.27×10^5	1.22×10^4	8.27×10^5

* Incubating temperature: 30°C, Incubating hour: 48 hr.

¹ NA: Nutrient agar,

²MRS: deMan, Rogosa and Sharpe agar

³R2A: Reasoner's 2A agar

1.1.2. C/N 비에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석

1.1.2.1. 메기(*S. asotus*)

실험결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 메기의 총 무게는 C/N 20:1에서 3.1 ± 0.08 kg, 15:1에서 2.9 ± 0.13 kg, Control에서 2.7 ± 0.09 kg, 25:1에서 2.7 ± 0.06 kg, 30:1에서 2.5 ± 0.05 kg, 10:1에서 2.4 ± 0.11 kg으로 나타났다. 증체율(Weight gain rate)과 사료전환효율(Feed conversion ratio)는 C/N 20:1에서 $140.9 \pm 5.56\%$, 1.1 ± 0.11 , 15:1에서 $123.44 \pm 6.32\%$, 1.2 ± 0.06 , Control에서 $112.5 \pm 4.06\%$, 1.4 ± 0.08 , 25:1에서 $110.9 \pm 4.08\%$, 1.4 ± 0.13 , 30:1에서 $93.0 \pm 6.69\%$, 1.6 ± 0.08 , 10:1에서 $89.6 \pm 7.27\%$, 1.7 ± 0.09 순으로 나타났으며, 일일성장률(Specific growth rate, SGR)의 경우 C/N 20:1에서 $2.8 \pm 0.09\%$, 15:1에서 2.6 ± 0.18 , Control에서 2.6 ± 0.14 , 10:1에서 2.5 ± 0.13 , 25:1에서 2.4 ± 0.18 , 30:1에서 2.2 ± 0.09 순으로 나타났다. 생존율(Survival rate)의 경우, Control에선 94.8 ± 1.71 , 10:1에서 95.2 ± 2.21 , 15:1에선 $99.1 \pm 0.78\%$, 20:1에선 $99.5 \pm 0.77\%$, 25:1에선 $97.6 \pm 0.82\%$, 30:1에선 86.7 ± 2.23 로 나타났으며, 성장도 비교결과 일반 사육수에 비해 C/N 15:1과 20:1에서 성장도가 개선된 결과가 나타났다(Table 4).

Table 4. The growth performance of *Silurus asotus* based on BFT according to C/N ratio for 4 weeks

Parameter	Sham- Control	10:1	15:1	20:1	25:1	30:1	<i>P</i> value
Average total length (mm)	156.1±5.52	155.01±8.48	158.4±10.22	159.5±9.83	155.2±11.75	151.0±9.94	NS
Average total weight (kg)	2.7±0.09 ^{a,b}	2.4±0.11 ^b	2.9±0.13 ^a	3.1±0.08 ^a	2.7±0.06 ^{a,b}	2.5±0.05 ^b	0.008
Average body weight (g)	26.2±3.15 ^a	25.4±4.18 ^{a,b}	26.4±5.38 ^a	27.9±4.79 ^a	25.2±5.72 ^{a,b}	23.8±5.32 ^b	0.031
¹ Weight gain rate (%)	112.5±4.06 ^{a,b}	89.6±7.27 ^b	123.4±6.32 ^{a,b}	140.9±5.56 ^a	110.9±4.08 ^{a,b}	93.0±6.69 ^b	0.028
² SGR (%/day)	2.6±0.14 ^{a,b}	2.5±0.13 ^{a,b}	2.6±0.18 ^{a,b}	2.8±0.09 ^a	2.4±0.18 ^b	2.2±0.09 ^b	0.015
³ Survival rate (%)	94.8±1.71 ^a	95.2±2.21 ^a	99.1±0.78 ^a	99.5±0.77 ^a	97.6±0.82 ^a	86.7±2.23 ^b	0.021
⁴ FCR	1.4±0.08 ^{a,b}	1.7±0.09 ^b	1.2±0.06 ^a	1.1±0.11 ^a	1.4±0.13 ^{a,b}	1.6±0.08 ^b	0.018

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial total weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$). NS, no significant ($P\geq 0.5$).

1.1.2.2. 뱀장어(*A. japonica*)

실험결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 뱀장어의 총 무게는 C/N 20:1에서 3.2 ± 0.11 kg, 15:1에서 2.8 ± 0.23 kg, 25:1에서 2.8 ± 0.09 kg, Control에서 2.5 ± 0.14 kg, 30:1에서 2.5 ± 0.14 kg, 10:1에서 2.4 ± 0.11 kg으로 나타났다. 증체율(Weight gain rate)과 사료전환효율(Feed conversion ratio)는 C/N 20:1에서 146.1 ± 10.22 , 1.1 ± 0.08 15:1에서 $116.9 \pm 17.44\%$ 1.3 ± 0.17 , 25:1에서 $110.9 \pm 4.08\%$, 1.4 ± 0.13 , Control에서 96.1 ± 6.81 , 1.6 ± 0.11 , 30:1에서 $91.9 \pm 5.03\%$, 1.7 ± 0.12 , 10:1에서 $89.6 \pm 7.32\%$, 1.7 ± 0.12 순으로 나타났으며, 일일성장률(Specific growth rate, SGR)의 경우 C/N 20:1에서 $2.3 \pm 0.18\%$, 15:1에서 $2.1 \pm 0.15\%$, 25:1에서 $1.8 \pm 0.07\%$, Control에서 1.8 ± 0.09 , 30:1에서 $1.8 \pm 0.18\%$, 10:1에서 $1.8 \pm 0.07\%$ 순으로 나타났다. 생존율(Survival rate)의 경우, Control에서 $99.5 \pm 0.77\%$, 10:1에서 $99.1 \pm 0.83\%$, 15:1, 20:1에서 $100 \pm 0\%$, 25:1에서 $98.6 \pm 1.43\%$, 30:1에서 $88.6 \pm 2.87\%$ 로 나타났으며, 성장도 비교결과 일반 사육수에 비해 C/N 15:1과 20:1, 25:1에서 성장도가 가장 개선된 결과가 나타났다(Table 5).

Table 5. The growth performance of *Anguilla japonica* based on BFT according to C/N ratio for 4 weeks

Parameter	Sham-Control	10:1	15:1	20:1	25:1	30:1	<i>P</i> value
Average total length (mm)	311.3±24.12	302.4±16.33	317.8±13.60	323.8±13.81	307.5±14.14	303.2±18.34	NS
Average total weight (kg)	2.5±0.12 ^{a,b}	2.4±0.11 ^b	2.8±0.23 ^{a,b}	3.2±0.11 ^a	2.8±0.09 ^{a,b}	2.5±0.14 ^b	0.019
Average body weight (g)	32±5.3 ^{a,b}	31±3.8 ^{a,b}	34±4.7 ^a	36±4.9 ^a	32±2.2 ^{a,b}	31±3.6 ^{a,b}	0.031
¹ Weight gain rate (%)	96.1±6.81 ^b	89.6±7.32 ^b	116.9±17.44 ^{a,b}	146.1±10.22 ^a	110.9±4.08 ^{a,b}	91.9±5.03 ^b	0.028
² SGR (%/day)	1.8±0.09 ^{a,b}	1.8±0.07 ^b	2.1±0.15 ^a	2.3±0.18 ^a	1.8±0.07 ^{a,b}	1.8±0.18 ^b	0.015
³ Survival rate (%)	99.5±0.77 ^a	99.1±0.83 ^a	100±0.0 ^a	100±0.0 ^a	98.6±1.43 ^a	88.6±2.87 ^b	0.017
⁴ FCR	1.6±0.11 ^b	1.7±0.12 ^b	1.3±0.17 ^{a,b}	1.1±0.08 ^a	1.4±0.13 ^{a,b}	1.7±0.12 ^b	0.009

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial total weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P < 0.05$). NS, no significant ($P \geq 0.5$).

1.1.2.3. 향어(*C. carpio*)

실험결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 향어의 총 무게는 C/N 20:1에서 3.4 ± 0.09 kg, 15:1에서 3.3 ± 0.08 kg, Control에서 3.3 ± 0.13 kg, 25:1에서 3.2 ± 0.27 kg, 30:1에서 2.9 ± 0.13 kg, 10:1에서 2.8 ± 0.12 kg으로 나타났다. 증체율(Weight gain rate)과 사료전환효율(Feed conversion ratio)는 C/N 20:1에서 $53.2 \pm 3.33\%$, 1.6 ± 0.02 , 15:1에서 $45.5 \pm 7.12\%$, 1.8 ± 0.07 , Control에서 $45.0 \pm 2.28\%$, 1.9 ± 0.04 , 25:1에서 $40.9 \pm 4.21\%$, 2.1 ± 0.04 , 30:1에서 $30.9 \pm 7.29\%$, 2.7 ± 0.06 , 10:1에서 $25.2 \pm 3.31\%$, 3.3 ± 0.02 순으로 나타났으며, 일일성장률(Specific growth rate, SGR)의 경우 C/N 20:1에서 $1.5 \pm 0.18\%$, 15:1에서, $1.3 \pm 0.08\%$, Control에서 1.3 ± 0.05 , 25:1에서 $1.2 \pm 0.05\%$, 30:1에서 $0.9 \pm 0.07\%$, 10:1에서 $0.8 \pm 0.17\%$ 순으로 나타났다. 생존율(Survival rate)의 경우, 모든 실험구에서 $100 \pm 0.0\%$ 로 나타났으며, 성장도 비교결과 일반 사육수에 비해 C/N 15:1과 비슷한 값이 나타났으며, 20:1에서 성장도가 가장 개선된 결과가 나타났다(Table 6).

Table 6. The growth performance of *Cyprinus carpio* based on BFT according to C/N ratio for 4 weeks

Parameter	Sham- Control	10:1	15:1	20:1	25:1	30:1	<i>P</i> value
Average total length (mm)	129.6±5.77	124.3±6.11	131±3.50	132.5±4.88	129.2±6.07	126.3±3.38	NS
Average total weight (kg)	3.3±0.13 ^a	2.8±0.12 ^b	3.3±0.08 ^a	3.4±0.09 ^a	3.2±0.27 ^{a,b}	2.9±0.13 ^{a,b}	0.009
Average body weight (g)	31.0±3.17 ^a	26.5±2.28 ^{a,b}	30.8±2.47 ^a	32.6±2.77 ^a	29.8±2.13 ^{a,b}	27.9±2.48 ^{a,b}	0.014
¹ Weight gain rate (%)	45.0±2.28 ^a	25.2±3.31 ^b	45.5±7.12 ^a	53.2±3.33 ^a	40.9±4.21 ^{a,b}	30.9±7.29 ^b	0.011
² SGR (%/day)	1.3±0.05 ^{a,b}	0.8±0.17 ^b	1.3±0.08 ^{a,b}	1.5±0.18 ^a	1.2±0.05 ^{a,b}	0.9±0.07 ^b	0.005
³ Survival rate (%)	100±0.0	100±0.0	100±0.0	100±0.0	100±0.0	100±0.0	NS
⁴ FCR	1.9±0.04 ^{a,b}	3.3±0.02 ^b	1.8±0.07 ^{a,b}	1.6±0.02 ^a	2.1±0.04 ^{a,b}	2.7±0.06 ^b	0.018

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial total weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$). ns, NS, no significant ($P\geq 0.5$).

1.1.2.4. BFT 사육수 NGS 분석

메기와 뱀장어 사육수의 C/N비에 따른 미생물 다양성 및 시간(0, 2, 4주)에 따른 미생물 다양성의 NGS 분석 결과 메기와 뱀장어 두 사육수 모두 Proteobacteria와 Bacteroidetes 문이 우세로 나타났으며, 메기 사육수의 경우, Verrucomicrobia, Planctomycetes, Actinobacteria, Acidobacteria, Firmicutes의 Relative abundance가 증가하였으며, C/N 비 15:1, 20:1에서 우세한 모습을 나타냈다(Fig. 3.2.). 뱀장어 사육수에서는 Chlamydiae 문의 상대풍부도는 감소한 반면 Planctomycete와 Firmicutes문의 상대풍부도는 증가하였으며, C/N 비 15:1에서 가장 우세한 모습을 나타냈으며, 수질 개선과 어류성장 및 BFT 수중 유기물 활용 측면에서 적절한 C/N 비는 15:1에서 20:1로 나타났다(Fig. 3.3.). BFT 적용 메기와 뱀장어의 C/N비에 따른 총 균수는 Table 7, 8에 나타냈으며, 메기의 경우, 주차가 지남에 따라 어종 및 C/N 비에 상관없이 총 균수가 모두 증가하는 모습이 나타났으나, 뱀장어는 2주차에 가장 높은 값이 나타난 후 4주차에 약간 감소한 모습이 나타났다.

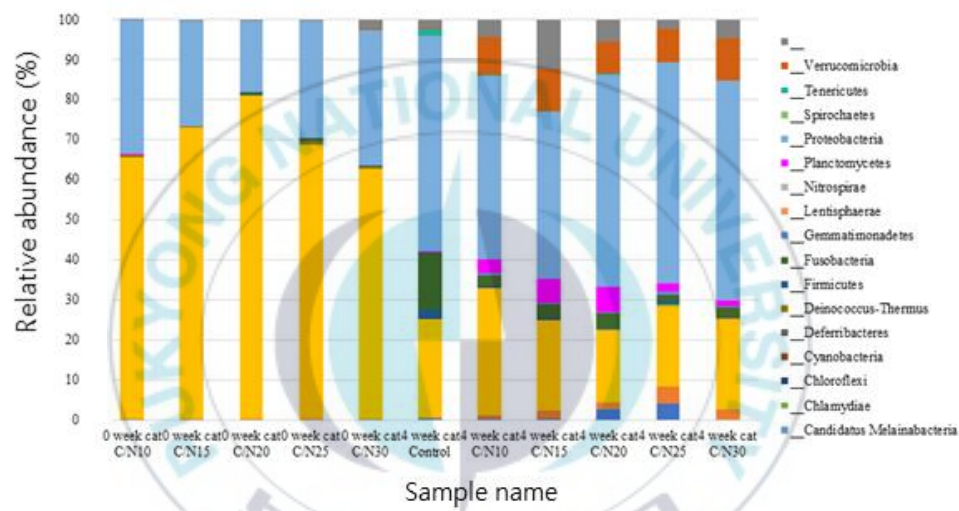


Fig. 3.2. Microorganism of *Silurus asotus* based on BFT according to C/N ratio.

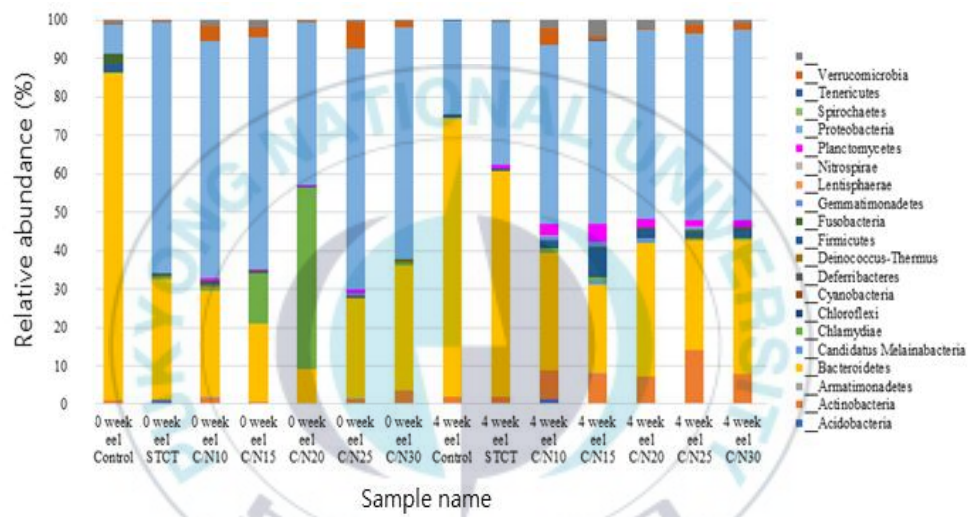


Fig. 3.3. Microorganism of *Anguilla japonica* based on BFT according to C/N ratio.

Table 7. Total bacterial colonies (CFU/ml) of *Silurus asotus* BFT breeding water according to C/N ratio for 4 weeks

Weeks	Experiment	pH	Culture median		
			¹ NA	² MRS	³ R2A
0	Control	7.88	2.9×10^4	2.3×10^2	1.5×10^5
	STCT- C/N 10:1	7.54	3.6×10^5	3.5×10^3	1.1×10^6
	STCT- C/N 15:1	7.50	1.4×10^6	4.8×10^3	1.1×10^6
	STCT- C/N 20:1	7.60	2.8×10^6	1.9×10^3	2.3×10^6
	STCT- C/N 25:1	7.47	2.5×10^6	2.2×10^3	1.7×10^6
	STCT- C/N 30:1	7.49	1.1×10^2	6.3×10^2	1.3×10^6
2	Control	7.70	2.0×10^4	*ND	3.5×10^4
	STCT- C/N 10:1	7.02	1.7×10^5	7.7×10^4	2.2×10^5
	STCT- C/N 15:1	6.65	2.9×10^5	1.5×10^3	6.0×10^5
	STCT- C/N 20:1	7.18	2.3×10^5	8.0×10^2	2.9×10^5
	STCT- C/N 25:1	7.03	1.7×10^6	3.0×10^3	2.0×10^6
	STCT- C/N 30:1	7.02	1.2×10^5	2.3×10^3	1.8×10^5
4	Control	7.87	2.9×10^4	1.0×10^3	2.8×10^4
	STCT- C/N 10:1	6.70	2.1×10^5	3.3×10^4	1.6×10^5
	STCT- C/N 15:1	6.67	5.3×10^5	1.1×10^4	2.1×10^5
	STCT- C/N 20:1	6.89	9.7×10^3	9.0×10^3	1.1×10^5
	STCT- C/N 25:1	6.48	1.8×10^3	6.7×10^3	8.3×10^4
	STCT- C/N 30:1	6.81	3.0×10^5	1.7×10^4	1.6×10^5

* Incubating temperature: 30°C, Incubating hour: 48 hr.

* ND means not detected.

¹ NA: Nutrient agar,

² MRS: deMan, Rogosa and Sharpe agar

³ R2A: Reasoner's 2A agar

Table 8. Total bacterial colonies (CFU/ml) of *Anguilla japonica* BFT breeding water according to C/N ratio for 4 weeks

Weeks	Sample	pH	Culture Medium		
			¹ NA	² MRS	³ R2A
0	Control	7.77	1.2×10 ⁵	1.7×10 ²	1.4×10 ⁵
	ST/CT- C/N 10:1	7.64	3.3×10 ⁶	1.9×10 ³	2.1×10 ⁶
	ST/CT- C/N 15:1	7.41	1.3×10 ⁶	1.1×10 ³	1.7×10 ⁶
	ST/CT- C/N 20:1	7.40	2.7×10 ⁵	1.3×10 ³	3.9×10 ⁵
	ST/CT- C/N 25:1	7.28	1.9×10 ⁶	1.4×10 ³	2.2×10 ⁶
	ST/CT- C/N 30:1	7.36	4.6×10 ⁶	8.0×10 ²	4.5×10 ⁶
2	Control	7.58	3.9×10 ⁵	1.2×10 ²	9.0×10 ⁵
	ST/CT- C/N 10:1	6.65	4.1×10 ⁶	2.5×10 ⁴	2.2×10 ⁵
	ST/CT- C/N 15:1	6.64	3.1×10 ⁷	5.4×10 ⁴	2.7×10 ⁶
	ST/CT- C/N 20:1	6.72	3.4×10 ⁶	3.1×10 ⁵	3.2×10 ⁶
	ST/CT- C/N 25:1	6.93	2.3×10 ⁶	1.2×10 ⁴	4.2×10 ⁶
	ST/CT- C/N 30:1	6.40	3.1×10 ⁶	6.5×10 ³	4.8×10 ⁷
4	Control	7.53	1.2×10 ⁵	*ND	4.9×10 ⁵
	ST/CT- C/N 10:1	6.76	8.3×10 ⁵	8.7×10 ³	8.3×10 ⁵
	ST/CT- C/N 15:1	6.33	9.0×10 ⁵	5.3×10 ³	1.2×10 ⁵
	ST/CT- C/N 20:1	6.69	2.8×10 ⁵	1.3×10 ³	1.8×10 ⁵
	ST/CT- C/N 25:1	6.47	4.4×10 ⁵	4.7×10 ³	2.9×10 ⁵
	ST/CT- C/N 30:1	6.61	5.3×10 ⁵	3.3×10 ³	6.3×10 ⁵

* Incubating temperature: 30℃, Incubating hour: 48 hr.

* ND means not detected.

¹ NA: Nutrient agar,

²MRS: deMan, Rogosa and Sharpe agar

³R2A: Reasoner's 2A agar

1.1.3. 어종에 따른 급성독성(TAN, NO₂-N) 및 안전농도

1.1.3.1. 메기(*S. asotus*)

실험결과 TAN 독성에 따른 메기의 생존율은 pH 8 구간에서 42.7% (20 mg/L), 10.7% (40 mg/L), 0% (60 mg/L, 80 mg/L, 100 mg/L), pH 7 구간에서 68.7% (20 mg/L), 35.3% (40 mg/L), 8% (60 mg/L), 0% (80 mg/L, 100 g/L), pH 6 구간에서 80% (20 mg/L), 61.3% (40 mg/L), 38% (60 mg/L), 12% (80 mg/L), 0% (100 mg/L)로 각각 나타났다 (Fig. 3.4).



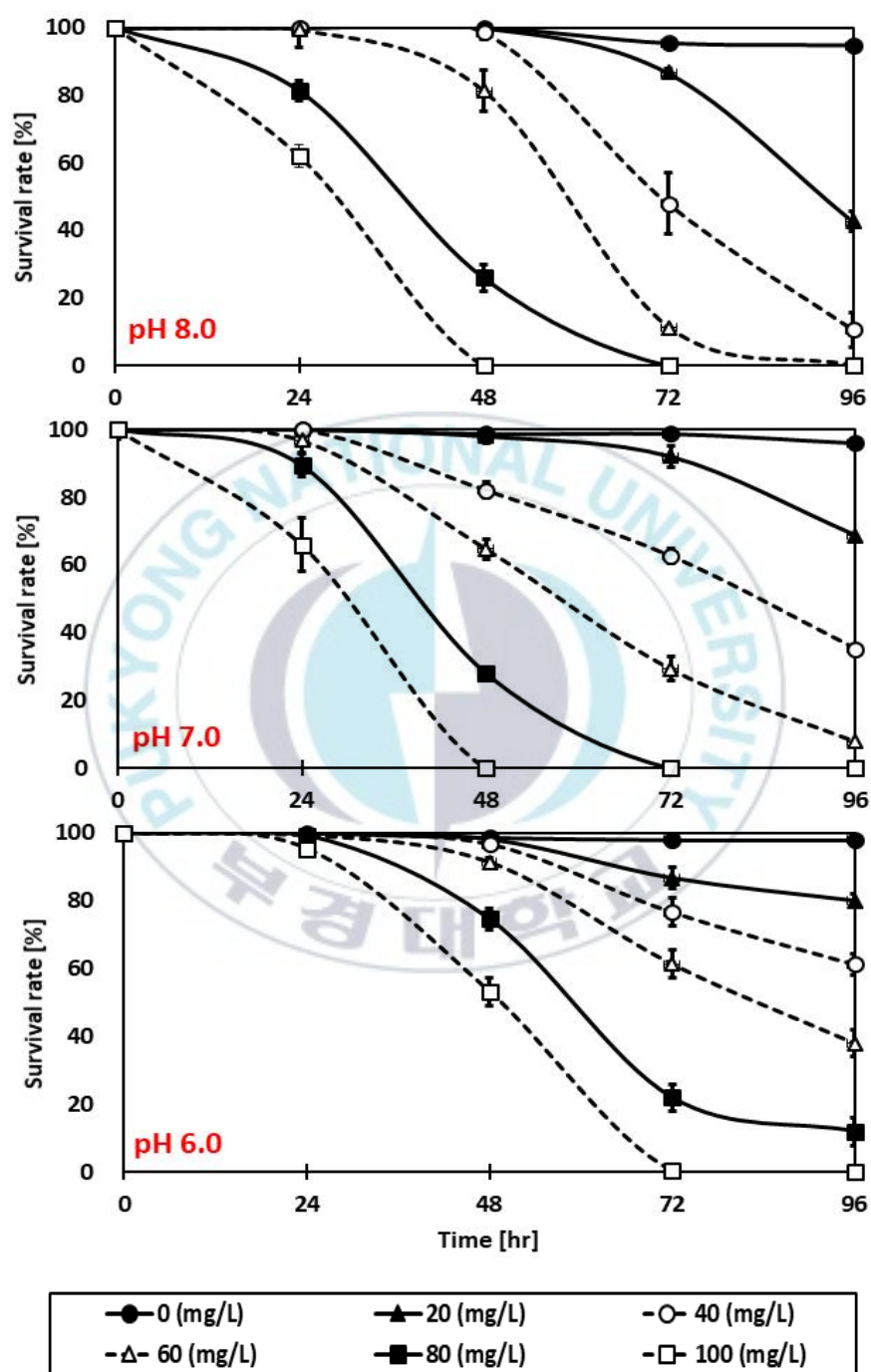


Fig. 3.4. Survival rate of *Silurus asotus* in response to total ammonia nitrogen concentration.

메기의 TAN 농도에 따른 24, 48, 72, 96시간별 LC_{50} 값은 pH 8 구간에서 165, 67, 62, 42 mg/L, pH 7 구간에서 193, 98, 93, 63 mg/L, pH 6 구간에서 1,401, 132, 124, 92 mg/L로 나타나 pH가 낮고 노출시간이 길수록 LC_{10} , LC_{50} , LC_{90} 값이 감소하며 농도에 관계없이 독성이 강해지는 경향이 나타났다(Table 9).



Table 9. LC₁₀, LC₅₀ and LC₉₀ values according to total ammonia nitrogen concentrations (mg/L) of *Silurus asotus* (96 h)

pH	Time (hr)	LC ₁₀ (mg/L)	LC ₅₀ (mg/L)	LC ₉₀ (mg/L)
8.0	24	51	165	278
	48	29	67	105
	72	21	62	102
	96	16	42	67
7.0	24	57	193	330
	48	34	98	174
	72	28	93	105
	96	24	63	102
6.0	24	296	1,401	2,505
	48	39	132	225
	72	34	124	214
	96	30	92	154

NO₂-N 독성에 따른 메기의 생존율은 pH 8 구간에서 97.3% (50 mg/L), 99.3% (100 mg/L), 100% (150 mg/L), 96.7% (200 mg/L), 96.0% (250 mg/L), pH 7 구간에서 98.7% (50 mg/L), 96.7% (100 mg/L), 95.3% (150 mg/L), 93.3% (200 mg/L), 88% (250 mg/L), pH 6 구간에서 98.7% (50 mg/L), 94% (100 mg/L), 89.3% (150 mg/L), 80% (200 mg/L), 60% (250 mg/L)로 각각 나타났다(Fig. 2.6.).



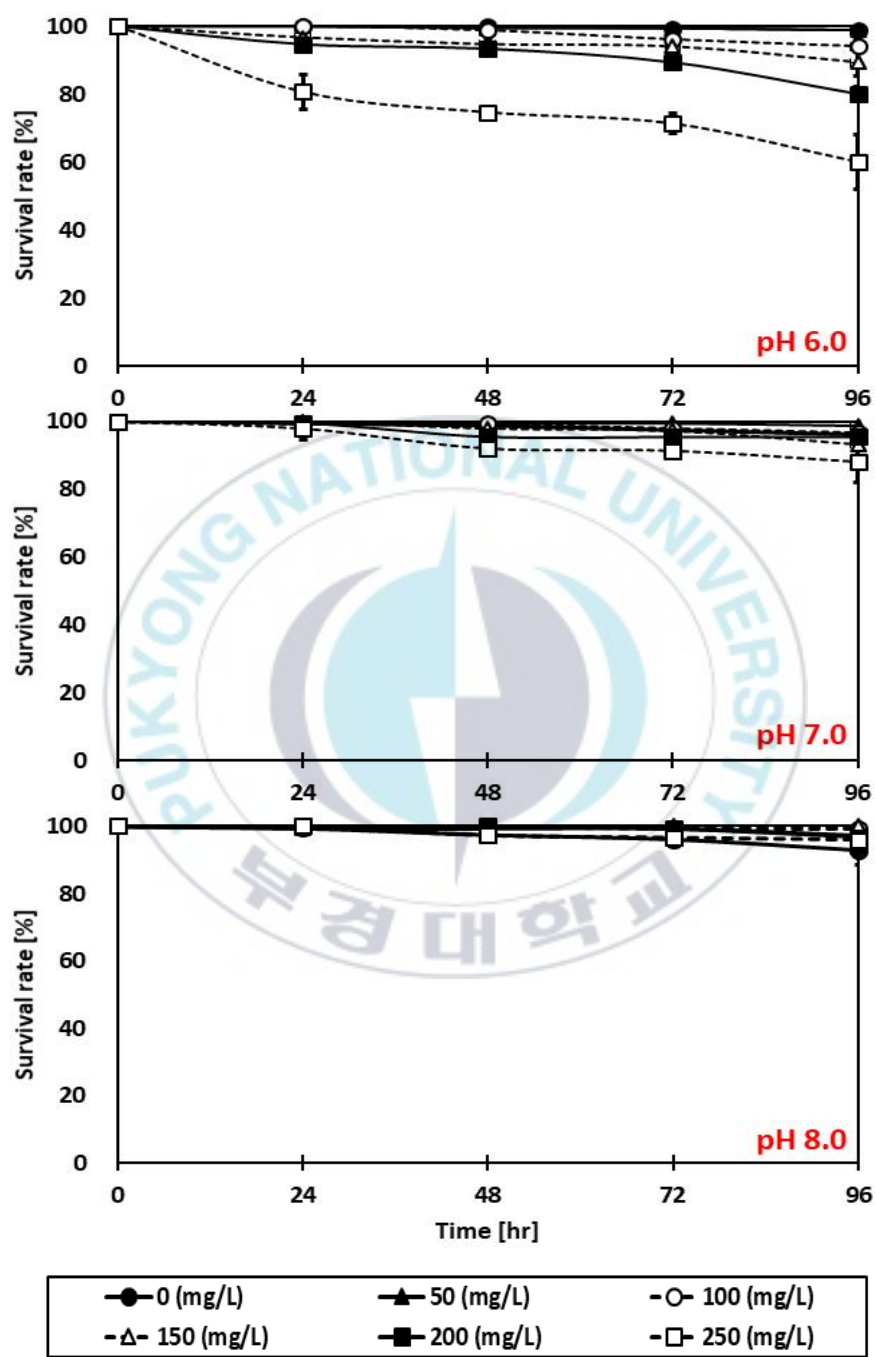


Fig. 2.6. Survival rate of *Silurus asotus* in response to $\text{NO}_2\text{-N}$ concentration.

메기의 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도에 따른 24, 48, 72, 96시간별 LC_{50} 값은 pH 8 구간에서 6,645, 17,635, 9,095, 2,470 mg/L, pH 7 구간에서 4,394, 890, 820, 685 mg/L, pH 6 구간에서 324, 255, 219, 151 mg/L로 나타나 pH가 낮고 노출 시간이 길수록 LC_{10} , LC_{50} , LC_{90} 값이 감소하며 농도에 관계없이 독성이 강해지는 경향이 나타났다(Table 10).



Table 10. LC₁₀, LC₅₀ and LC₉₀ values according to NO₂-N concentrations (mg/L) of *Silurus asotus* (96 h)

pH	Time (hr)	LC ₁₀ (mg/L)	LC ₅₀ (mg/L)	LC ₉₀ (mg/L)
8.0	24	1,382	6,645	11,908
	48	3,842	17,635	31,429
	72	2,077	9,095	16,113
	96	644	2,470	4,297
7.0	24	886	4,394	7,903
	48	184	890	1,595
	72	172	828	1,484
	96	153	685	1,217
6.0	24	82	324	565
	48	66	255	443
	72	56	219	382
	96	41	151	262

1.1.3.2. 뱀장어(*A. japonica*)

실험결과 TAN 독성에 따른 뱀장어의 생존율은 pH 8 구간에서 96.9% (0 mg/L), 55.6% (100 mg/L), 8.9% (200 mg/L), 0% (300, 400, 500 mg/L), pH 7 구간에서 100% (100 mg/L), 82.2% (100 mg/L), 61.1% (200 mg/L), 36.7% (300 mg/L), 0% (400, 500 mg/L), pH 6 구간에서 100.0% (0, 100 mg/L), 96.7% (200 mg/L), 74.4% (300 mg/L), 31.1% (400 mg/L), 0% (500 mg/L)로 각각 나타났다(Fig. 3.6.).



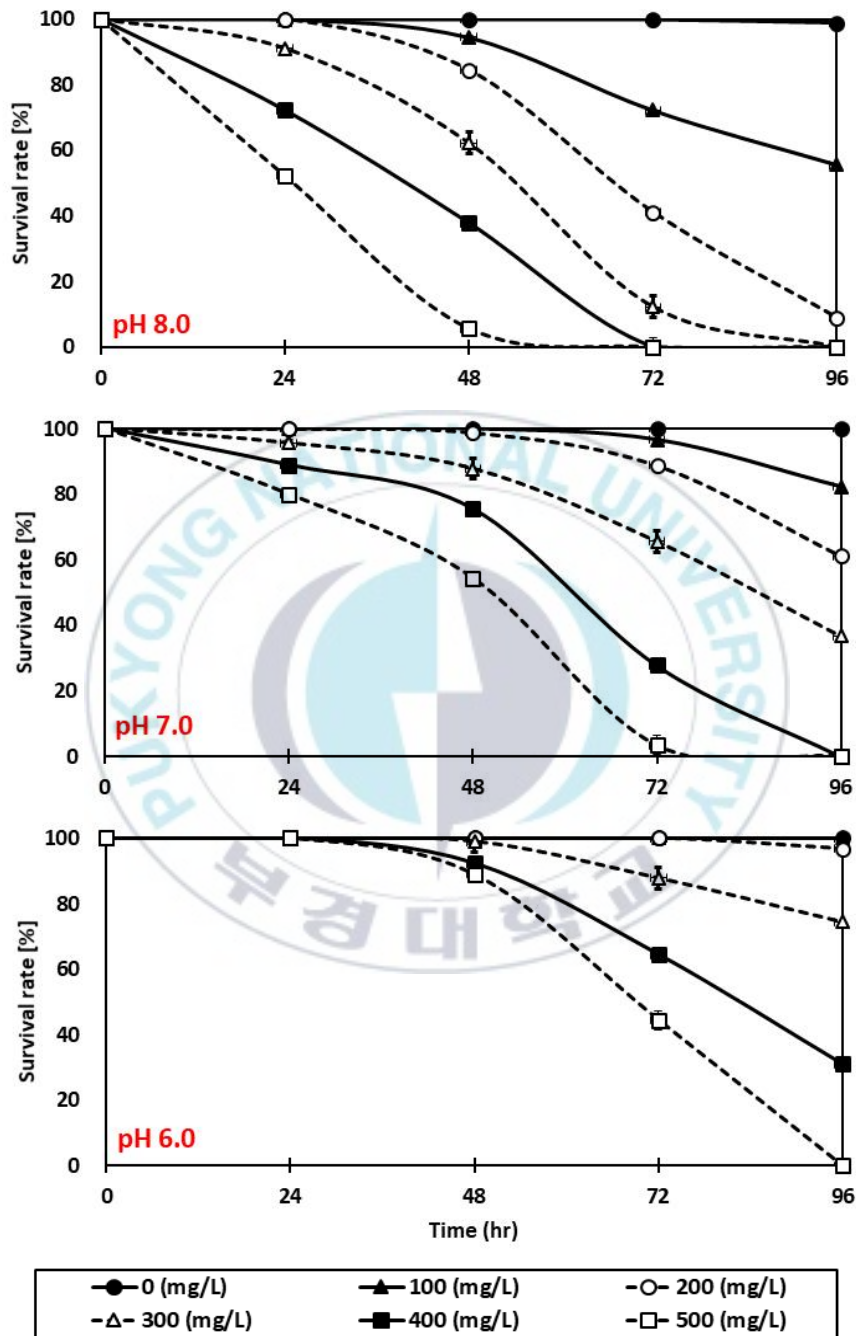


Fig. 3.6. Survival rate of *Anguilla japonica* in response to total ammonia nitrogen concentration.

뱀장어의 TAN 농도에 따른 24, 48, 72, 96시간별 LC_{50} 값은 pH 8 구간에서 630, 324, 278, 167 mg/L, pH 7 구간에서 1,368, 655, 317, 235 mg/L, pH 6 구간에서 24시간 제외, 2,287, 539, 332 mg/L로 각각 나타나 pH가 높고 노출시간이 길수록 LC_{10} , LC_{50} , LC_{90} 값이 감소하며 독성이 강해지는 경향이 나타났다(Table 11).



Table 11. LC₁₀, LC₅₀ and LC₉₀ values according to total ammonia nitrogen concentrations (mg/L) of *Anguilla japonica* (96 h)

pH	Time (hr)	LC ₁₀ (mg/L)	LC ₅₀ (mg/L)	LC ₉₀ (mg/L)
8.0	24	207	630	1,053
	48	113	324	535
	72	90	278	466
	96	51	167	284
7.0	24	353	1,368	2,384
	48	206	655	1,103
	72	121	317	514
	96	53	235	416
24	-	-	-	18,776
	48	541	2,287	4,034
	72	186	539	892
	96	140	332	524

NO₂-N 독성에 따른 뱀장어의 생존율은 pH 8 구간에서 100% (0, 100, 200 mg/L), 88.3% (300 mg/L), 78.3% (400 mg/L), 58.3% (500 mg/L), pH 7 구간에서 100% (0 mg/L), 76.7% (100 mg/L), 65.0% (200 mg/L), 43.3% (300 mg/L), 21.7% (400 mg/L), 13.3% (500 mg/L), pH 6 구간에서 100.0% (0 mg/L), 43.3% (100 mg/L), 21.7% (200 mg/L), 0.0% (300, 400, 500 mg/L)로 각각 나타났다(Fig. 3.7).



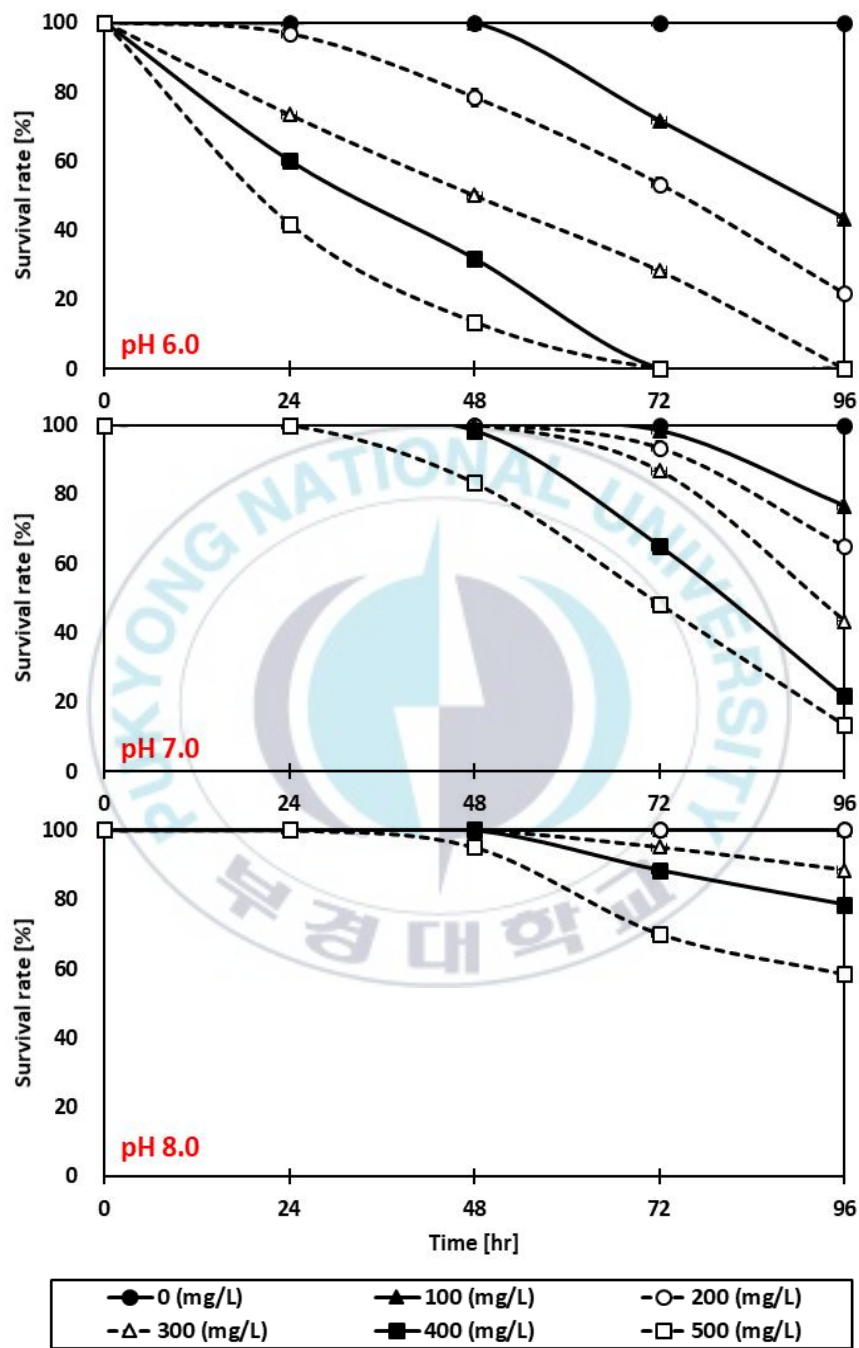


Fig. 3.7. Survival rate of *Anguilla japonica* in response to $\text{NO}_2\text{-N}$ concentration.

뱀장어의 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도에 따른 24, 48, 72, 96시간별 LC_{50} 값은 pH 8 구간에서 24시간 제외 7,176, 1,028, 711 mg/L, pH 7 구간에서 24시간 제외 2113, 556, 296 mg/L, pH 6 구간에서 24시간 제외, 314 260, 188 mg/L로 각각 나타나 pH가 낮고 노출시간이 길수록 LC_{10} , LC_{50} , LC_{90} 값이 감소하며 독성이 강해지는 경향을 나타내었다(Table 12).



Table 12. LC₁₀, LC₅₀, LC₉₀ values according to NO₂-N concentrations (mg/L) of *Anguilla japonica* (96 h)

pH	Time (hr)	LC ₁₀ (mg/L)	LC ₅₀ (mg/L)	LC ₉₀ (mg/L)
8.0	24			
	48	1,543	7,176	12,810
	72	291	1,028	1,764
	96	219	711	1,202
7.0	24			
	48	526	2,113	3,701
	72	173	556	940
	96	70	296	522
6.0	24			
	48	104	314	524
	72	71	260	449
	96	64	188	312

1.1.3.3. 향어(*C. carpio*)

실험결과 TAN 독성에 따른 향어의 생존율은 pH 8 구간에서 65.3% (20 mg/L), 26.0% (40 mg/L), 0% (60 mg/L, 80 mg/L, 10 mg/L), pH 7 구간에서 87.3% (20 mg/L), 52.7% (40 mg/L), 33.3% (60 mg/L), 0% (80 mg/L, 100 mg/L), pH 6 구간에서 100.0% (20 mg/L), 90.7% (40 mg/L), 72.0% (60 mg/L), 39.3% (80 mg/L), 0% (100 mg/L)로 각각 나타났다 (Fig. 3.8.).



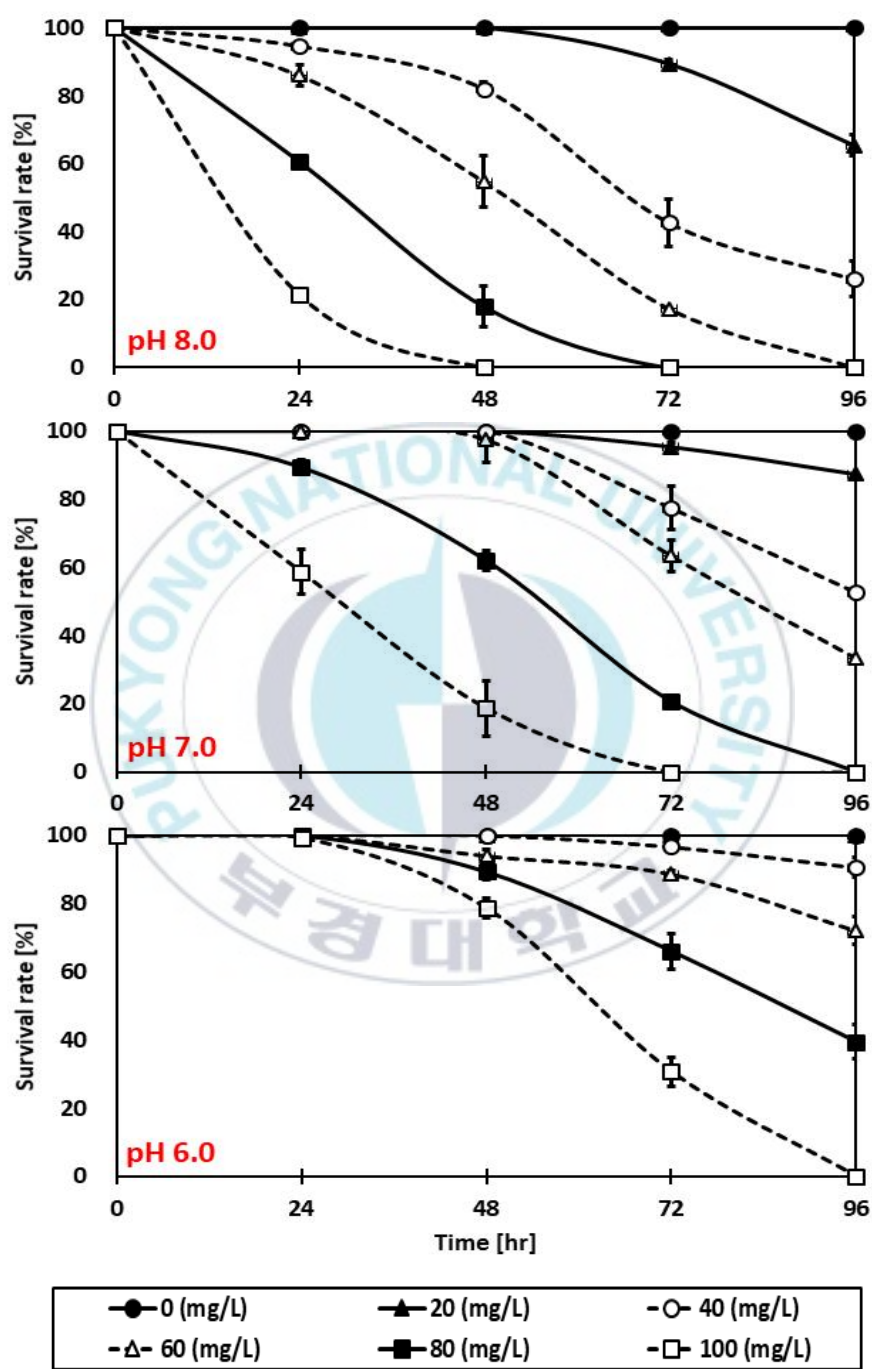


Fig. 3.8. Survival rate of *Cyprinus carpio* in response to total ammonia nitrogen concentration.

향어의 TAN 농도에 따른 24, 48, 72, 96시간별 LC_{50} 값은 pH 8 구간에서 86, 58, 56, 44 mg/L, pH 7 구간에서 171, 90, 59, 48 mg/L, pH 6 구간에서 10, 443, 261, 96, 67 mg/L로 각각 나타나 pH가 높고 노출시간이 길수록 LC_{10} , LC_{50} , LC_{90} 값이 감소하며 독성이 강해지는 경향이 나타났다(Table 13).



Table 13. LC₁₀, LC₅₀ and LC₉₀ values according to total ammonia nitrogen concentrations (mg/L) of *Cyprinus carpio* (96 h)

pH	Time (hr)	LC ₁₀ (mg/L)	LC ₅₀ (mg/L)	LC ₉₀ (mg/L)
8.0	24	33	86	140
	48	22	58	94
	72	18	56	95
	96	14	44	74
7.0	24	54	171	289
	48	36	90	143
	72	21	59	97
	96	15	48	82
6.0	24	2,110	10,443	18,776
	48	68	261	455
	72	35	96	158
	96	27	67	107

NO₂-N 독성에 따른 향어의 생존율은 pH 8 구간에서 100% (50 mg/L), 98.3% (100 mg/L), 89.2% (150 mg/L), 75.8% (200 mg/L), 55.8% (250 mg/L), pH 7 구간에서 100% (50 mg/L, 100 mg/L), 90% (150 mg/L), 60.8% (200 mg/L), 38.3% (250 mg/L), pH 6 구간에서 96.7% (50 mg/L), 98.3% (100 mg/L), 69.2% (150 mg/L), 40.8% (200 mg/L), 4.2% (250 mg/L)로 각각 나타났다(Fig. 3.9.).



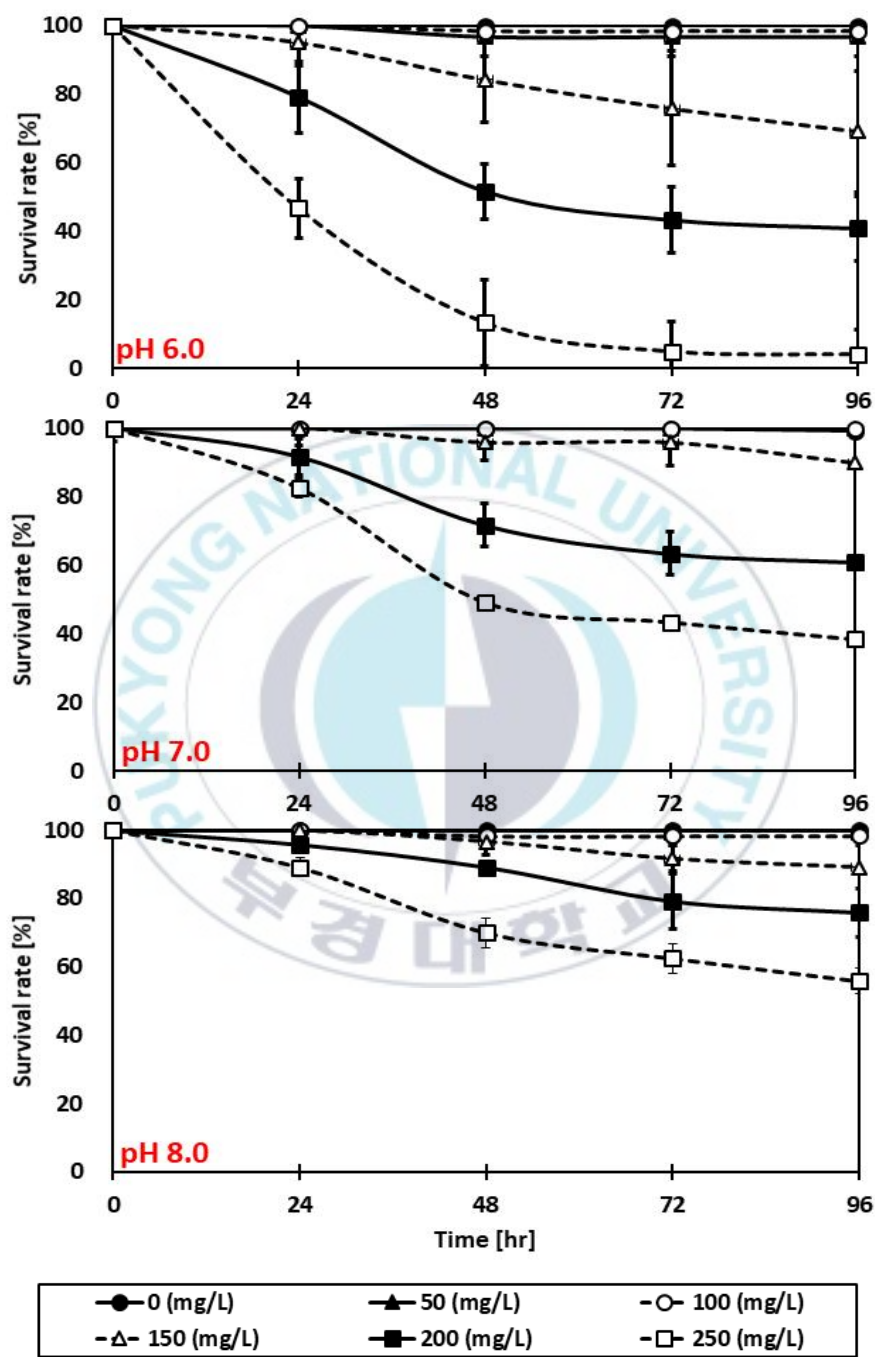


Fig. 3.9. Survival rate of *Cyprinus carpio* in response to $\text{NO}_2\text{-N}$ concentration

향어의 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도에 따른 24, 48, 72, 96시간별 LC_{50} 값은 pH 8 구간에서 1,372, 528, 388, 336 mg/L, pH 7 구간에서 836, 309, 274, 252 mg/L, pH 6 구간에서 318, 197, 178, 172 mg/L로 나타나 pH가 낮고 노출시간이 길수록 LC_{10} , LC_{50} , LC_{90} 값이 감소하며 농도에 관계없이 독성이 강해지는 경향을 나타내었다(Table 14).



Table 14. LC₁₀, LC₅₀ and LC₉₀ values according to NO₂-N concentrations (mg/L) of *Cyprinus carpio* (96 h)

pH	Time (hr)	LC ₁₀ (mg/L)	LC ₅₀ (mg/L)	LC ₉₀ (mg/L)
8.0	24	322	1,372	2,422
	48	147	528	908
	72	116	388	661
	96	105	336	568
7.0	24	214	836	1,458
	48	105	309	513
	72	98	274	450
	96	90	252	414
6.0	24	108	318	527
	48	77	197	317
	72	71	178	284
	96	69	172	276

1.1.3.4. 안전농도

실험 종료 후 LC_{50} 의 값을 이용하여 TAN과 NO_2-N 독성에 대한 안전농도를 계산 하였다. 메기의 안전농도는 pH 6에서 TAN 9.2 mg/L, NO_2-N 15.1 mg/L, pH 7에서 TAN 6.3 mg/L, NO_2-N 68.5 mg/L, pH 8에서 TAN 4.2 mg/L, NO_2-N 247 mg/L로 나타났다. 뱀장어의 안전농도는 pH 6에서 TAN 33.2 mg/L, NO_2-N 18.8 mg/L, pH 7에서 TAN 23.5 mg/L, NO_2-N 29.6 mg/L, pH 8에서 TAN 16.7 mg/L, NO_2-N 71.1 mg/L로 나타났다. 향어의 안전농도는 pH 6에서 TAN 6.7 mg/L, NO_2-N 6.9 mg/L, pH 7에서 TAN 4.8 mg/L, NO_2-N 9 mg/L, pH 8에서 TAN 4.4 mg/L, NO_2-N 10.5 mg/L로 나타났다(Table 15).

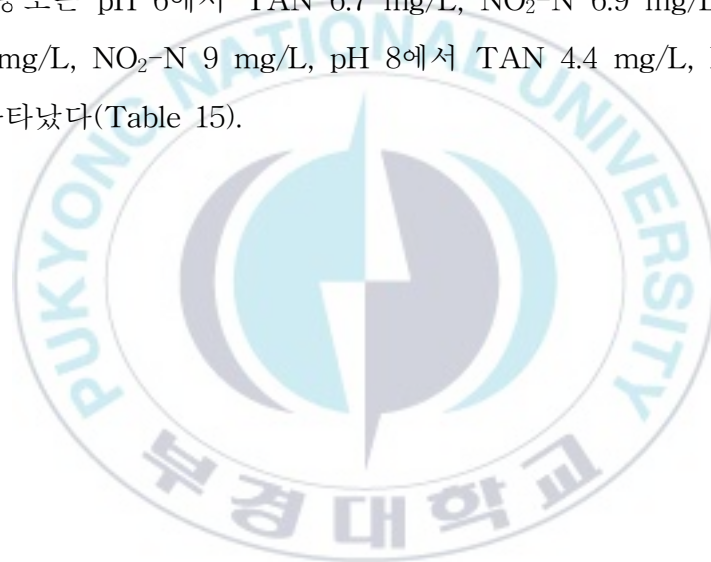


Table 15. Safety concentrations (mg/L) of *Silurus asotus*, *Anguilla japonica* and *Cyprinus carpio* (96 h)

Species	pH	TAN (mg/L)		NO ₂ -N (mg/L)	
		LC ₅₀ (96 h)	S.C. ¹	LC ₅₀ (96 h)	S.C.
<i>S. asotus</i>	6	92	9.2	151	15.1
	7	63	6.3	685	68.5
	8	42	4.2	2,470	247
<i>A. japonica</i>	6	332	33.2	188	18.8
	7	235	23.5	296	29.6
	8	167	16.7	711	71.1
<i>C. carpio</i>	6	67	6.7	69	6.9
	7	48	4.8	90	9
	8	44	4.4	105	10.5

¹Safety concentration (S.C.) = LC₅₀ * 0.1

1.2. BFT 사육관리 요인에 따른 성장 및 특징

1.2.1. 사육수온에 따른 BFT 적용 어류의 성장 및 미생물 NGS 분석

1.2.1.1. 메기(*S. asotus*)

온도에 따른 메기의 성장도 비교결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 총 무게는 30℃에서 26.3 ± 0.13 kg, 25℃에서 24.4 ± 0.52 kg, 20℃에서 21.6 ± 0.65 kg 순으로 나타났으며, 증체율과 사료전환효율은 30℃에서 $106.8 \pm 5.18\%$, 1.3 ± 0.08 , 25℃에서 $91.6 \pm 0.13\%$, 1.5 ± 0.06 , 20℃에서 $69.9 \pm 2.18\%$, 2 ± 0.13 로 나타났으며, 20℃, 25℃에서는 생존율이 $100 \pm 0.0\%$ 로 나타났으나, 30℃에서는 비정상 성장개체의 공식으로 인해 $97.6 \pm 1.33\%$ 로 나타났다 (Table 16).

수질환경은 Table 17에 나타내었으며, 총 암모니아성 질소 및 아질산성 질소의 수치는 20℃에서 0.3 ± 0.12 mg/L, 0.4 ± 0.10 mg/L, 25℃에서 0.4 ± 0.28 mg/L, 0.5 ± 0.21 mg/L, 30℃에서 0.5 ± 0.35 mg/L, 0.5 ± 0.19 mg/L로 실험구 모두 사육기간 동안 안정적으로 수질이 유지되었다.

Table 16. The growth performance of *Silurus asotus* according to different temperature on BFT for 4 weeks

Parameter	20 °C	25 °C	30 °C	<i>P</i> value
Average total length (mm)	244.6±8.89 ^a	270.8±7.92 ^{a,b}	287±8.11 ^b	0.011
Average total weight (kg)	21.6±0.65 ^a	24.4±0.52 ^{a,b}	26.3±0.13 ^{a,b}	0.008
Average body weight (g)	113±8.24 ^a	127.4±9.77 ^{a,b}	137.5±11.15 ^b	0.009
¹ Weight gain rate (%)	69.9±2.18 ^a	91.6±0.13 ^{a,b}	106.8±5.18 ^b	0.015
² Survival rate (%)	100±0.0	100±0.0	97.6±1.33	NS
³ FCR	2±0.13 ^a	1.5±0.06 ^{a,b}	1.3±0.08 ^b	0.021

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²Survival rate (%)= (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

³FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$). NS, no significant ($P\geq 0.5$).

Table 17. Water quality measurements of *Silurus asotus* according to different temperature on BFT for 4 weeks

Parameter	20 °C	25 °C	30 °C	P value
DO (mg/L)	8.6±0.50	7.8±1.21	7.6±0.43	NS
pH	5.9±1.12	6.5±0.81	6.1±0.91	NS
TAN (mg/L)	0.3±0.12 ^a	0.4±0.28 ^{a,b}	0.5±0.35 ^{a,b}	0.021
NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.4±0.10	0.5±0.21	0.5±0.19	NS

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.5$).

1.2.1.2. 뱀장어(*A. japonica*)

온도에 따른 뱀장어의 성장도 비교결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 총 무게는 30℃에서 16.6 ± 0.26 kg, 25℃에서 16.4 ± 0.29 kg, 20℃에서 15.9 ± 0.11 kg 순으로 나타났으며 증체율과 사료전환효율은 30℃에서 $30.8 \pm 2.29\%$, 2.7 ± 0.07 , 25℃에서 $29.3 \pm 4.48\%$, 2.9 ± 0.11 , 20℃에서 $25.0 \pm 3.33\%$, 3.4 ± 0.18 로 나타났다(Table 18).

수질환경은 Table 19에 나타내었으며, 총 암모니아성 질소 및 아질산성 질소의 수치는 20℃에서 0.4 ± 0.33 mg/L, 0.4 ± 0.31 mg/L, 25℃에서 0.6 ± 0.33 mg/L, 0.5 ± 0.32 mg/L, 30℃에서 0.5 ± 0.31 mg/L, 0.4 ± 0.20 mg/L로 실험구 모두 사육기간 동안 안정적으로 수질이 유지되었다.

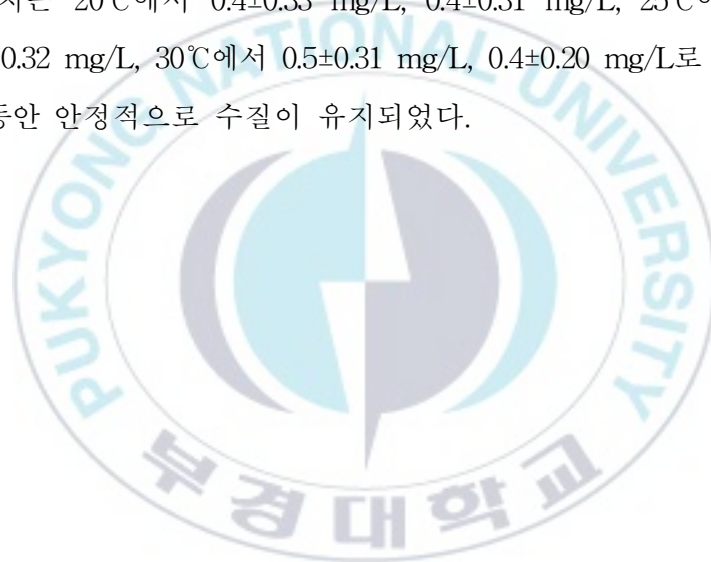


Table 18. The growth performance of *Anguilla japonica* according to different temperature on BFT for 4 weeks

Parameter	20 °C	25 °C	30 °C	<i>P</i> value
Average total length (mm)	419.6±15.33 ^a	426.1±13.12 ^{a,b}	431.26±13.43 ^{a,b}	0.005
Average total weight (kg)	15.9±0.11 ^a	16.4±0.29 ^{a,b}	16.6±0.26 ^{a,b}	0.004
Average body weight (g)	130.1±8.73 ^a	134.6±4.38 ^{a,b}	136.1±8.19 ^{a,b}	0.015
¹ Weight gain rate (%)	25.0±3.33 ^a	29.3±4.48 ^b	30.8±2.29 ^b	0.012
² Survival rate (%)	100±0.0	100±0.0	100±0.0	NS
³ FCR	3.4±0.18 ^a	2.9±0.11 ^{a,b}	2.7±0.07 ^{a,b}	0.008

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²Survival rate (%)= (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

³FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.5$).

Table 19. Water quality measurements of *Anguilla japonica* according to different temperature on BFT for 4 weeks

Parameter	20 °C	25 °C	30 °C	<i>P</i> value
DO (mg/L)	9.8±0.61	8.7±2.12	8.2±0.64	NS
pH	6.1±0.42	6.2±0.53	6.2±1.22	NS
TAN (mg/L)	0.4±0.33	0.6±0.33	0.5±0.31	NS
NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.4±0.31	0.5±0.32	0.4±0.20	NS

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.5$).

1.2.1.3. 향어(*C. carpio*)

온도에 따른 향어의 성장도 비교결과, 총 무게는 24℃에서 3 ± 0.07 kg, 26℃에서 3 ± 0.18 kg, 22℃에서 2.7 ± 0.08 kg, 28℃에서 2.6 ± 0.19 kg, 20℃에서 2.5 ± 0.28 kg, 30℃에서 2.3 ± 0.38 kg 순으로 나타났으며 증체율과 사료전환효율은 24℃에서 $53.1\pm1.17\%$, 1.1 ± 0.11 , 26℃에서 $49.5\pm2.08\%$, 1.2 ± 0.12 , 28℃에서 $31.7\pm4.22\%$, 1.9 ± 0.23 , 22℃에서 $31.2\pm1.45\%$, 1.9 ± 0.28 , 20℃에서 $25.5\pm3.38\%$, 2.4 ± 0.37 , 30℃에서 $14.9\pm2.67\%$, 4 ± 0.28 로 나타났다. 그러나, 26℃의 개체평균은 8.2 ± 0.20 g, 28℃의 개체 평균은 8.2 ± 0.61 g로 비슷한 수준의 값이 나타났으나, 28℃의 생존율은 $87.4\pm4.2\%$, 또한 30℃의 생존율은 $85.5\pm5.7\%$ 로 나타나 26℃ 보다 높은 수온의 적용은 나머지 수온별 실험구에 비해 낮은 생존율이 나타났다(Table 20).

수질환경은 Table 21에 나타내었으며, 총 암모니아성 질소 및 아질산성 질소의 수치는 20℃에서 0.6 ± 0.33 mg/L, 3.0 ± 0.11 mg/L, 22℃에서 0.5 ± 0.40 mg/L, 2.1 ± 0.45 mg/L, 24℃에서 0.6 ± 0.27 mg/L, 0.5 ± 0.22 mg/L, 26℃에서 0.3 ± 0.07 mg/L, 0.5 ± 0.30 mg/L, 28℃에서 0.6 ± 0.35 mg/L, 0.7 ± 0.51 mg/L, 30℃에서 0.6 ± 0.36 mg/L, 0.3 ± 0.14 mg/L로 나타나 총 암모니아성 질소 수치는 안정적으로 유지되었으며, 아질산성 질소의 경우 20℃와 22℃가 나머지 실험구에 비해 유의한 차이가 나타났다.

Table 20. The growth performance of *Cyprinus carpio* according to different temperature on BFT for 4 weeks

Parameter	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C	28 °C	30 °C	<i>P</i> value
Average total length (mm)	68.2±0.21 ^a	72.9±0.11 ^{a,b}	80.3±1.22 ^b	81.2±0.88 ^b	80.3±0.27 ^b	75.2±0.18 ^{a,b}	0.005
Average total weight (kg)	2.5±0.28 ^{a,b}	2.7±0.08 ^{a,b}	3±0.07 ^b	3±0.18 ^b	2.6±0.19 ^{a,b}	2.3±0.38 ^a	0.012
Average body weight (g)	6.8±0.22 ^a	7.5±0.13 ^{a,b}	8.3±0.11 ^b	8.2±0.20 ^b	8.2±0.61 ^b	7.1±1.12 ^{a,b}	0.008
¹ Weight gain rate (%)	25.5±3.38 ^{a,b}	31.2±1.45 ^{a,b}	53.1±1.17 ^b	49.5±2.08 ^b	31.7±4.22 ^{a,b}	14.9±2.67 ^a	0.011
³ Survival rate (%)	99.1±0.43 ^a	100±0.0 ^a	100±0.0 ^a	100±0.0 ^a	87.4±4.22 ^b	85.5±5.67 ^b	0.023
³ FCR	2.4±0.37 ^{a,b}	1.9±0.28 ^{a,b}	1.1±0.11 ^a	1.2±0.12 ^a	1.9±0.23 ^{a,b}	4±0.28 ^b	0.015

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²Survival rate (%)= (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

³FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$).

Table 21. Water quality measurements of *Cyprinus carpio* according to different temperature on BFT for 4 weeks

Parameter	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C	28 °C	30 °C	<i>P</i> value
DO (mg/L)	8.6±0.51	7.8±1.22	7.6±0.43	7.2±0.51	6.9±0.40	6.9±0.42	NS
pH	5.9±1.04	6.5±1.13	6.1±1.42	5.9±1.28	6.1±1.12	6.1±0.49	NS
TAN (mg/L)	0.6±0.27 ^a	0.5±0.38 ^a	0.6±0.27 ^a	0.3±0.12 ^b	0.6±0.42 ^a	0.6±0.31 ^a	0.021
NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	3.0±0.11 ^a	2.1±0.45 ^a	0.5±0.22 ^b	0.5±0.30 ^b	0.7±0.51 ^{a,b}	0.3±0.14 ^b	0.014

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.05$).

1.2.1.4. BFT 사육수 NGS 분석

0, 2, 4주차 메기, 뱀장어 BFT 사육수의 de novo OTU picking 분석 결과, 총 39개 샘플에서 1,137종의 미생물을 확인하였으며, BFT 배양수 및 사육수에 있어서 미생물 종의 다양성은 4주차 BFT 배양수에서 가장 높으며, 2주차 BFT 배양수, 뱀장어 BFT 사육수, 0주차 BFT 배양수, 메기 BFT 사육수 순으로 높게 나타났다(Fig. 3.10.).



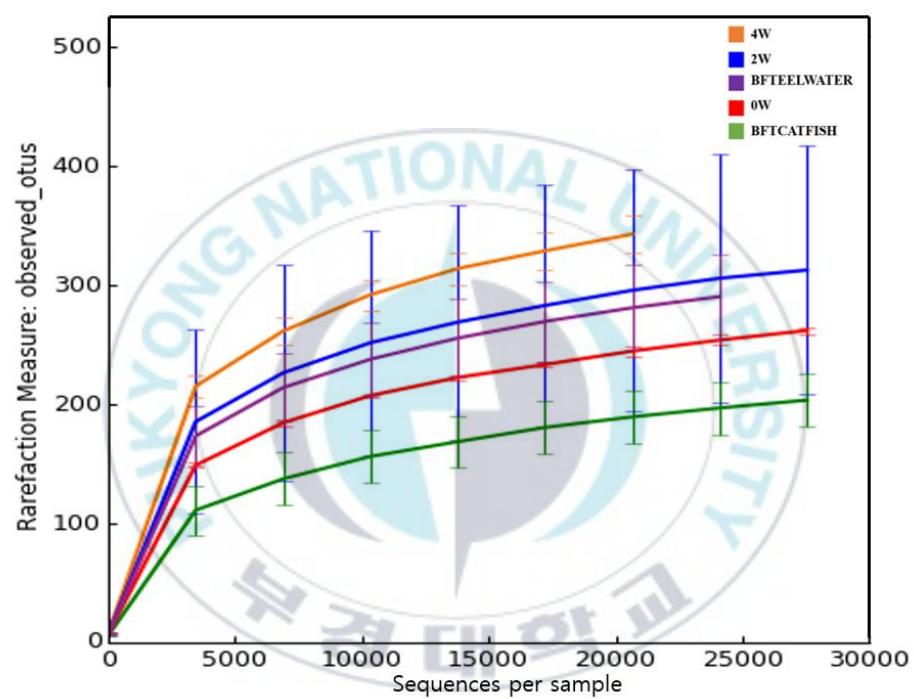


Fig. 3.10. Species diversity of microorganisms in BFT inoculate water and breeding water.

2주차 BFT 배양수의 겨우 온도가 높아질수록 문 단위(Phylum level)에서 Bacterioidetes의 총량은 줄어들고 Proteobacteria의 총량은 증가하는 경향이 나타났다(Fig. 3.11.).



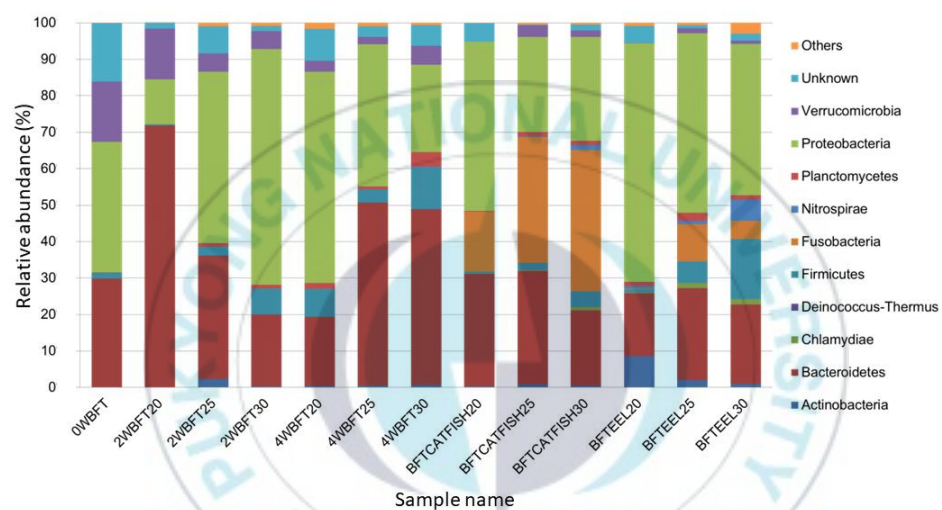


Fig. 3.11. Analysis of microorganisms in BFT breeding water according to different temperature and species (*Silurus asotus* and *Anguilla japonica*).

그러나 4주차 BFT 배양수의 경우, 온도가 높아질수록 Bacteroidetes의 총량은 증가하지만 Proteobacteria의 총량은 감소하는 경향을 보였다. 메기 사육수의 경우 온도가 높아질수록 Fusobacteria의 총량이 높아지고, 뱀장어 사육수의 경우 온도가 높아질수록 Proteobacteria의 총량은 줄고, Firmicutes의 총량은 높아지는 경향이 나타났으며, 3D PCoA (Principal coordinate analysis) 분석 결과 각 샘플의 유의한 차이는 나타나지 않았으며, 온도와 관계없이 뱀장어와 메기 BFT 사육수 모두 높은 유사도가 나타났다(Fig. 3.12.).



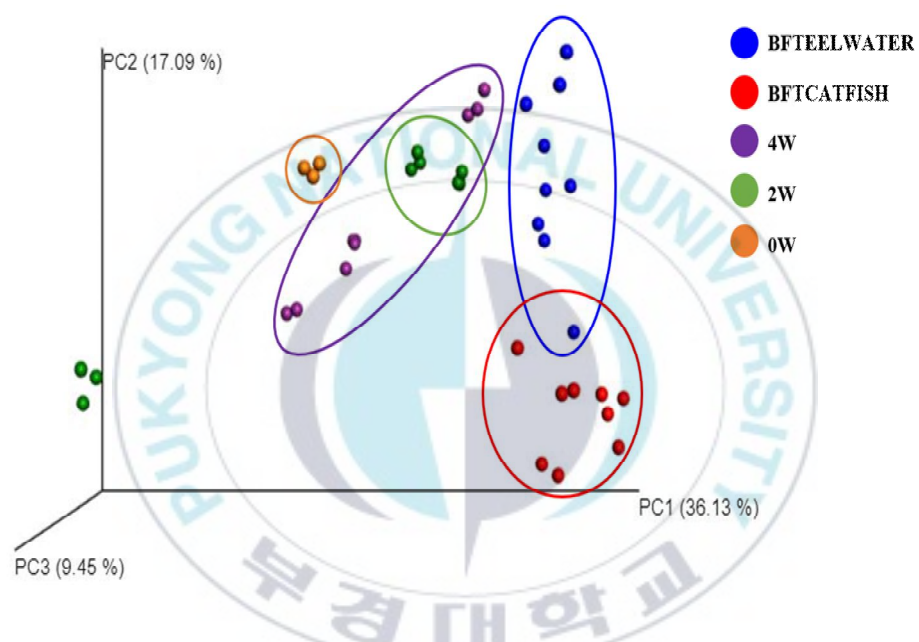


Fig. 3.12. Analysis of 3D PCoA of BFT breeding water.

1.2.2. 사육밀도에 따른 BFT 적용 어류의 성장비교

1.2.2.1. 메기(*S. asotus*)

실험결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 밀도가 가장 낮은 실험구인 0.5 kg/m²에서 증체율과 사료전환효율은 164.4±50.2%, 0.9±0.12로 성장률이 가장 높게 나타났다. 이어서 1 kg/m² (162.8±6.00%, 1.1±0.11), 5 kg/m² (148.9±6.88%, 1.2±0.08), 10 kg/m² (134.3±2.85%, 1.3±0.15) 20 kg/m² (91.1±10.31%, 1.9±0.16) 순으로 밀도가 낮을수록 증체율이 높고 사료전환효율은 낮은 값이 나타났다(Table 22).

수질환경 분석결과 총 암모니아성 질소 및 아질산성 질소의 수치는 0.5 kg/m²에서 0.3±0.18 mg/L, 0.3±0.15 mg/L, 1 kg/m²에서 0.4±0.20 mg/L, 0.7±0.35 mg/L, 5 kg/m²에서 0.6±0.43 mg/L, 0.1±0.06 mg/L, 10 kg/m²에서 0.5±0.33 mg/L, 0.2±0.12 mg/L, 20 kg/m²에서 0.8±0.18 mg/L, 0.5±0.23 mg/L로 나타나 사육기간 동안 모든실험구에서 안정적으로 유지되었다(Table 23).

Table 22. The growth performance of *Silurus asotus* according to different density on BFT for 4 weeks

Parameter	0.5 kg/m ²	1 kg/m ²	5 kg/m ²	10 kg/m ²	20 kg/m ²	<i>P</i> value
Average total length (mm)	125.8±4.11	120.7±2.22	120.1±3.20	120.2±2.81	120.1±3.62	NS
Average body weight (g)	22.1±0.52 ^a	21.6±0.80 ^a	20.3±0.45 ^{a,b}	19.5±0.57 ^{a,b}	15.9±0.38 ^b	0.010
Initial average total weight (kg)	1.27±0.013	2.54±0.010	12.70±0.021	25.40±0.012	50.80±0.033	NA
Final average total weight (kg)	3.1±0.21	6.4±0.13	30.1±0.91	56.9±0.72	91.8±5.00	NA
¹ Weight gain rate (%)	164.4±5.02 ^a	162.8±6.00 ^a	148.9±6.88 ^{a,b}	134.3±2.85 ^{a,b}	91.1±10.31 ^b	0.018
² FCR	0.9±0.12 ^a	1.1±0.11 ^{a,b}	1.2±0.08 ^{a,b}	1.3±0.15 ^{a,b}	1.9±0.16 ^b	0.013

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$). NS. no significant ($P\geq 0.5$). NA, not applicapable.

Table 23. Water quality measurements of *Silurus asotus* according to different density on BFT for 4 weeks

Parameter	0.5 kg/m ²	1 kg/m ²	5 kg/m ²	10 kg/m ²	20 kg/m ²	P value
Temperature (°C)	29.6±1.12	29.5±0.63	29±0.65	29.4±0.56	29.3±0.56	NS
DO (mg/L)	8.3±0.78	6.9±1.63	8.2±0.88	6.7±1.07	6.8±2.65	NS
pH	7±0.42	6.6±0.41	6.6±0.18	6.3±0.38	6.7±0.39	NS
TAN (mg/L)	0.3±0.18 ^a	0.4±0.20 ^a	0.6±0.43 ^{a,b}	0.5±0.33 ^{a,b}	0.8±0.18 ^b	0.022
NO ₂ -N (mg/L)	0.3±0.15 ^{a,b}	0.7±0.35 ^b	0.1±0.06 ^a	0.2±0.12 ^a	0.5±0.23 ^{a,b}	0.018

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS. no significant ($P\geq 0.5$).

1.2.2.2. 뱀장어(*A. japonica*)

실험결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 밀도가 가장 낮은 실험구인 1 kg/m²에서 증체율과 사료전환효율은 134.2±4.17%, 1.1±0.15로 가장 높게 나타났다. 이어서 3 kg/m² (88.4±2.20%, 1.6±0.08), 5 kg/m² (81.9±3.06%, 1.7±0.17) 순으로 밀도가 낮을수록 성장도가 높고 사료전환효율은 낮은 값이 나타났다(Table 24).

수질환경 분석결과 총 암모니아성 질소 및 아질산성 질소의 수치는 1 kg/m²에서 0.4±0.15 mg/L, 0.3±0.12 mg/L, 3 kg/m²에서 0.7±0.22 mg/L, 0.2±0.13 mg/L, 5 kg/m²에서 0.6±0.27 mg/L, 0.5±0.08 mg/L로 나타나 사육기간 동안 모든 실험구에서 안정적으로 유지되었다.

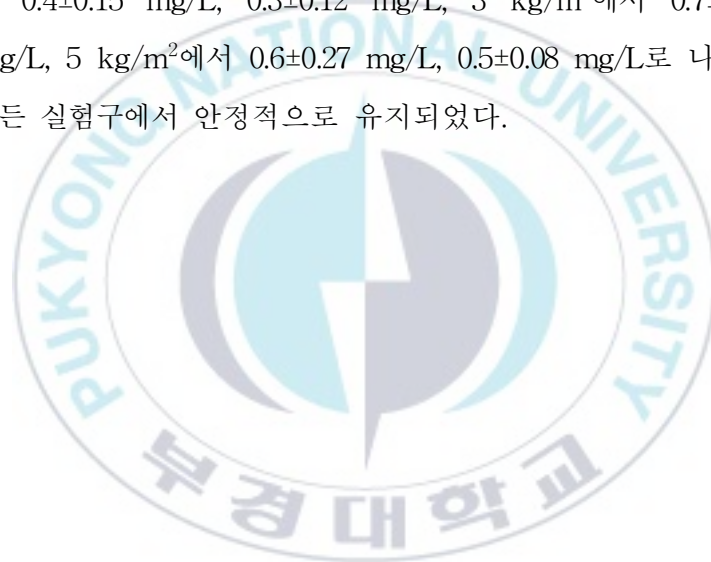


Table 24. The growth performance of *Anguilla japonica* according to different density on BFT for 4 weeks

Parameter	1 kg/m ²	3 kg/m ²	5 kg/m ²	P value
Average total length (mm)	125.8±4.11 ^b	120.7±2.18 ^a	120.1±3.17 ^a	0.008
Average body weight (g)	19.1±4.41 ^b	15.3±7.48 ^a	14.8±7.85 ^a	0.021
Initial average total weight (kg)	0.79±0.010	2.37±0.013	3.95±0.014	NA
Final average total weight (kg)	1.9±0.21	4.5±0.17	7.2±0.29	NA
¹ Weight gain rate (%)	134.2±4.17 ^a	88.4±2.20 ^{a,b}	81.9±3.06 ^b	0.012
² FCR	1.1±0.15 ^a	1.6±0.08 ^b	1.7±0.17 ^b	0.025

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$). NA, not applicapable.

Table 25. Water quality measurements of *Anguilla japonica* according to different density on BFT for 4 weeks

Parameter	1 kg/m ²	3 kg/m ²	5 kg/m ²	<i>P</i> value
Temperature (°C)	29.8±0.15	29.2±0.22	29.1±0.41	NS
DO (mg/L)	10.2±0.22	9.3±0.91	9.9±0.64	NS
pH	6.9±0.34	6.5±1.03	6.5±0.93	NS
TAN (mg/L)	0.4±0.15 ^a	0.7±0.22 ^b	0.6±0.27 ^b	0.028
NO ₂ -N (mg/L)	0.3±0.12 ^a	0.2±0.13 ^a	0.5±0.08 ^b	0.021

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS. no significant ($P\geq 0.5$).

1.2.2.3. 향어(*C. carpio*)

실험결과, 질병이나 기생충 등으로 인한 폐사는 발견되지 않았으며, 밀도가 가장 낮은 실험구인 0.5 kg/m²에서 증체율과 사료전환효율은 92.7±3.12%, 1.2±0.06로 가장 높게 나타났다. 이어서 1 kg/m² (88.9±2.88%, 1.3±0.06), 5 kg/m² (80.1±4.57%, 1.5±0.24), 10 kg/m² (67.9±10.11%, 1.8±0.16), 20 kg/m² (65.9±5.12%, 1.9±0.15) 순으로 밀도가 낮을수록 성장도가 높고 사료전환효율은 낮은 값이 나타났다(Table 26).

수질환경 분석결과 총 암모니아성 질소 및 아질산성 질소의 수치는 0.5 kg/m²에서 0.4±0.22 mg/L, 0.5±0.08 mg/L, 1 kg/m²에서 0.4±0.11 mg/L, 0.4±0.27 mg/L, 5 kg/m²에서 0.6±0.29 mg/L, 0.2±0.12 mg/L, 10 kg/m²에서 0.8±0.18 mg/L, 0.1±0.04 mg/L, 20 kg/m²에서 0.7±0.26 mg/L, 0.9±0.15 mg/L로 나타나 사육기간 동안 안정적으로 유지되었다.

Table 26. The growth performance of *Cyprinus carpio* according to different density on BFT for 4 weeks

Parameter	0.5 kg/m ²	1 kg/m ²	5 kg/m ²	10 kg/m ²	20 kg/m ²	<i>P</i> value
Average total length (mm)	110.2±4.18 ^a	111.3±5.12 ^a	107.2±8.22 ^a	103.4±6.10 ^{a,b}	103±6.28 ^{a,b}	0.015
Average body weight (g)	16.8±0.11 ^a	17.5±0.21 ^a	15.7±0.20 ^{a,b}	14.8±0.14 ^{a,b}	14.6±0.17 ^{a,b}	0.019
Initial average total weight (kg)	1.27±0.004	2.54±0.003	12.70±0.002	25.40±0.002	50.80±0.006	NA
Final average total weight (kg)	2.4±0.11	4.6±0.08	21.7±0.17	40.4±0.12	79.8±0.43	NA
¹ Weight gain rate (%)	92.7±3.12 ^a	88.9±2.88 ^{a,b}	80.1±4.57 ^{a,b}	67.9±10.11 ^b	65.9±5.12 ^b	0.013
² FCR	1.2±0.06 ^a	1.3±0.06 ^a	1.5±0.24 ^{a,b}	1.8±0.16 ^b	1.9±0.15 ^b	0.028

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight)-(Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different (*P*<0.05). NA, not applicable.

Table 27. Water quality measurements of *Cyprinus carpio* according to different Density on BFT for 4 weeks

Parameter	0.5 kg/m ²	1 kg/m ²	5 kg/m ²	10 kg/m ²	20 kg/m ²	P value
Temperature (°C)	25.6±1.08	25.5±0.62	25±0.71	25.4±0.58	25.3±0.46	NS
DO (mg/L)	8.3±0.78	6.9±1.61	8.2±0.92	6.7±1.10	6.8±2.71	NS
pH	7±0.42	5.6±0.78	6.6±0.56	5.6±0.66	6.7±0.72	NS
TAN (mg/L)	0.4±0.22 ^a	0.4±0.11 ^a	0.6±0.29 ^{a,b}	0.8±0.18 ^{a,b}	0.7±0.26 ^{a,b}	0.019
NO ₂ -N (mg/L)	0.5±0.08 ^{a,b}	0.4±0.27 ^{a,b}	0.2±0.12 ^a	0.1±0.04 ^a	0.9±0.15 ^b	0.025

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS. no significant ($P\geq 0.5$).

1.2.3. TSS 제거에 따른 성장비교

실험결과, TSS 제거에 따른 향어의 성장비교결과 증체률은 TSS 제거필터를 설치한 실험구에서 $65.6 \pm 7.6\%$ 로 필터를 설치하지 않은 실험구 ($52.9 \pm 3.7\%$)에 비해 약 18.2%가 개선된 효과가 나타났으며, 사료전환효율 또한 TSS 제거필터를 설치한 실험구에서 1.1 ± 0.1 로 나타나 제거하지 않은 실험구(1.4 ± 0.1)보다 낮게 나타났다(Table 28).

TSS의 농도는 제거 필터가 설치가 되지 않은 대조구의 경우, 평균 127 ± 22.4 mg/L로 점점 증가하는 경향을 보였으며, 최고값이 169.7 ± 19.9 mg/L까지 나타났다. TSS 제거 필터 실험구 TSS 농도의 평균은 54.2 ± 11 mg/L로 1/3 수준의 값이 나타났으며, 최고 79.1 ± 2.1 mg/L의 값이 나타났으나, 실험기간 동안 대조구보다 낮은 값을 유지하였다(Fig. 3.13.).

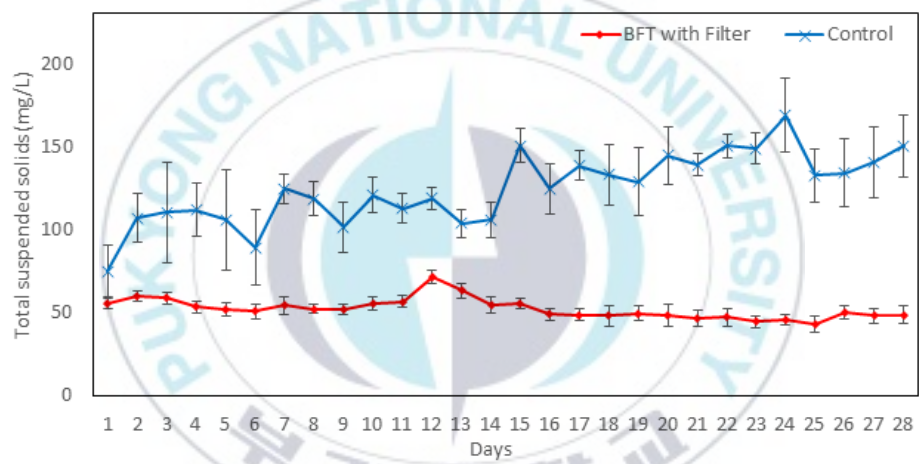


Fig. 3.13. TSS concentration of *Cyprinus carpio* in BFT and BFT with TSS removal filter for 4 weeks.

Table 28. The growth performance of *Cyprinus carpio* in BFT installed with TSS removal filter for 4 weeks

Parameter	BFT installed with TSS removal filter	Control (BFT)	<i>P</i> value
Average total length (mm)	108.5±1.52	101.3±1.75	NS
Final average total weight (kg)	3.1±0.12*	2.8±0.13	0.035
Average body weight (g)	16.4±0.48*	14.2±0.47	0.017
¹ Weight gain rate (%)	65.6±7.63*	52.9±3.71	0.012
² SGR (%/day)	1.9±0.13*	1.5±0.17	0.015
³ Survival rate (%)	100±0.0	100±0.0	NS
⁴ FCR	1.1±0.08*	1.4±0.12	0.012

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FC (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. * means significantly different ($P<0.05$). NS, no significant ($P\geq 0.5$).

1.2.4. 고밀도 사육을 위한 BFT 적용 및 양식장과의 비교

실험결과 메기의 증체율은 BFT에서 $140.7 \pm 5.23\%$, 일반 양식장에서 241.6% 로 나타났으며, 향어의 증체율은 BFT에서 $91.7 \pm 2.83\%$, 일반 양식장에서 128% 로 나타났다. BFT 적용 시, 일반 양식장에 비해 낮은 성장률이 나타났다. 그러나, 사료계수의 경우, BFT 적용 메기에서는 1.1 ± 0.13 으로 나타났으며, 일반 양식장에서는 1.14 로 나타나 사료효율이 개선되었으며, BFT적용 향어에서도 1.4 ± 0.12 로 일반양식장의 2.3 에 비해 낮게 나타나 BFT 적용 시 사료효율성이 개선된 효과가 나타났다. 또한 메기와 향어 모두 바닥 면적대비 일반 양식장(메기: 0.73 kg/m^2 , 향어: 0.60 kg/m^2) 보다 BFT(메기 : $21.3 \pm 0.04 \text{ kg/m}^2$, 향어 : $13.7 \pm 0.08 \text{ kg/m}^2$)에서 높은 밀도가 나타나 많은 생산량이 나타나, BFT 적용 시 노지양식에 비해 고밀도로 사육할 수 있는 가능성이 나타났다(Table 29).

Table 29. Comparisons of the growth performances of BFT and fish farm (*Silurus asotus* and *Cyprinus carpio*)

Species	Parameter	Fish farm	BFT	P value
<i>S. asotus</i>	Final average total weight (kg)	2429	228.78±1.4	NA
	Final average body weight (g)	25.5±0.45*	22.5±0.51	0.017
	Final density (kg/m ²)	0.73	21.3±0.04	NA
	¹ Weight gain rate (%)	241.6	140.7±5.23	NA
	² SGR (%/day)	4.1	2.9±0.14	NA
	³ FCR	1.14	1.1±0.13	NA
<i>C. carpio</i>	Final average total weight (kg)	233	147.5±1.42	NA
	Final average body weight (g)	58.3±6.79*	55.8±4.23	0.038
	Final average density (kg/m ²)	0.6	13.7±0.08	NA
	¹ Weight gain rate (%)	128	91.7±2.83	NA
	² SGR (%/day)	2.8	2.2±0.1	NA
	³ FCR	2.3	1.4±0.12	NA

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. * means significantly different ($P<0.05$). NA, not applicable.

2. BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템 적용 분석

2.1. NFT를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류의 성장 및 사육수 수질분석

2.1.1. 메기(*S. asotus*)

실험결과, BFT에서 증체율이 $98.4 \pm 0.63\%$ 로 대조구($50.4 \pm 4.70\%$)보다 높은 성장도가 나타났다. 생존율의 경우, 대조구는 초반 공식현상의 발생으로 생존율이 $80.1 \pm 6.15\%$ 로 나타났으며, BFT-AP의 경우 $95.1 \pm 2.78\%$ 로 BFT 기반의 아쿠아포닉스에서 생존율이 개선된 효과가 나타났다(Table 30)

식물의 경우, BFT-AP의 총 길이는 408 ± 25.2 mm로 가장 높게 나타났으며, 이어서 수경재배 388 ± 23.6 mm, 대조구에서 352 ± 22.2 mm로 나타났다. 총 무게의 경우 BFT-AP에서 145.6 ± 7.22 g으로 가장 높게 나타났으며, 이어서 수경재배에서 138.1 ± 0.67 g, 대조구에서 89.6 ± 11.81 g로 나타났다. 식물의 뿌리를 제외한 가식부(Shoot length)의 측정결과, BFT-AP에서 102.2 ± 3.12 mm, 수경재배에서 104.0 ± 13.92 mm, 대조구에서 87.6 ± 2.45 mm) 순으로 나타났으며, 상층부 무게(Shoot weight)는 BFT-AP에서 121.9 ± 6.25 g), 수경재배에서 120.5 ± 0.18 g, 대조구에서 75.5 ± 4.18 g 순으로 나타났으며, BFT와 수경재배와는 유의한 차이가 나타나지 않았다(Fig. 3.14., Table 31).

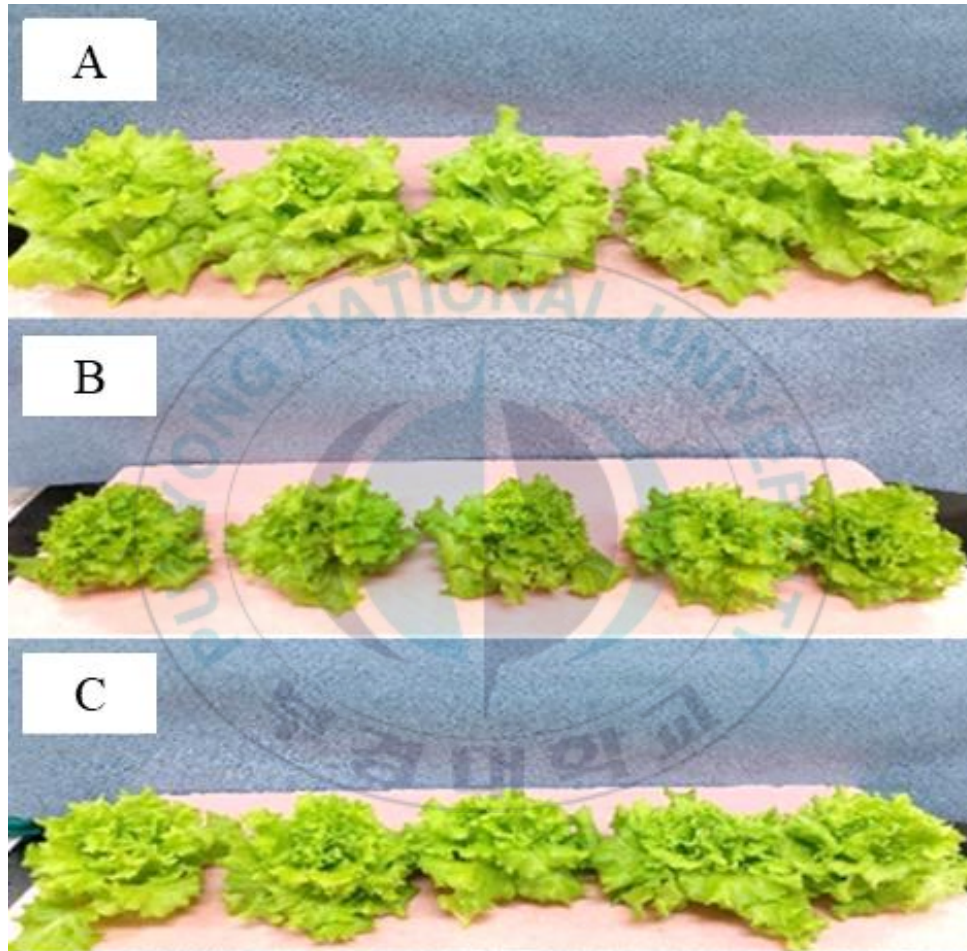


Fig 3.14. Caipira lettuce (*Lactuca sativa*) harvest of *Silurus asotus* coupled with nutrient film technique (NFT) aquaponics system (A: BFT-AP, B: Control-AP, C: Hydroponics).

2.1.2. 뱀장어(*A. japonica*)

실험결과, BFT에서 증체율이 $78.3 \pm 2.51\%$ 로 대조구($62.3 \pm 4.94\%$)보다 높은 성장도가 나타났다. 생존율의 경우, 모두 $100 \pm 0.0\%$ 로 나타났다(Table 30).

식물의 경우, BFT의 총 길이는 406 ± 18.5 mm로 가장 높게 나타났다. 이어서 수경재배 396 ± 20.2 mm, 대조구에서 355 ± 20.1 mm로 나타났으며, 총 무게의 경우 BFT에서 149.8 ± 5.67 g으로 가장 높게 나타났으며, 이어서 수경재배에서 140.1 ± 0.58 g, 대조구에서 92.1 ± 20.18 g으로 나타났다. 식물의 뿌리를 제외한 가식부(Shoot length)의 측정결과, BFT-AP에서 106.2 ± 2.48 mm, 수경재배에서 106.1 ± 1.29 mm, 대조구에서 82.6 ± 3.58 mm) 순으로 나타났으며, 상충부 무게(Shoot weight)는 BFT-AP에서 124.1 ± 8.21 g, 수경재배에서 122.6 ± 3.13 g, 대조구에서 79.2 ± 6.12 g 순으로 나타났으며, BFT와 수경재배와는 유의한 차이가 나타나지 않았다. (Table 31).

Table 30. The growth performances of *Silurus asotus* and *Anguilla japonica* coupled with 2 different (BFT, Control) aquaponics nutrient film technique (NFT) system for 4 weeks

Species	Parameter	Control-AP	BFT-AP	<i>P</i> value
<i>S. asotus</i>	Average total weight (kg)	8.7±0.51*	11.4±0.32	0.008
	Average body weight (g)	108.1±10.20*	120.5±2.12	0.012
	density (kg/m ²)	7.5±1.32*	9.9±0.41	0.010
	¹ Weight gain rate (%)	50.4±4.70*	98.4±0.63	0.005
	² SGR (%/day)	2.7±0.21*	3.2±0.12	0.013
	³ Survival rate (%)	80.1±6.15*	95.1±2.78	0.010
	⁴ FCR	2.3±0.17*	1.2±0.06	0.009
<i>A. japonica</i>	Average total weight (kg)	9.3±0.31*	10.3±0.21	0.011
	Average body weight (g)	80.3±6.58*	86.6±5.01	0.028
	density (kg/m ²)	8.1±0.12*	8.9±0.23	0.021
	¹ Weight gain rate (%)	62.3±4.94*	78.3±2.51	0.020
	² SGR (%/day)	1.8±0.08*	2.1±0.10	0.018
	³ Survival rate (%)	100±0.0	100±0.0	NS
	⁴ FCR	1.4±0.14*	1.1±0.05	0.021

¹Total growth rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. * means significantly different (*P*<0.05). NS, no significant (*P*≥0.05).

Table 31. The growth of Caipira lettuce (*Lactuca sativa*) coupled with 3 different nutrient film technique (NFT) aquaponics systems (Control-AP, BFT-AP, Hydroponics) for 4 weeks

	Parameter	Control-AP	BFT-AP	Hydroponics	<i>P</i> value
<i>S. asotus</i>	Total length (mm)	352±22.2	408±25.2	388±23.6	NS
	Shoot length (mm)	87.6±2.45 ^b	102.2±3.12 ^a	104.0±13.92 ^a	0.032
	Total weight (g)	89.6±11.81 ^b	145.6±7.22 ^a	138.1±0.67 ^a	0.028
	Shoot weight (g)	75.5±4.18 ^b	121.9±6.25 ^a	120.5±0.18 ^a	0.005
<i>A. japonica</i>	Total length (mm)	355±20.1	406±18.5	396±20.2	NS
	Shoot length (mm)	82.6±3.58 ^b	106.2±2.48 ^a	106.1±1.29 ^a	0.028
	Total weight (g)	92.1±20.18 ^b	149.8±5.67 ^a	140.1±0.58 ^a	0.031
	Shoot weight (g)	79.2±6.12 ^b	124.1±8.21 ^a	122.6±3.13 ^a	0.009

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$). NS, no significant ($P\geq 0.05$).

2.1.3. 수질분석

분석결과, NFT 적용 BFT 메기 아쿠아포닉스의 경우, 총 암모니아성 질소(TAN)의 경우, 평균 0.6 ± 0.25 mg/L, 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)는 평균 0.5 ± 0.23 mg/L, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 64.5 ± 22.38 mg/L로 나타났으며, 일반 BFT의 경우, TAN 0.6 ± 0.20 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 경우 0.4 ± 0.26 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 81.0 ± 15.75 로 나타났으며, BFT 메기 아쿠아포닉스의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 4일 차 최고 95.5 ± 5.60 mg/L의 값이 나타났지만, 20일 차에 최저치인 38.2 ± 3.80 mg/L이 나타났고, 3주 차 이후 다시 증가하는 모습이 나타났으며, 일반 BFT에 비해 마지막 측정 시 수치가 반 이상 감소하는 모습이 나타났다(Fig. 3.15.).



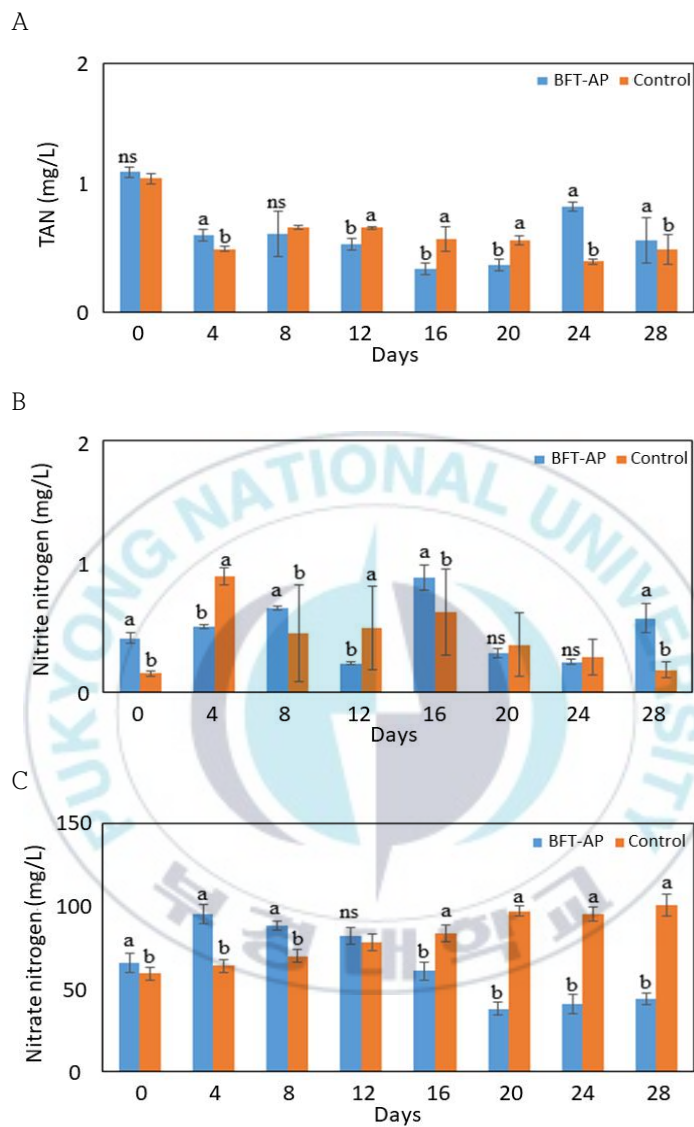
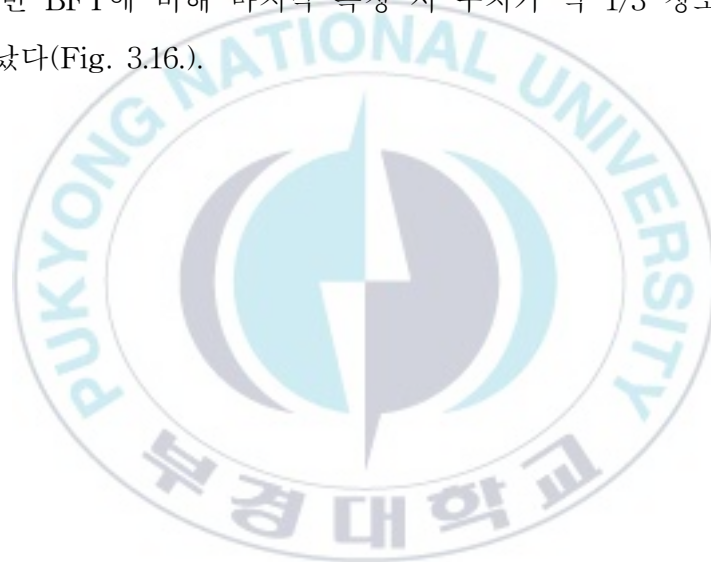
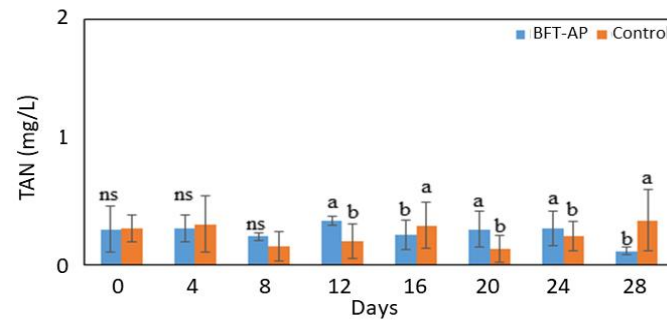


Fig. 3.15. Nitrogen variation of *Silurus asotus* coupled with nutrient film technique (NFT) aquaponics based on BFT (A: TAN, B: $\text{NO}_2\text{-N}$, C: $\text{NO}_3\text{-N}$). Data presented as a mean $\pm$ S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.05$).

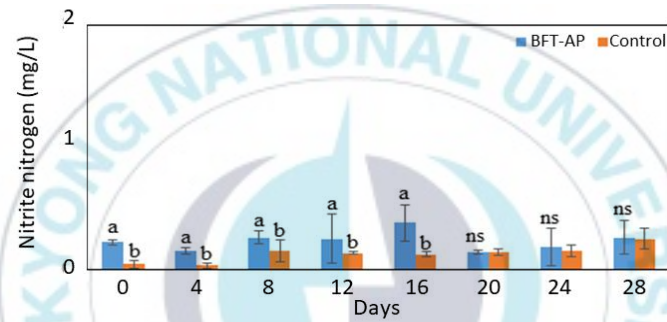
NFT 적용 BFT 뱀장어 아쿠아포닉스의 경우, 총 암모니아성 질소 (TAN)의 경우, 평균 0.3 ± 0.07 mg/L, 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)는 평균 0.2 ± 0.08 mg/L, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 83.0 ± 12.28 mg/L로 나타났으며, 일반 BFT의 경우, TAN 0.3 ± 0.09 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 경우 0.1 ± 0.07 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 96.6 ± 9.19 로 나타났으며, BFT 메기 아쿠아포닉스의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 4일차 100.8 ± 5.30 mg/L로 가장 높은 값이 나타났지만, 20일차에 66.0 ± 5.30 mg/L로 가장 낮게 나타났으며, 이후 다시 증가하는 모습이 나타났으며, 일반 BFT에 비해 마지막 측정 시 수치가 약 1/3 정도 감소한 모습이 나타났다(Fig. 3.16.).



A



B



C

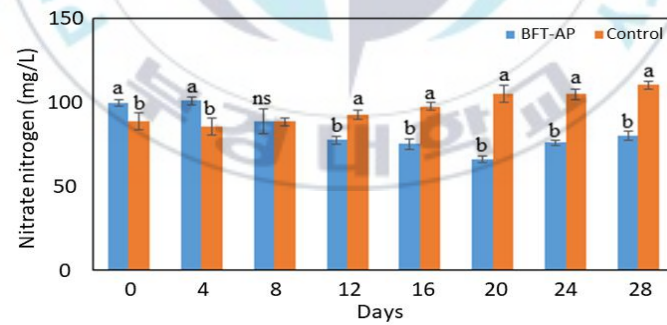


Fig. 3.16. Nitrogen variation of *Anguilla japonica* coupled with nutrient film technique (NFT) aquaponics based on BFT (A: TAN, B: NO₂-N, C: NO₃-N). Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.05$).

2.2. DWC를 이용한 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 어류와 작물의 성장, 사육수 수질 및 성분분석

2.2.1. 메기(*S. asotus*)

실험결과, BFT-AP 200에서 증체율과 사료전환효율은 $147.3 \pm 6.17\%$, 1.1 ± 0.22 로 나타났으며, 대조구는 $137.1 \pm 4.25\%$, 1.1 ± 0.23 로 나타나 BFT-AP 200에서 2배 이상 성장도가 개선된 효과가 나타났다. 생존율의 경우, BFT-AP 200에서 $98.5 \pm 0.33\%$ 로 나타났으며, 대조구는 $95.7 \pm 0.82\%$ 로 나타났다(Table 32).

식물의 경우, BFT-AP 200의 총 길이는 428 ± 68.5 mm, 총 무게는 162 ± 45.0 g, 상층부 길이는 219 ± 23.3 mm, 상층부 무게는 143 ± 45.7 g으로 나타났으며, 수경재배의 경우 총 길이는 406 ± 44.8 mm, 총 무게 158 ± 34.3 g, 상층부 길이 219 ± 25.5 mm, 상층부 무게 138 ± 32.6 g으로 나타나 BFT 기반의 아쿠아포닉스(DWC) 적용 시 식물 성장에도 개선된 효과가 나타났다(Table 33).

Table 32. The growth performance of *Silurus asotus* in BFT and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems for 4 weeks

Species	Parameter	BFT	BFT-AP 100	BFT-AP 200	P value
<i>S. asotus</i>	Average total weight (kg)	13.6±0.31 ^a	14.0±0.17 ^a	14.4±0.34 ^b	0.012
	Average total length (mm)	240.1±10.55	246.5±13.51	254.7±15.72	NS
	Average body weight (g)	116.9±5.25 ^a	119.1±4.81 ^{a,b}	121.4±5.13 ^{a,b}	0.027
	¹ Weight gain rate (%)	137.1±4.25 ^a	142.6±5.55 ^{a,b}	147.3±6.17 ^b	0.025
	² SGR(%/day)	3.1±0.12 ^a	3.2±0.23 ^{a,b}	3.2±0.63 ^b	0.009
	³ Survival rate (%)	95.7±0.82	97.4±1.61	98.5±0.33	NS
	⁴ FCR	1.1±0.23	1.1±0.43	1.1±0.22	NS

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FC (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.05$).

Table 33. The growth of Caipira lettuce (*Lactuca sativa*) in Hydroponics and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems by *Silurus asotus* for 4 weeks

Species	Parameter	Hydroponics	BFT-AP 100	BFT-AP 200	<i>P</i> value
<i>S. asotus</i>	Total length (mm)	406±44.8	405±25.7	428±68.5	NS
	Total weight (g)	158±34.3 ^a	150±7.1 ^b	162±45.0 ^a	0.038
	Shoot length (mm)	219±23.3 ^a	212±10.8 ^b	219±25.5 ^a	0.032
	Shoot weight (g)	138±32.6 ^a	136±15.5 ^a	143±45.7 ^b	0.044

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.05$).

2.2.2. 뱀장어(*A. japonica*)

실험결과, BFT-AP 200에서 증체율과 사료전환효율은 $178.4 \pm 5.06\%$, 0.9 ± 0.17 로 나타났으며, 대조구는 $100.8 \pm 2.48\%$, 1.6 ± 0.77 로 나타나 BFT-AP 200에서 약 1.5배 이상 성장도가 개선된 효과가 나타났다. 생존율의 경우, 모두 100%로 나타났다(Table 34).

식물의 경우, BFT-AP 200의 총 길이는 617 ± 26.7 mm, 총 무게는 206 ± 29.6 g, 상충부 길이는 219 ± 24.8 mm, 상충부 무게는 190 ± 32.5 g으로 나타났으며, 수정재배의 경우 총 길이는 614 ± 27.4 mm, 총 무게 200 ± 37.2 g, 상충부 길이 196 ± 21.7 mm, 상충부 무게 178 ± 35.7 g으로 나타나 뱀장어의 경우 BFT 기반의 아쿠아포닉스(DWC) 적용 시 폐기와 마찬가지로 개선된 결과 값이 나타났다(Table 35).

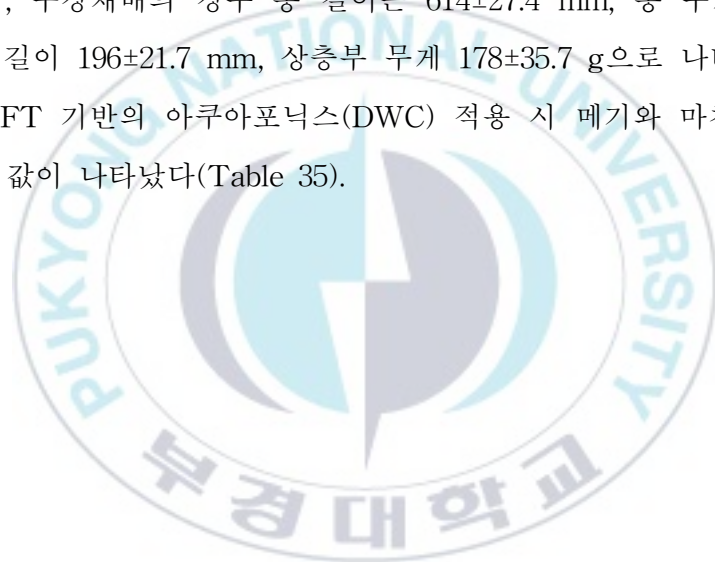


Table 34. The growth performance of *Anguilla japonica* in BFT and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems for 4 weeks

Species	Parameter	BFT	BFT-AP 100	BFT-AP 200	<i>P</i> value
<i>A. japonica</i>	Average total weight (kg)	11.5±0.62 ^a	13.6±0.64 ^b	14.2±0.04 ^b	0.010
	Average total length (mm)	149±10.7	154±7.8	154±8.6	NS
	Average body weight (g)	44.8±3.12 ^a	52.4±2.41 ^{a,b}	62.6±4.22 ^b	0.019
	¹ Weight gain rate (%)	100.8±2.48 ^a	136.2±1.35 ^{a,b}	178.4±5.06 ^b	0.031
	² SGR(%/day)	2.6±0.28 ^a	3.1±0.08 ^{a,b}	3.8±0.18 ^b	0.011
	³ Survival rate (%)	100±0.0	100±0.0	100±0.0	NS
	⁴ FCR	1.6±0.77 ^a	1.2±0.06 ^{a,b}	0.9±0.17 ^b	0.008

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P<0.05$), NS, no significant ($P\geq 0.05$).

Table 35. The growth of Caipira lettuce (*Lactuca sativa*) in Hydroponics and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems by *Anguilla japonica* for 4 weeks

Species	Parameter	Hydroponics	BFT-AP 100	BFT-AP 200	<i>P</i> value
<i>A. japonica</i>	Total length (mm)	614±70.4	604±57.2	617±26.7	NS
	Total weight (g)	200±37.2 ^a	188±32.7 ^b	206±29.6 ^a	0.029
	Shoot length (mm)	196±21.7 ^a	181±16.6 ^b	219±24.8 ^a	0.035
	Shoot weight (g)	178±35.7 ^a	168±30.8 ^{a,b}	190±32.5 ^b	0.031

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P < 0.05$). NS, no significant ($P \geq 0.05$).

2.2.3. 미꾸리(*M. anguillicaudatus*)

실험결과, BFT-AP에서 증체율과 생존율은 $51.1 \pm 3.65\%$, $91.6 \pm 2.55\%$ 로 나타났으며 이후 BFT $24 \pm 4.24\%$, $82.1 \pm 11.12\%$, 대조구 - $15.7 \pm 1.41\%$, $66.8 \pm 2.78\%$ 로 나타나 성장률은 BFT-AP에서 가장 개선된 효과가 나타났다. 생존률 또한 대조구에 비해 BFT-AP와 BFT에서 개선된 효과가 나타났다(Table 36).

식물의 경우, BFT-AP의 총 길이는 585 ± 8.3 mm, 총 무게는 183 ± 10.2 g, 상층부 길이는 220 ± 7.5 mm, 상층부 무게는 164 ± 8.8 g으로 나타났으며, 수경재배의 경우 총 길이는 557 ± 12.1 mm, 총 무게 169 ± 10.4 g, 상층부 길이 199 ± 10.2 mm, 상층부 무게 150 ± 9.3 g으로 나타나 미꾸라지의 BFT 기반의 아쿠아포닉스(DWC) 적용 시 식물성장에서도 개선된 효과가 나타났다(Table 37).

Table 36. The growth performance of *Misgurnus anguillicaudatus* in Sham-control (fresh water), BFT and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems for 4 weeks

Species	Parameter	Sham-control	BFT	BFT-AP	P value
<i>M. anguillicaudatus</i>	Average total weight (kg)	2.5±0.11 ^a	3.3±0.08 ^{a,b}	4.5±0.14 ^b	0.005
	Average total length (mm)	72.4±5.42	74.2±3.74	74.1±7.75	NS
	Average body weight (g)	1.5±0.35 ^a	1.7±0.28 ^{a,b}	2.0±0.66 ^{a,b}	0.012
	¹ Weight gain rate (%)	-15.7±1.41	24±4.24	51.1±3.65	NA
	² SGR(%/day)	0.6±0.25 ^a	0.9±0.24 ^{a,b}	1.5±0.12 ^b	0.013
	³ Survival rate (%)	66.8±2.78 ^a	82.1±11.12 ^{a,b}	91.6±2.55 ^b	0.028
	⁴ FCR	-5.4±0.56 ^a	8.13±1.12 ^{a,b}	1.65±0.28 ^b	0.024

¹Weight gain rate (%) = [(Final total weight) - (Initial total weight)]/Initial body weight × 100

²SGR (Specific growth rate) (%/day) = [ln(final body weight) - ln(initial body weight)]/days × 100

³Survival rate (%) = (Initial individuals - Final individuals)/Initial individuals × 100

⁴FCR (Feed conversion ratio) = Feed/[(Final total weight) - (Initial total weight)]

Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different (P<0.05), NS, no significant (P≥0.05). NA, not applicable.

Table 37. The growth of Caipira lettuce (*Lactuca sativa*) in Hydroponics and BFT-AP deep water culture (DWC) aquaponics systems by *Misgurnus anguillicaudatus*

Species	Parameter	Hydroponics	BFT-AP	<i>P</i> value
<i>M. anguillicaudatus</i>	Total length (mm)	557±12.1	585±8.3	NS
	Total weight (g)	169±10.4*	183±10.2	0.031
	Shoot length (mm)	199±10.2	220±7.5	NS
	Shoot weight (g)	150±9.3*	164±8.8	0.022

Data presented as a mean±S.D. * means significantly different ($P<0.05$). NS, no significant ($P\geq 0.05$).

2.2.4. 작물의 밀도(재식량)에 따른 사육어의 성장도 분석

실험 결과, 메기의 경우 BFT-AP 100 실험구에서는 총 성장률이 $142.6 \pm 5.55\%$, 사료계수가 1.1 ± 0.43 으로 Control에 비해 개선된 값이 나타났으며, BFT-AP 200과 비교시 성장률과 사료계수가 크게 차이가 나지 않았다(Table 32). 식물의 경우, BFT-AP 100은 총 길이 405 ± 25.7 mm, 총 무게 150 ± 7.1 g, 상충부 길이 212 ± 10.8 mm, 상충부 무게 136 ± 15.5 g으로 BFT-AP 200과 Control에 비해 가장 낮은 값이 나타났으나 Control과 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 33). 뱀장어의 경우 BFT-AP 100 실험구에서는 총 성장률이 $136.2 \pm 1.35\%$, 사료계수가 1.2 ± 0.06 으로 Control에 비해 개선된 값이 나타났으며, BFT-AP 200과 비교시 성장률과 사료계수 모두 유의한 차이가 나타났다(Table 34). 식물의 경우, BFT-AP 100의 경우 총 길이 604 ± 57.2 mm, 총 무게 188 ± 32.7 g, 상충부 길이 1811 ± 16.6 mm, 상충부 무게 168 ± 30.8 g으로 나타나 가장 낮은 값이 나타나, 재식량에 따른 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 시 유의한 차이가 나타났다($P < 0.05$)(Table 35).

2.2.5. 사육수 성분 분석 및 수질분석

2.2.5.1. 메기(*S. asotus*)의 사육수 성분분석

사육 종료 후 메기의 BFT-AP 200 사육수 및 수경재배의 성분분석 결과, BFT 실험구의 Total-N은 58.26 mg/L, Total-P는 17.23 mg/L, Na는 83.95 mg/L, Fe는 0.10 mg/L, Zn은 0.41 mg/L, Cu는 0.11 mg/L, Si는 13.17 mg/L, Ca는 63.35 mg/L, K는 34.25 mg/L, Mg는 10.15 mg/L, Cl은 50.90 mg/L로 나타났다. 대부분의 성분은 양액에서 높은 값이 나타났지만, BFT-AP에서는 Mn이 검출되지 않았으나, Zn, Cu는 미량으로 존재하는 것을 확인하였으며, Na, Cl은 양액보다 높은 값이 나타났다(Table 38).



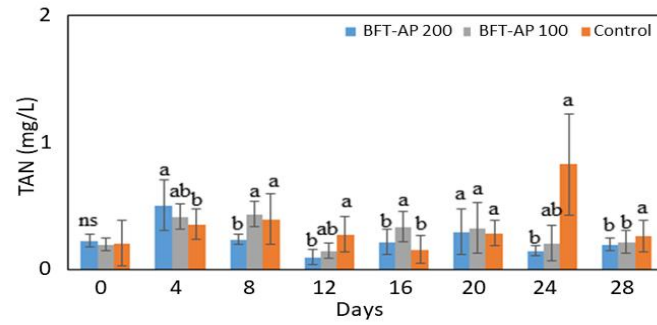
Table 38. Mineral components of *Silurus asotus* BFT breeding water.

Minerals	Experiment	
	Hydroponics	BFT-AP 200
Total-N (mg/L)	204.07	62.63
Total-P (mg/L)	21.55	15.01
Na (mg/L)	42.30	72.40
Fe (mg/L)	0.80	0.05
Mn (mg/L)	0.01	-
Zn (mg/L)	-	0.14
Cu (mg/L)	-	0.06
Si (mg/L)	16.50	2.08
Ca (mg/L)	154.20	49.6
K (mg/L)	294.80	14.30
Mg (mg/L)	32.30	8.5
Cl (mg/L)	28.30	37.05

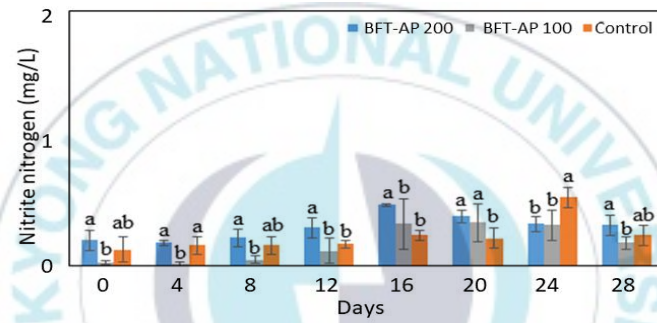
2.2.5.2. 메기(*S. asotus*)의 사육수 수질변화

분석결과, DWC 적용 BFT 메기 아쿠아포닉스의 경우, BFT-AP 200에서는 총 암모니아성 질소(TAN)의 경우, 평균 0.2 ± 0.12 mg/L, 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)는 평균 0.3 ± 0.08 mg/L, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 56.6 ± 16.16 mg/L, BFT-AP 100에서는 총 암모니아성 질소 평균 0.3 ± 0.08 mg/L, 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$) 평균 0.2 ± 0.09 mg/L, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 평균 67.7 ± 5.09 mg/L로 나타났으며, 일반 BFT의 경우, TAN 0.4 ± 0.22 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 0.2 ± 0.13 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 86.7 ± 6.85 로 나타났으며, BFT 메기의 DWC 아쿠아포닉스 적용 시 BFT-200에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 4일 차 최고 77.8 ± 2.52 mg/L의 값이 나타났지만, 24일 차에 최저치인 35.5 ± 7.08 mg/L이 나타났고, 이후 다시 증가하는 모습이 나타났으며, BFT-100에서는 4일 차 최고 78.5 ± 2.31 mg/L 값이 나타난 후, 28일 차 52.2 ± 7.15 mg/L로 나타났으며, 일반 BFT의 28일 차 96.1 ± 6.83 mg/L에 비해 마지막 측정 시 수치가 약 절반으로 감소하는 모습이 나타났다(Fig. 3.17.).

A



B



C

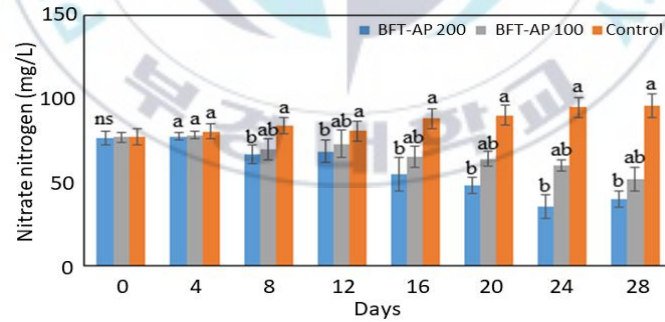


Fig. 3.17. Nitrogen variation of *Silurus asotus* coupled with deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT (A: TAN, B: NO₂-N, C: NO₃-N). Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P < 0.05$), NS, no significant ($P \geq 0.05$).

2.2.5.3. 뱀장어(*A. japonica*)의 사육수 성분분석

사육 종료 후 뱀장어의 BFT-AP 200 사육수 및 수경채배의 성분분석 결과, BFT 실험구의 N은 26.68 mg/L, P는 6.81 mg/L, Na는 99.77 mg/L, Fe는 0.13 mg/L, Zn은 0.16 mg/L, Si는 13.31 mg/L, Ca는 37.48 mg/L, K는 0.33 mg/L, Mg는 9.41 mg/L, Cl은 27.18 mg/L로 나타났다. 메기의 BFT-AP 200 사육수와 마찬가지로 대부분의 성분은 양액에서 높은 값이 나타났지만, BFT-AP에서는 Mn이 검출되지 않았고, Zn은 미량으로 존재하는 것을 확인하였으며, Na의 경우, 양액보다 높은 값이 나타났다(Table 39).



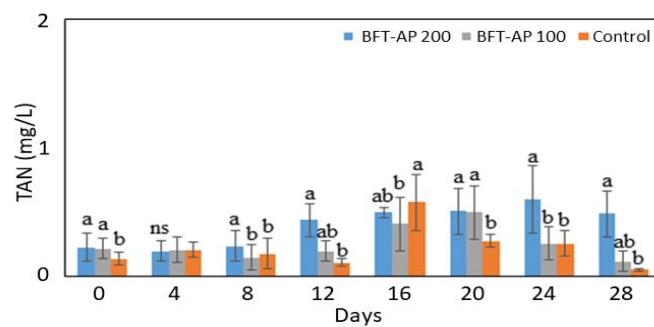
Table 39. Mineral components of *Anguilla japonica* BFT breeding water.

Minerals	Experiment	
	Hydroponics	BFT-AP 200
Total-N (mg/L)	67.87	26.68
Total-P (mg/L)	5.67	6.81
Na (mg/L)	15.94	99.77
Fe (mg/L)	0.73	0.13
Mn (mg/L)	0.09	-
Zn (mg/L)	-	0.16
Cu (mg/L)	-	-
Si (mg/L)	13.39	13.31
Ca (mg/L)	72.16	37.48
K (mg/L)	48.51	0.33
Mg (mg/L)	9.41	9.41
Cl (mg/L)	34.66	27.18

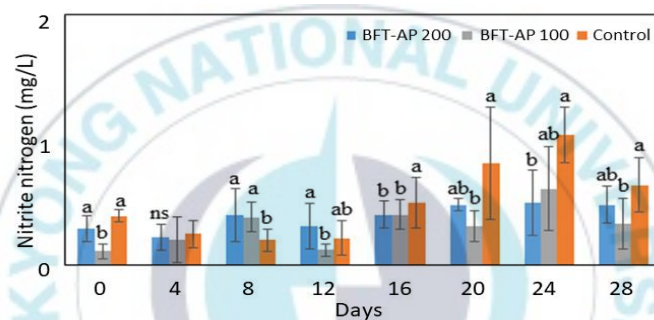
2.2.5.4. 뱀장어(*A. japonica*)의 사육수 수질변화

분석결과, DWC 적용 BFT 뱀장어 아쿠아포닉스의 경우, BFT-AP 200에서는 총 암모니아성 질소(TAN)의 경우, 평균 0.4 ± 0.15 mg/L, 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)는 평균 0.4 ± 0.12 mg/L, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 78.1 ± 6.01 mg/L, BFT-AP 100에서는 총 암모니아성 질소 평균 0.3 ± 0.13 mg/L, 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$) 평균 0.3 ± 0.24 mg/L, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 평균 84.2 ± 6.45 mg/L로 나타났으며, 일반 BFT의 경우, TAN 0.2 ± 0.16 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 0.5 ± 0.31 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 95.8 ± 10.26 로 나타났으며, BFT 뱀장어의 DWC 아쿠아포닉스 적용 시 BFT+200에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 8일 차 최고 88.7 ± 5.22 mg/L의 값이 나타났지만, 28일 차에 최저치인 70.1 ± 5.65 mg/L이 나타났으며, BFT+100에서는 8일 차 최고 88.5 ± 8.63 mg/L 값이 나타난 후, 24일 차 78.9 ± 7.24 mg/L로 나타났으며, 일반 BFT의 28일 차 110.2 ± 4.83 mg/L 비해 마지막 측정 시 수치가 약 1/3 이상 감소하는 모습이 나타났다 (Fig. 3.18.).

A



B



C

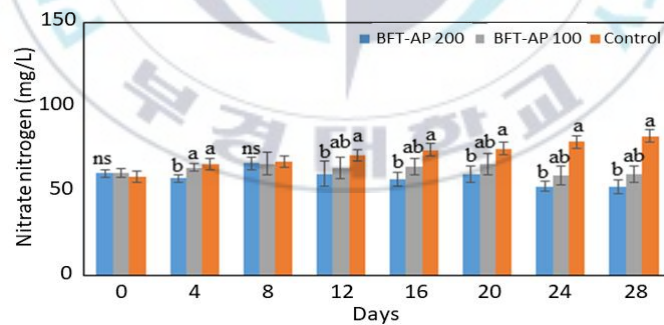
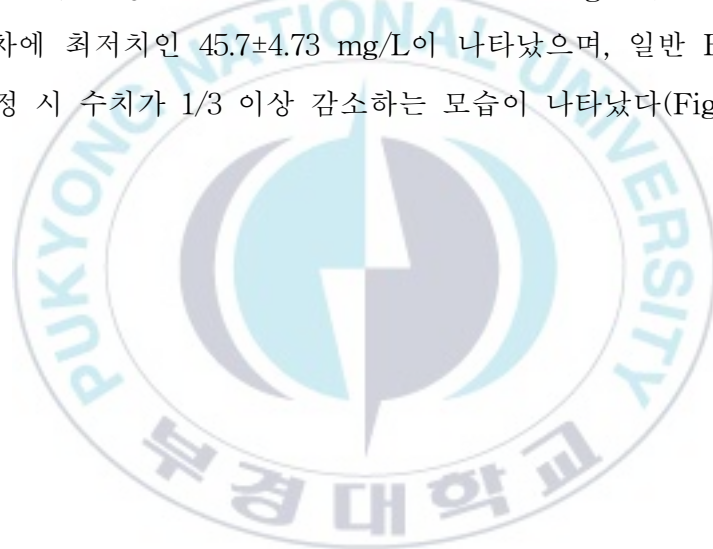


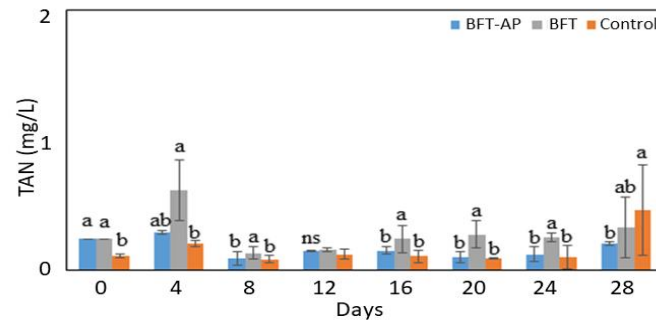
Fig. 3.18. Nitrogen variation of *Anguilla japonica* coupled with deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT (A: TAN, B: NO₂-N, C: NO₃-N). Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different (P<0.05), NS, no significant (P≥0.05).

2.2.5.5. 미꾸리(*M. anguillicaudatus*)의 사육수 수질변화

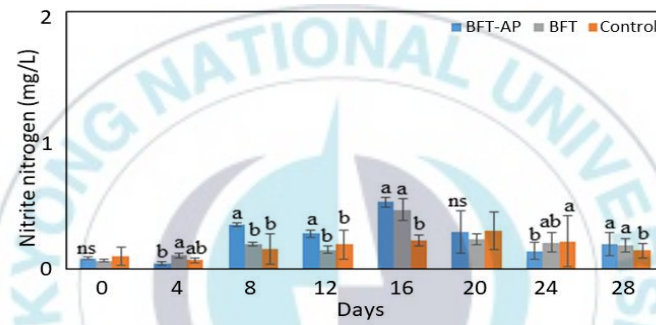
분석결과, DWC 적용 BFT 미꾸리 아쿠아포닉스의 경우, 총 암모니아성 질소(TAN)의 경우, 평균 0.2 ± 0.03 mg/L, 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)는 평균 0.2 ± 0.15 mg/L, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 47.2 ± 3.45 mg/L로 나타났으며, 일반 BFT의 경우, TAN 0.3 ± 0.12 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 0.2 ± 0.04 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 61.3 ± 4.08 로 나타났으며, Control의 경우, TAN 0.2 ± 0.12 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 0.2 ± 0.07 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 6.0 ± 1.20 로 나타났다. BFT 미꾸리의 DWC 아쿠아포닉스 적용 시 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 12일 차 최고 49.8 ± 2.44 mg/L의 값이 나타났지만, 24일 차에 최저치인 45.7 ± 4.73 mg/L이 나타났으며, 일반 BFT에 비해 마지막 측정 시 수치가 1/3 이상 감소하는 모습이 나타났다(Fig. 3.19.).



A



B



C

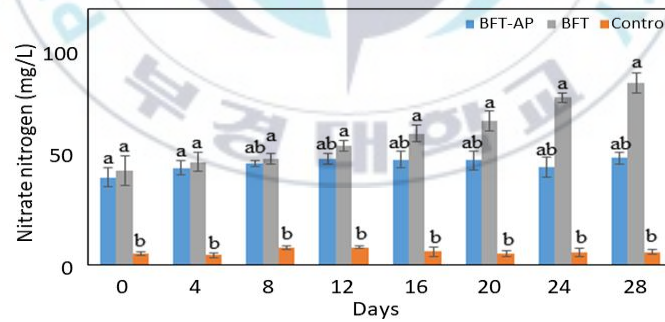


Fig. 3.19. Nitrogen variation of *Misgurnus anguillicaudatus* coupled with deep water culture (DWC) aquaponics based on BFT (A: TAN, B: NO₂-N, C: NO₃-N). Data presented as a mean±S.D. The data in rows denoted with different letters were statically different ($P < 0.05$), NS, no significant ($P \geq 0.05$).

IV. Discussion

1. BFT 양식시스템 내 수질환경 및 사육효율 개선효과

1.1. 내수면 양식대상종의 BFT 적용에 따른 수질환경 요인 분석

BFT 양식 기술은 사육수 내 미생물을 이용한 수처리 기술이 중요하며, 타가영양세균이 주를 이루고 있다. 미생물의 활동은 소화효소의 발생을 위해 많은 수의 타가영양세균이 필요하다(Panigrahi et al., 2021). 선행연구인 BFT 틸라피아(*O. niloticus*) 사육수 내 미생물 군집 구성에 대한 분석 결과, C/N 16:1 적용 실험구에서 가장 좋은 성장도와 수질개선효과가 나타났다(Tanay et al., 2020). 본 실험에서는 사육실험에서 가장 좋은 성장도가 나타난 C/N비 15:1과 20:1과 일치하는 모습이 나타났으며, C/N비 15:1과 20:1에서 가장 높은 미생물 다양성이 나타났다. 이는 BFT의 미생물군집 체제의 변화는 생물학적 및 비생물학적 변화에 대응하는 군집내성으로 인해 유기탄소 첨가에 의해 큰 영향을 받지 않는다. 상기 어종 뿐 아니라 유익균들을 분리하여 유용미생물 확보를 진행한다면, 물만들기를 위한 사육수 접종 전용 미생물 개발에 대한 가능성을 확인하였으며, BFT 적용 실험에 따른 연구결과를 토대로 BFT 전용사료 개발을 위한 사료 내 단백질, 지질 등 함량에 따른 성장비교와 적용 어종에 따른 전용 미생물 개발 등의 추가연구를 통해 사육 매뉴얼 및 산업화를 앞당길 수 있을 것으로 사료된다.

암모니아는 수생동물들에게 있어 중요한 독성 인자로 작용한다(Randall and Tsui, 2002). 특히 높은 수준의 암모니아는 성장감소, 아가미 손상, 과잉반응 및 세포 내 산소전달 방해 및 폐사 등으로 수생동물에 영향을 미친다.

다(Hegazi et al., 2010). 이온화 되지 않은 NH_3 의 증가는 pH가 높을수록 독성이 강한 경향이 나타난다(Ardeniswan et al., 2017). 따라서 BFT 사육 시 갑작스런 시스템의 유지불가와 관리미숙으로 인하여 발생하는 BFT 사육수 내 질소화합물의 수치의 확인을 통하여 지속적으로 BFT 사육수의 유지 및 어류상태의 확인이 매우 중요하다.

본 급성독성실험은 TAN ($\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$)과 $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 농도에 따라 사망률 및 96 h LC_{50} 의 값을 도출하였다. 특히 메기의 경우, 대조구(0 mg/L)에서 사망한 개체는 공식의 발생으로 나타났으며, 뱀장어의 TAN 독성에 대한 안전농도는 메기와 향어에 비해 높은 값이 나타났으며, 김 등 (2007)의 선행연구와 아질산성 질소에 대한 내성이 높은 것으로 나타났다.

본 실험에서의 메기, 향어는, 뱀장어에 비해 상대적으로 TAN과 $\text{NO}_2\text{-N}$ 에 대한 독성에 대한 저항력이 낮기 때문에 TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 증가 발생 시 폐사가 일어나지 않도록 신속한 대처를 이루는 것이 중요하다. 어류의 독성에 대한 내성은 크기에 따라 저항력이 높아지는 경향이 나타난다. 틸라피아 급성독성 선행연구의 경우, 이온화 되지 않은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 독성에 대한 자어의 LC_{50} 값이 1.007~1.01 mg/L 에 비해 치어의 96h LC_{50} 값은 약 7.39~7.41 mg/L로 성장함에 따라 독성에 대한 저항력이 높아지는 경향이 나타났다(Karasu-benli and Gulten, 2005). 또한 수온, pH, DO 등의 환경조건과 빛, 진동, 밀도 등의 자극의 변화는 암모니아 독성에 대한 저항력을 떨어뜨리는 요인이 된다(Thurston and Russo 1981, Ijaz et al., 2011, Serezli et al., 2016). 본 실험에 이용된 치어단계의 독성실험에 대한 결과값으로 전체 크기 및 모든 양식장에서의 적용은 그 범위에 대한 한계가 있으므로 추가적으로 환경조건의 및 자극에 따른 변수를 도입한 실험을 통해 어종과 크기에 따른 급성독성을 구명하는 것이 필요할 것이다.

1.2. BFT 사육관리 요인에 따른 성장 및 특징

본 연구는 친환경 양식방법인 BFT 적용 어류의 기술개발을 위해 메기, 뱀장어, 향어를 대상으로 사육온도, 사육밀도 등의 사육실험을 진행하였으며, 고밀도 사육실험을 통하여 실제 양식장과 사육실험결과를 비교하였다. 실험결과, 실험기간 동안 BFT 적용 시 환수를 하지 않아도 수질의 변동이 크게 생기지 않았으며, 안정적인 수질이 유지되었다. 또한 실제 양식장에 비해 사료효율이 개선되는 효과가 나타났다.

BFT 양식은 대개 양식생물을 수조 내 먼저 투입한 후 사료공급량에 맞추어 유기탄소원을 첨가하여 탄질비(C:N ratio)를 알맞은 비율인 15~20:1로 계산하여 사육한다(Avnimelech, 1999). 그러나 초반 사육 시 BFT의 생성으로 인해 용존산소의 감소, 어류에게서 처음 배출되는 질소화합물인 TAN 및 $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 갑작스러운 증가는 수질변화가 급격하게 일어나게 되며, 불안정한 상태의 사육수가 발생하게 된다(Faizullah et al., 2019). 이 후 급격히 늘어난 바이오플락으로 용존산소량이 감소하는 경향이 나타날 시, 타가영양세균에게 암모니아 동화작용(Ammonification)으로 흡수된 암모니아는 다시 수중 내로 유출이 되므로, 초기에 충분한 산소의 공급과 포기가 매우 중요하다(Avnimelech, 1999, Nootong and Pavasant, 2011). 그리고 사료공급과 동시에 유기탄소원을 동시에 추가하며 탄질비를 적절하게 유지하는 것은 BFT 양식 시 확실하고 안정된 수질관리가 가능하지만, 이로 인한 인력의 소모가 높아진다. 따라서 생물을 넣지 않고 순수 사료와 유기탄소원으로 만든 사육수를 BFT 사육수에 존재하는 미생물을 접종하여 안정적인 사육수의 공급이 중요하며, BFT의 floc 형성 정도를 판단하는 기준으로는 수질 자체의 색과 거품의 양으로 1차적인 판단이 가능하다(최 등 2019). 약 한 달의 시간 동안 배양한 사육수는 반투명한 갈색을 띄며 바로 이용이 가능하다. 유기탄소원인 당밀의 어둡고 불투명한 색은 사육수의 수

색을 흐리게 만들어 공식의 방지효과가 나타나며 생존율을 높여 일반 양식장에 비해 고밀도양식이 가능한 이점을 가진다(Azim and Little, 2008). BFT 적용 사육수의 pH는 시간이 흐름에 따라 점점 감소하는 현상이 일어난다(Kamilya et al., 2017). 어류의 항상성 유지를 위해 pH를 6 미만으로 감소시키지 않도록 첨가제인 중탄산나트륨을 추가시켜 주는데, 이는 사육어의 호흡으로 인해 배출된 이산화탄소가 사육수와 반응하여 수소이온의 반응물이 생성되기 때문이며, 또한 pH를 잘 유지시켜준다면 타가영양세균의 운동성 저하 및 플락의 감소는 나타나지 않는다(Furtado et al., 2011).

모든 BFT 적용 어류의 온도에 따른 성장률 및 사료계수는 메기 30℃, 뱀장어 30℃, 향어 24~28℃ 적용 시 가장 좋은 값이 나타났는데, 20℃의 낮은 온도는 대사능력이 떨어지며, 먹이섭취능력이 좋지 않아 성장률이 낮게 나타났다. 또한 메기와 뱀장어의 경우 온도 범위의 차이가 크게 설정되어 중간 구간을 추가하여 실험을 진행할 시 적절한 온도 설정으로써 고수온 대응 양식기술로 적용이 가능할 것이다.

밀도에 따른 BFT 적용 실험결과는 저밀도일수록 높은 성장률이 나타났다. 이는 선행연구인 BFT 적용 나일틸라피아(*O. niloticus*)와 같이 밀도에 따른 밀도가 낮을수록 성장률이 높게 나타나며, 밀도가 높을수록 낮아지는 경향이 나타났다(Manduca et al., 2021). 그러나 저밀도 양식은 생산력이 낮아 경제성이 좋지 않은 단점이 있다. BFT는 집약적 양식 중 친환경 지속가능한 양식으로 효율적인 비용이 나타나는 양식 방법이다(Singh et al., 2020). 밀도의 범위는 0.5~20 kg/m² 로 설정하였음에도 불구하고 어류에게 치명적인 독성을 나타내는 TAN과 NO₂-N의 수치가 안정적으로 유지되는 것이 나타났다. 일반양식장의 높은 성장률은 외부와 단절되지 않은 개방적 양식방법으로 인해, 외부에서 유입되는 생먹이의 발생도 성장에 관여했을 것이다. Milkfish (*Chanos chanos*)의 BFT 적용 연구에 따르면 자어

의 관리 시 고밀도 적용을 통해 성육장으로의 역할을 충분히 하며 경제성이 높은 것으로 평가되고 있다(Sontakke et al., 2018, Shamsuddin et al., 2022). 또한, 나일 틸라피아(*O. niloticus*)의 경우, 20 kg/m² 이상의 밀도로 사육 진행 시 생존율과 성장률이 감소하는 경향이 나타난다(Widanarni et al., 2012, Zaki et al., 2020). 따라서 고밀도 적용 시 도출된 결과 값에 따라 어종 및 크기에 따른 밀도의 상관관계 분석을 통하여 생산력 및 경제성이 높은 구간을 설정하여 사육을 통하여 어류 성장 단계에 따른 사육밀도를 구명하는 것이 중요하다.

어종 별 최소 단백질 요구량은 메기의 경우 42~44% (Kim et al., 2014), 뱀장어의 경우, 45% (Nose and Arai, 1973), 향어의 경우 33~38% (NRC, 1993)이며, 사육실험결과 성장에 대한 장애는 일어나지 않았다. C/N 비에 따른 성장비교시 15~20:1의 범위를 설정하여 사육하는 것이 가장 개선된 성장효과가 나타났다. BFT 내 발생하는 강한 포기와 수류는 각 어종들의 성장을 저하시키지 않는 점을 나타내어 공식이 많이 일어나는 초기 어류양식에 있어서 방지할 수 있는 이점을 보여준다. 사료계수 또한 일반적인 양식방법에 비해 모두 개선된 효과가 나타났다. BFT 사육수 내 생성된 바이오플락은 다시 어류가 재섭식함으로써 사료효율 개선효과가 나타난다(Schryver et al., 2008). BFT는 계속 증가하는 사료경비에 대한 문제를 해결할 수 있는 방법중의 하나가 될 수 있다(Ogello et al., 2021). 그러나 15~20:1을 벗어난 범위에서의 C/N비 적용은 10:1에서는 상대적으로 성장률은 낮지만 폐사율은 30:1보다 낮게 나타났다. 이는 C/N이 높을 시 높은 수준의 유기탄소원을 이용하는 타가영양세균의 폭발적인 증가로 인해 많은 플락이 생성된다. 따라서 이를 방지하고 이상적인 수지환경을 유지하기 위해 CP(%)의 함량이 낮은 BFT 전용 사료를 개발하며 많은 어종을 대상으로 BFT 전용 사료 공급실험이 진행되고 있다(Mahanand et al., 2013). 또

한 이상적인 미생물 군집 및 유기물의 양은 TSS와 관련이 있다(Martins et al., 2017). 찬넬메기(*Ictarulus punctatus*)의 BFT 적용 시 TSS의 제거를 통한 실험결과 TSS 제거를 한 실험구에서 성장개선효과가 나타났다(Green et al., 2019). 또한, 흰다리새우의 TSS 제거 실험결과 200 mg/L 보다 낮은 처리구에서 수질개선효과 및 성장이 개선되었다(Schveitzer et al., 2013). 선행연구와 마찬가지로 BFT 적용 향어의 TSS 제거 실험결과, 성장률이 약 18.2%가 개선되었으며, 일반적인 물리여과기를 이용해서 제거해 주는 것에도 효과가 있음이 나타났다. 과도한 TSS은 미생물의 호흡으로 인한 용존산소의 감소와 사육수 내에서 호흡하는 생물의 호흡을 방해한다⁽²⁾(Silva et al., 2016). 남미은메기(*Rhamdia quelen*)의 자어의 BFT 적용 시 TSS 과다증가는 성장의 저하를 일으키며, 생존율을 감소시킨다(Poli et al., 2015). 그러나 너무 많은 TSS의 제거는 BFT 내 biofloc을 감소시키는 결과가 나타난다(Gaona et al., 2016). 또한 많은 고체 입자의 형성으로 포기 및 수류활동이 지연되어 바닥내 축적을 통한 혐기성 층을 생성할 수 있으며, 이 혐기성 층은 황화가스를 배출하여 사육생물의 치명적인 독소원으로써 대량폐사의 원인이 된다(Avnimelech, 2006). 따라서 효과적인 BFT의 유지를 위해서는 적용 어종에 따른 적절한 TSS의 농도 구멍을 통해 수질 및 사육환경을 유지해 주는 것이 중요하다.

따라서 BFT 적용 메기, 뱀장어, 향어의 경우 BFT 수질 관리 및 생산량 개선을 위해서 먼저 BFT 사육수를 물만들기를 통하여 바로 이용 가능한 사육수를 미리 만들어 두며, 적절한 C/N비인 15~20:1을 유지하며 TSS의 과다생성을 방지하며, 어종에 따른 적정 온도를 적용한다면 고밀도 적용을 통해 높은 경제성을 얻을 수 있을 것이다.

2. BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템 적용 분석

본 연구는 친환경 양식기술이자 농수융복합 기술인 BFT 기반의 아쿠아포닉스인 박막필름식(NFT), 담액식(DWC)의 두가지 방법을 이용하여 사육 실험을 진행하여 양식생물과 재배작물의 성장비교를 통해 BFT 기반의 아쿠아포닉스 시스템에서 메기와 뱀장어의 적용에 대한 가능성이 나타났다. 현재 양식산업은 생산증대를 위한 양식보다 좀 더 친환경적 미래양식기술로의 패러다임의 전환이 필요한 실정이다(Emerenciano et al., 2013).

아쿠아포닉스의 장점은 지속가능한 고밀도 생산 시스템을 통해 안정적인 공급이 가능하며, 물의 이용효율이 매우 높고 흙이 필요하지 않다. 또한, 유기농법적 관리 및 생산으로 인해 경쟁력이 높다. 그러나, 아쿠아포닉스의 적용은 토양재배나 수경재배에 비해 초기 설치 비용이 높다는 단점이 있으며, 양식과 수경재배에 대한 전문 지식이 필요하여, 적용 어종에 따른 적절한 식물의 선정이 중요하며 이를 해소하려는 많은 시험이 진행되고 있다.

BFT 양식 시스템의 담수어류 적용 가능성은 이후 잉어과, 틸라피아 등 주요 내수면 양식대상종의 성장 및 적용 효과에 대한 연구로 활발히 진행되고 있다(Perez-Fuentes et al., 2016; Pinho et al., 2017). 이 후 BFT 사육수 내 풍부한 무기물과 영양분의 함유를 이용하는 BFT 기반의 아쿠아포닉스 기술도 많이 적용하고 있는 실정이다(김 등 2019). 아쿠아포닉스 적용 시 재배작물의 성장에는 미량원소 및 영양분의 상호작용이 중요하다(Baxter, 2015). 또한 작물의 뿌리, 사육수 내 존재하는 미생물로 인한 상호작용도 중요하다(Goddek et al., 2016). BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 실험 기간 동안 식물생장에 저하되는 결핍, 장애, 기생충은 나타나지 않았다.

BFT 적용 아쿠아포닉스는 사육수 내 미생물의 암모니아 동화작용 뿐 아니라 식물의 뿌리로 흡수하는 질산염 제거 등 생물학적 여과필터의 역할을 하며, 다시 양식생물에게 선순환되는 구조이다(Deswati et al., 2020).

C/N비가 20:1 일 때 어류의 성장 및 식물 가식부의 성장이 가장 좋게 나타났다으며, 식물의 뿌리가 짧은 경향이 나타났음에도 식물성장에도 장애가 나타나지 않는다(Rahmatullah et al., 2020). 이번 연구의 NFT 적용 어종인 메기, 뱀장어 모두 성장률이 향상되는 모습이 나타났으나, DWC 적용 실험구에 비해 식물의 경우 뿌리가 짧은 경향이 나타났음에도 실험종료 시 식물 성장에 장애가 나타나지 않았다. 메기의 경우 공식이 발생하여 성장률이 이전 실험에 비해 상대적으로 낮은 모습이 나타났는데, 이는 비정상 성장 개체(숙성이)의 발생으로 인하여 일어났으나, 나머지 성장도를 나타내는 지표는 개선된 값이 나타났다.

미꾸리의 경우, 야외 사육을 통한 양식을 통해 재포획하는 방법으로 수확을 진행한다. 그러나 새, 수달 등의 해적생물과 잠입하는 습성으로 인해 재포획시 효율이 낮으며, 중국으로부터 수입하는 미꾸리와 미꾸라지로 인하여 경쟁력이 낮아지고 있다(김 등 2013). 그러나 미꾸리, 미꾸라지의 실내 사육 진행 시 실내 환경에 적응을 하지 못하고 사육수 내 독성의 증가로 인해 폐사가 일어나게 된다(염과 이, 2006). 실내양식 적용이 어려운 미꾸리(*Misgurnus guillicaudatus*)는 낮은 생존율 및 실내 적용 실험이 필요한 실정이다(Kim et al., 1994). 그러나, 이번 실험 결과, BFT 기반의 아쿠아포닉스, BFT 적용 실험구에서 대조구에 비해 생존율과 성장도가 개선된 효과가 나타났다. 이는 묵은 물을 좋아하는 미꾸리에게 어두운 수색의 BFT 사육수를 통하여 안정적인 환경을 제공하였으며, 아쿠아포닉스 적용을 통한 질산염 등의 식물의 흡수작용을 통해 일정하게 개선된 수질로 인한 효과라고 볼 수 있다. 미꾸리의 경우, 타 어종에 비해 수확기간 및 성장이 빨라 현재 중국에서 수입되는 미꾸라지와 어류와의 경쟁력 확보가 가능할 것으로 전망한다.

BFT는 양식수조 내에 존재하는 유용한 미생물을 이용하여 양식생물의

배설물이나 사료찌꺼기에서 발생하는 총 암모니아성 질소(TAN)와 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$)와 같은 질소화합물을 효과적으로 제거가 가능하나 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)의 경우 계속 축적이 되어 BFT 사육수 내 질산성 질소의 제거는 잘 이루어지지 않는다. 양식사육수의 질화과정 후 마지막 산물인 질산성 질소는 혐기상태 혹은 환수를 통하여 가능하므로 일반적인 양식을 통해 제거하는 방법이 필요하다. Hamlin (2006)의 선행연구에 따르면 작은 크기의 어류일수록 질산성 질소에 대한 높은 내성을 가지고 있다고 보고한 바 있다. 그러나, 고농도(250~900 mg/L)의 질산성 질소의 장기간 노출은 수질악화 및 유용세균의 감소로 이어진다(Furtado et al., 2020, Madsen et al., 2000). 아쿠아포닉스의 경우, 재배작물이 사육수 내 질산성 질소를 제거하는 생물학적 필터 역할을 하고 그 물은 재순환되어 양식수로 사용하여 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법 중의 하나이다(황 등 2021).

이번 실험의 메기와 뱀장어의 경우, 일반 BFT 적용 시 사육수 내에서 암모니아성 질소와 아질산성 질소의 제거가 효과적으로 이루어지는 것은 분명하나, 질산성 질소의 수치는 시간이 흐름에 따라 계속 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 시 일반 BFT에 비해 질산염이 효과적으로 감소하는 것이 나타났으며, 식물의 재식량이 많을수록 질산염이 더 빠르게 제거되는 모습이 나타났다. 실험결과를 토대로 BFT 아쿠아포닉스 적용을 통한 질산성 질소의 감소효과는 BFT 적용 고밀도 양식 시 작물의 밀도 및 재식량을 늘릴 수 있어 더 많은 감소 효과를 볼 수 있다(Adriani et al., 2017). 어류의 생산성 및 작물의 수확량을 늘여주는 효과를 볼 수 있어 재식량을 늘여감에 따라 사육수의 수질개선과 늘어난 생산량으로 높은 경제적 이익을 얻을 수 있을 것이다(Calone et al., 2019).

수경재배의 경우 투입되는 양액의 농도범위는 N은 321 ± 6.2 mg/L, P는

36.9±6.2 m/L, Ca는 160±10 mg/L, K는 340±101 m/L이다(Murashige and Skoog, 1962). 일반적인 아쿠아포닉스 시스템은 사육조 내 발생하는 유기물 및 영양분은 어류의 밀도에 따라 범위가 다르지만 식물사육에는 충분하며, P, Ca, Fe, K의 결핍으로 성장이 저하된다(Bittsanszky et al., 2016). BFT 기반의 아쿠아포닉스(DWC) 사육수의 성분 분석결과 메기와 뱀장어 적용 모두 일반 양액에 비해 낮은 값이 나타났다. 높은 수준의 전기전도도와 TDS는 식물성장에 있어서 좋은 사육수로서의 공급이 가능하다(Zhen et al., 2015). 그러나 상기 실험을 통한 재배실험 시 영양분의 부족현상이나 성장지연 등의 현상을 관찰되지 않았으며, BFT 적용 아쿠아포닉스는 일반수경재배와 성장 비교 시 비슷한 결과가 나타났다. 또한 BFT 아쿠아포닉스 적용 시 발생하는 질산성 질소를 재식작물이 이용하며 생물학적 필터로서 저감 역할을 한다(Diatin et al., 2020). 재배작물의 밀도가 높을수록 질산성 질소의 감소량이 크게 나타나, 사육수 내 영양분을 재배작물의 성장에 충분히 이용됐을 것으로 생각된다(김 등 2022).

아쿠아포닉스 적용 시 인공영양분의 투입이 권장되고 있다(Rakocy, 2007, Suhl et al., 2016, Bailey and Ferrarezi, 2017). 그러나 이번 실험결과, 중요한 미량원소인 P, Ca, Fe, K의 값은 모두 낮음에도 불구하고 결핍현상이 발견되거나 성장이 저하되지 않았다. 이는 BFT 적용 시 투입되는 당밀과 사료를 이용한 사육수 내 존재하는 미량원소에 대한 농도는 작물재배에 충분하게 작용한 것으로 보인다(황 등 2021). 그러나 사료의 성분과 당밀의 성분은 제조사 및 원료에 따라 다르며, 구성성분이 변함에 따라 성분이 다르므로(이, 2021), 사료의 성분과 따른 사육실험을 통하여 아쿠아포닉스 적용에 필요한 적절한 사료를 구하는 것도 중요하다.

현재 BFT 양식 기술을 이용한 성장과 경제성에 관한 연구들은 계속 진행되고 있다(Avnimelech, 1999, Azim and Little, 2008, Bakar et al., 2015).

그러나 아직 많은 어종들이 시험중에 있으며, 연구소 단위 뿐 아니라 기업 단위로 친환경양식의 개발 및 적용을 하려는 움직임이 나타나고 있다. 특히 우리나라는 한 어종이 아닌 다양한 어종을 양식하는 어가들이 많으며, 상기 어종들 뿐 아니라 무지개송어(*Onchorhynchus mykiss*), 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*) 등 고부가 가치를 지닌 다양한 내수면 품종의 적용을 통한 BFT 및 아쿠아포닉스 적용 실험이 진행되고 있다. 특히 무지개송어의 경우, pH가 높고 수온이 낮은 지방에서 사육이 주로 되는데, 주로 어종에 따른 사육특성을 고려한 연구를 통해 시스템 개발이 필요할 것이다.

BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용에 따른 어류와 식물의 생산은 인류의 식량 생산 및 지속적인 생산을 이룰 수 있는 중요한 역할을 할 수 있음을 보여주었다. 또한 작은 면적을 이용한 어류와 식물 생산이 가능함으로써, 경제성이 높기 때문에 토지가 부족한 곳 혹은 급수가 용이하지 못한 곳에서 추가적인 소득을 확보할 수 있다.

현재 아쿠아포닉스에 관한 연구는 우리나라 뿐 아니라 전 세계 많은 지역에서 이루어지고 있다. 또한 카이피라와 같은 엽채류 뿐 아니라 방울토마토(Halbert-Howard et al., 2020), 바질(Knaus et al., 2020)과 같은 고소득 작물들도 진행되고 있으며, 국내의 실정에 알맞은 형태의 시설 및 관리 기술의 개발 등이 지속적으로 연구되어야 한다(하와 정 2017). 최근에는 저염분을 이용한 해수 아쿠아포닉스에 관한 적용연구가 진행되고 있으며(Pinheiro et al., 2020), 이를 이용한 해수 BFT 양식기술을 이용한 염생식물과 바다숲 조성식물, 식용작물 뿐 아니라 관상용 수생식물을 적용 시 높은 경제성을 보여주는 효과가 나타날 수 있을 것이다. 다양한 현장 적용 및 실험을 통하여 지속적인 양식의 입증 및 경제성 분석을 진행한다면, 부가가치가 높은 친환경 양식 산업이 될 수 있을 것으로 전망한다.

V. Conclusion

실험결과, BFT 양식시 초기 생존율을 높이기 위해서는 BFT 물만들기를 먼저 적용하여, 적용 하는 것이 효과적으로 나타났다. 수질환경 요인중의 하나인 C/N 비는 15~20:1의 조건으로 유지하는 것이 미생물 활동이 가장 좋으며, 양식 생물의 생산성에 있어서 이점을 줄 것이다. 또한 폐기와 배장어는 25~30℃로 유지하며 사육하며, 향어의 경우 24~26 ℃의 범위에서 사육 시 미생물의 활동 및 양식 생물의 생존율과 생산성에 이점을 줄 것이다. 한편, 밀도의 경우, 낮을수록 높은 생산성이 나타났으며, 실험기간 동안 사육수의 배출이 없음에도 불구하고 양식 생물에 있어 치명적인 독소원인 총 암모니아성 질소(TAN)와 질산성 질소(NO₂-N)의 농도가 안정적으로 유지가 되어 친환경 집약적 양식에 장점을 가지는 것으로 확인 되었다. 추가적으로 입식과 출하까지의 성장실험을 통하여 양식생물의 크기에 따른 적정 밀도의 탐색을 위한 사육이 필요할 것이며, BFT 양식의 현장적용 실험을 통해 담수어류 BFT 양식의 경제성 분석이 필요할 것으로 사료된다.

BFT 기반의 아쿠아포닉스 적용 실험 결과 모든 실험구에서 질산성 질소(NO₃-N)가 줄어드는 수질개선효과가 나타났으며, 양식 생물 및 식물성장의 개선효과가 나타났다. 또한 사육수 분석 결과, BFT 사육수 내 포함된 미량원소는 식물의 성장에 결핍 및 질병이 발생하지 않았다. 본 연구의 카이피라 상추 대신 여러 수경재배가 가능한 작물을 적용시킨 연구를 통하여 작물과 양식 생물의 종에 따른 최적 조합에 따른 추가실험을 통해 여러 작물 및 양식 어종의 다양화가 이루어진다면, BFT를 이용한 담수어류 양식 및 아쿠아포닉스 적용 시 부가가치가 높은 친환경 양식 산업이 될 것으로 전망한다.

VI. References

- Ahmad, I., Rani, A.M.B., Verma, A.K. and Masqsood, M. 2017. Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition. *Aquaculture international*, 25, pp. 1215–1226.
- Adriani, Y., Dhahiyat, Y., Zahidah Z. and Zidni, I., 2016. The effect of stocking density ratio of fish on water plant productivity in aquaponics culture system. *Nusantara Bioscience* Vol. 9. No.1, pp. 31–35.
- Ardeniswan, Dara, F. and Sukmawati, F. 2017. Acute toxicity (LC₅₀) of ammonia to carp fish (*Cyprinus carpio*) at different pH levels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 60, (2017) 012037.
- Avnimelech, Y. 1999, Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176, (1999) pp. 227–235.
- Avnimelech, Y. 2006. Bio-filters: the need for an new comprehensive approach. *Aquacultural Engineering*, 34, (3), pp. 172–178.
- Avnimelech, Y. 2012. Biofloc technology: a practical guidebook, The World Aquaculture Society, Baton Rouge, pp. 181.
- Avnimelech, Y. 2015. Biofloc technology–A practical guide book. 3rd ed. The world aquaculture society, Baton Rouge, United states.
- Azim, M.E., Little, D.C. and Bron, J.E., 2008. Microbial protein production in activated suspension tanks manipulating C:N ratio in feed and the implications for fish culture. *Bioresource Technology*,

- 99, (2008) pp. 3590–3599.
- Azim, M.E., and Little, D.C., 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 283, pp. 29–35.
- Bailey, D.S. and Ferrarezi, R.S. 2017. Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponics system. *Aquaculture Rep.*, 7, pp. 77–82.
- Bakar, N.S.A., Nasir, N.M. and Lananan, F., 2015. Optimization of C/N ratios for nutrient removal in aquaculture system culturing African catfish, (*Clarias gariepinus*) utilizing Bioflocs Technology. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, (2015) pp. 100–106.
- Baxter I. 2015. Should we treat the ionome as a combination of individual elements or should we be deriving novel combined traits?. *J. Exp. Bot.*, 66, pp. 2127–2131.
- Bittsanszky A., Uzinger N., Gyulai G., Mathis A., Junge A., Villarroel M., Kotzen B. and Komives T. 2016. Nutrient supply of plants in aquaponics systems. *Ecocycles* 2, pp. 17–20.
- Blancheton, J.P., 2000. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species. *Aquaculture Engineering*, 22, pp. 17–31.
- Boyd, C.E., 1979. Water quality in warmwater fish ponds, agriculture experiment station, 359, Auburn, Alabama.
- Caipang, C.M.A., Choo, H.X., Bai, Z., Huang, H. and Lay-yag, C.M. 2015. Viability of sweet potato flour as carbon source for the

production of biofloc in freshwater culture of tilapia, *Oreochromis* sp.

- Calone, R., Pennisi, G., Morgenstern, R., Sanye-Mengual, E., Lorleberg, W., Dapprich, P., Winkler, P., Orsini, F. and Gianquinto, G. 2019. Improving water management in European catfish recirculating aquaculture systems through catfish-lettuce aquaponics. *Science of the Total Environment*. 687, (2019) pp. 759-767.
- Choo, H.X. and Caipang, C.M.A., 2015. Biofloc technology (BFT) and its application towards improved production in freshwater tilapia culture. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation International Journal of the Bioflux Society*, 2015, Volume 8, Issue 3. pp. 362-366.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P. and Verstraete, W. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356-357, (2012) pp. 351-356.
- Dauda, A.B., Romano, M., Ebrahimi, M., Tec, J.C., Ajadi, A., Chong, C.M., Karim, M., Natrah, I. and Kamarudin, M.S., 2018. Influence of carbon/nitrogen ratios on biofloc production and biochemical composition and subsequent effects on the growth, physiological status and disease resistance of African catfish (*Clarias gariepinus*) cultured in glycerol based biofloc systems. *Aquaculture*, 483, (2018) pp. 120-130.
- Day, S.B., Salie, K. and Stander, H.B. 2016. A growth comparison among three commercial tilapia species in a biofloc system. *Aquacult Int*(2016), 24, pp. 1309-1322.

- Deswati, D., Yani, E., Safni, S., Tetra, O.N. and Pardi, H. 2020. Development methods in aquaponic systems using biofloc to improve water quality (ammonia, nitrite, nitrate) and growth of tilapia and samhong mustard. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, pp. 1-10.
- Diatin, I., Shafruddin, D., Hude, N., Sholihah, M. and Mutsmir, I. 2021. Production performance and financial feasibility analysis of farming catfish (*Clarias gariepinus*)—utilizing water exchange system, aquaponic, and biofloc technology. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 20, (2021) pp. 344-351.
- Diver, S., 2006. Aquaponics—integration of hydroponic with aquaculture. National Sustainable Agriculture Information Service, pp. 28
- Emeraciano, M., G. Gaxiola and G. Cuzon. 2013b. Biofloc technology (BFT): a review for aquaculture application and animal food industry. Biomass now: cultivation and utilization. InTech Rijeka Croatia, pp. 301-328.
- Emmerson, K., Russo, R.C., Lund, R.E. and Thurston, R.V., 1975. Aqueous ammonia equilibrium calculation: effect of pH and temperature, J. Fish Res. Bd. Can., (32), pp. 2379-2383.
- Faizullah, M.M., Rajagopalsamy, C.B.T., Ahilan, B. and Daniel N. 2019. Application of biofloc technology (BFT) in the aquaculture system. Journal of Entomology and Zoology Studies, 7, (4) pp. 204-212.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2012. Status and Trends. FAO Fisheries and aquaculture technical paper, pp. 1-100.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2014. Small-scale aquaponics

- food production integrated fish and plant farming. FAO, Fisheries and aquaculture technical paper, pp. 1–19.
- Furtado, P.S., Poersch, L.H. and Wasielesky, W. 2011. Effect of calcium hydroxide, carbonate and sodium bicarbonate on water quality and zootechnical performance of shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in bio-flocs technology (BFT) systems. *Aquaculture*, 321, (2011) pp. 130–135.
- Furtado, P.S., Campos B.R., Serra, F.P., Klosterhoff, M., Romano, L.A. and Wasielesky, W. 2015. Effects of nitrate toxicity in the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared with biofloc technology (BFT). *Aquaculture International*, 23, (2015) pp. 315–327.
- Gaona, C.A.P., Serra, F.P., Furtado, P.S., Poersch, L.H. and Wasielesky, W. 2016. Biofloc management with different flow rates for solids removal in the *Litopenaeus vannamei* BFT culture system. *Aquaculture International*, 24, pp. 1263–1275.
- Gephart, J.A. and Pace, M.L., 2015. Structure and evolution of the global seafood trade network. *Environ. Res. Lett.*, 10, (2015) 125014.
- Goddek, S., Schmautz, Z., Scott, B., Delaide, B., Keesman, K.J., Wuertz, S. and Junge, R., 2016. The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. *Agronomy*, 6, 37.
- Green, B.W., Schrader, K.K. and McEntire, M. 2019. Effects of solids removal on water quality and channel catfish production in a biofloc technology production system. *Journal of Applied Aquaculture*, 31, (1) pp. 1–16.

- Halbert-Howard, A., Hafner, F., Karlowsky, S., Schwarz, D. and Krause, A., 2021. Evaluating recycling fertilizers for tomato cultivation in hydroponics and their impact on greenhouse gas emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, (2021) 28: 59284–59303.
- Hamlin, H.J. 2006. Nitrate toxicity in Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*). *Aquaculture*, 253, (2006) pp. 688–693.
- Hargreaves, J.A., 2006. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 34, (2006) pp. 344–363.
- Hargreaves, J.A., 2013. Biofloc production systems for aquaculture. Southern regional Aquaculture center (SRAC) publication, No. 4503.
- Hegazi M.M., Attia Z.I. and Ashour, O.A., 2010. Oxidative stress and antioxidant enzymes in liver and white muscle of Nile tilapia juveniles in chronic ammonia exposure. *Aquatic Toxicology*, 99, (2010) pp. 118–125.
- Ijaz, N., Iqbal, Z. and Chaudhry, J.A. 2011. Toxicity of Ammonia to Fingerling Grass Carp, *Ctenopharyngodon idella* (VALENCIENNES). *Punjab Univ. J. Zool.*, Vol. 26, (1), pp. 9–20.
- Junge, R., Konig, B., Villarroel, M., Komives, T. and Jijakli, M.H. 2017. Strategic Points in Aquaponics. *Water*, 2017. 9., 182.
- Kamilya, D., Debbarma, M., Pal, P., Kheti, B., Sarkar S. and Singh, S.T., 2017. Biofloctechonology application in indoor culture of Labeo rohita (Hamilton, 1822) fingerlings: The effects on inorganic nitrogen control, growth and immunity. *Chemosphere*, (2017) pp.

8-14.

- Karasu-Benli, A.C. and Gulten, K. 2005. The Acute Toxicity of Ammonia on Tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) Larvae and Fingerlings. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences. 29, (2). pp. 339-344.
- Kim, D.S., Jo, J.Y. and Lee, T.Y. 1994. Induction of triploidy in mud loach (*Misgurnus mizolepis*) and its effect on gonad development and growth. Aquaculture, 120, pp. 263-270.
- Kim, K.D., Kim, K.W., Lee, B.J., Son, M.H., Han, H.S. and Kim J.D. 2014. Dietary Protein Requirement for Young Far Eastern Catfish *Silurus asotus*. Fisheries and Aquatic Sciences, 17, (4), pp. 455-459.
- Knaus, U., Pribbernow, M., Xu, L., Appelbaum, S. and Palm, H.W. 2020. Basil (*Ocimum basilicum*) cultivation in decoupled aquaponics with three hydro-components (Grow pipes, Raft, Gravel) and African catfish (*Clarias gariepinus*) production in northern Germany. Sustainability, 2020. 12, 8745.
- ^aLiu, H., Li, H., Wei, H., Zhu, X., Han, D., Jin, J. and Yang, Y., 2019. Biofloc formation improves water quality and fish yield in a freshwater pond aquaculture system. Aquaculture, 506, (2019) pp. 256-269.
- ^bLiu, X., Qin, J., Xu, Y., Ouyang, S. and Wu, X., 2019. Biodiversity decline of fish assemblages after the impoundment of the Three Gorges Dam in the Yangtze River Basin, China. Rev Fish Biol Fisheries, 29: pp. 177-195.
- Longo, S.B., Clark, B., York, R. and Jorgenson, A.K., 2019. Aquaculture

- and the displacement of fisheries captures. Conservation Biology, Volume 33, No. 4, pp. 832–841.
- Madsen, H.C.K, Buchmann, K. and Møllergaard S., 2000. Association between trichodiniasis in eel *Anguilla anguilla* and water quality in recirculation system. Aquaculture, 187, (2000) pp. 275–281.
- Mahanand, S.S., Moulick, S. and Rao P.S. 2013. Water Quality and Growth of Rohu, *Labeo rohita*, in a Biofloc System. Journal of Applied Aquaculture, 25, (2), pp. 121–131
- Manduca, L.G., Silva M.A., Alvarenga, E.R., Alves G.F.O., Ferreira N.H., Teixeira E.A., Fernandes, A.F.A., Silva M.A. and Turra E.M. 2021. Effects of different stocking densities on Nile tilapia performance and profitability of a biofloc system with a minimum water change. Aquaculture, 530, (2021) 735814.
- Martins-Porcas, M. and Vargas-Albores, F., 2017. Microbial metagenomics in aquaculture: a potential tool for a deeper insight into the activity. Reviews in Aquaculture, 9.1, (2017) pp. 42–56.
- Murashige T and Skoog F., 1962. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. Physiol Plant, 15, pp. 473–497.
- Nootong, K. and Pavasant, P. 2011. Effects of Organic Carbon Addition in Controlling Inorganic Nitrogen Concentrations in a Biofloc System. Journal of the World Aquaculture Society, 42, (3), pp. 339–346.
- National institute of Fisheries Science (2018). Aquaculture manual for White shrimp.

- National Research Council (NRC), 1993. Nutritional requirements of fish. National Academy Science, Washington. D.C. 114 pp.
- Nose, T. and Arai, S., 1973. Optimum level of protein in purified diet for eel, *Anguilla japonica*. Bulletin of Freshwater Fisheries Research Laboratory 22: pp.145-154.
- Ogello, E.O., Outa, N.O., Obiero, K.O., Kyule, D.N. and Munguti, J.M. 2021. The prospects of biofloc technology (BFT) for sustainable aquaculture development. Scientific African, 14, (2021) e01053.
- Palachek, R. M. and Tomasso, J. R., 1984. Toxicity of Nitrite to Channel Catfish (*Ictalurus punctatus*), Tilapia (*Tilapia aurea*), and Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*): Evidence for a Nitrite Exclusion Mechanism. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 41, pp. 1739-1744.
- Panigrahi, A., Esakkiraj, P., Jayashree, S., Saranya, C., Das, R.R. and Sundaram M., 2019. Colonization of enzymatic bacterial flora in biofloc grown shrimp *Penaeus vannamei* and evaluation of their beneficial effect. Aquaculture International, (2019) 27: pp. 1835-1846.
- Perez-Fuentes, J.A., Hernandez-Vergara, M.P., Perez-Rostro, C.I., and Fogel, I., 2016. C:N ratios affect nitrogen removal and nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in abiofloc system under high density cultivation. Aquaculture, 452, (2016) pp. 247-251.
- Pinheiro, I., Carneiro, R.F.S., Vieira, F.N., Gonzaga, L.V., F, R., Costa, A.C.O., Magallon-Barajas, F.J. and Seiffert, W.Q. 2020. Aquaponic production of *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in

- biofloc system at different salinities. *Aquaculture*, 519, (2020) 734918.
- Pinho S.M., Molinari D., Mello G.L., Fitzsimmons K.M. and Emereciano M.G.C., 2017. Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecological Engineering*, 103, (2017) pp. 146–153.
- Poli, M.A., Schweitzer, R. and Nuner, A.P.O. 2015. The use of biofloc technology in South American catfish (*Rhamdia quelen*) hatchery: Effect of suspended solids in the performance of larvae. *Aquacultural Engineering*, 66, (2015) pp. 17–21.
- Poli, M.A., Legarda, E.C., Lorenzo, M.A., Martins, M.A. and Vieira F.N. 2019. Pacific white shrimp and Nile tilapia integrated in a biofloc system under different fish-stocking densities. *Aquaculture*, 498, (2019) pp. 83–89.
- Qiao, G., Zhang, M., Li, Y., Xu, C., Xu, D.H., Zhao, Z., Zhang, J. and Li, Q. 2018. Biofloc technology (BFT): An alternative aquaculture system for prevention of Cyprinid herpesvirus 2 infection in gibel carp (*Carassius auratus gibelio*). *Fish and Shellfish Immunology*, 83, (2018) pp. 140–147.
- Rahmatullah, H.D., Prayogo. and Rahardja B.S. 2020. Different addition of molasses on feed conversion ratio and water quality in catfish (*Clarias* sp.) rearing with biofloc-aquaponic system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 441, (2020) 012122.
- Rajesh, K.R., and Cho, J.Y., 2014. Reuse of hydroponic waste solution, *Environmental science and pollution research international*, 16, pp.

9569-9577.

- Rakocy, J.E., 2007. Ten guidelines for aquaponics systems. 10th Anniversary Issue, Aquaponics J., 46: pp. 14-17.
- Randall, D.J. and Tsui, T.K.N. 2002. Ammonia toxicity in fish. Marine Pollution Bulletin, 45, (2002) pp. 17-23.
- Ray, A., Dillon, K.S. and Lotz, J.M., 2011. Water quality dynamics and shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production in intensive, mesohaline culture systems with two levels of biofloc management. Aquacultural Engineering, 45, (2011) pp. 127-136.
- Rijn, J.V., 1996, The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture-A review. Aquaculture, 139, (1996), pp. 181-201.
- Rocha, A.F., Biazetti-Filho, M.L., Stech, M.R. and Silva, R.P. 2017. Lettuce Production in Aquaponic and Biofloc Systems with Silver Catfish *Rhamdia quelen*. Boletim do Instituto de pesca. 44, (2017) pp. 64-73.
- Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N. and Verstraete, W., 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. Aquaculture, 277, (2008) pp. 125-137.
- Schveitzer, R., Arantes, R., Costodio, P.F.S., Santo, C.M.D.E., Arana, L.V., Seiffert, W.Q. and Adreatta, E.R.. 2013. Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. Aquacultural Engineering 56, pp. 59-70.
- Seginer, I. and Halachmi, I., 2008. Optimal stocking in intensive

- aquaculture under sinusoidal temperature, price and marketing conditions. *Aquaculture Engineering*, 39, pp. 103–112.
- Serezli, R., Kucukagtas, A. and Kurtoglu, I.Z. 2016. Acute Toxicity of Ammonia and Nitrite to Angel Fish (*Pterophyllum scalare*, Liechtenstein 1823) and The Effect of Erythrocyte Morphology. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25, (2016) pp. 3119–3124.
- Shamsuddin, M., Hossain, M.B., Rahman, M., K, M.S., Shufol, M.B.A., Rashid M.M., Asadujjaman, M. and Rakib, M.R.J. 2022. Application of Biofloc Technology for the culture of *Heteropneustes fossilis* (Bloch) in Bangladesh: stocking density, floc volume, growth performance, and profitability. *Aquaculture International*, 30, (2022) pp. 1047–1070.
- ^aSilva J.L.S., Cavacante, D.H., Carvalho, F.C.T., Vieira R.H.S.F., Sa, M.V.C. and Sousa O.V., 2016. Aquatic microbiota diversity in the culture of Nile tilapia(*Oreochromis niloticus*) using bioflocs or periphyton: virulence factors and biofilm formation. *Acta Scientiarum. Animal Sciences. Maringa*, V. 38, n. 3, pp. 233–241.
- ^bSilva U.L., Falcon, D.R., Pessoa, M.N.C. and Correia, E.S., 2016. Carbon sources and C:N ratios on water quality for Nile tilapia farming in a biofloc system. *Engenharia de Pesca. Rev. Caatinga, Mossoro*, v. 30, n. 4, pp. 1017 - 1027.
- Singh, J., Sarma, K., Kumar, T., Ahirwal, S.K. Raut, S. and Keer, N.R. Bio-floc Technology (BFT): An Intensive Eco Sustainable and Cost-Effective Tool for Aquaculture. 2020. *Food and Scientific Reports*, Volume: 1, Issue: 10, pp. 11–14.

- Solis-Toapanta, E., Fisher, P. and Gomez, C., Growth rate and nutrient uptake of basil in small-scale hydroponics. 2020. Hortscience, 55, (4), pp. 507-514.
- Sontakke, R. and Haridas, H. 2018. Economic Viability of Biofloc Based System for the Nursery Rearing of Milkfish (*Chanos chanos*). International journal of current microbiology and Applied Sciences, 7, (8), pp. 2960-2970.
- Souza, J., Cardozo, A., Wasielesky, W. and Abreu, P.C., 2019. Does the biofloc size matter to the nitrification process in Biofloc Technology (BFT) systems?. Aquaculture, 500, (2019) pp. 443-450.
- Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G. and Schmidt, U. 2016. Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. Agricultural Water Management, 178, (2016) pp. 335-344.
- Tacon, A.G.J. and Metian, M., 2015. Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture. Reviews in Fisheries science & aquaculture, 23, pp. 1-10.
- Tanay, D.D., Abella T.T., Vera Cruz, E.M., Sace, C.F., Fajardo, L.J., Velasco, R.R. and Abucay J.S., 2020., Microbial Community Response to Carbon-Nitrogen Ratio Manipulation in Biofloc Culture. The Philippine Journal of Fisheries, 27, (2) pp. 193-207.
- Thurston, R.V. and Russo, R.C. Ammonia Toxicity to Fishes. Effect of pH on the Toxicity of the Un-ionized Ammonia Species. American Chemical Society, 15, (7) pp. 837-840.
- Thurston, R.V., Russo, R.C., Luedtke, R.J. Smith, C.E., Meyn, E.L.,

- Chakoumalos C., Wang, K.C. and Brown C.J.D. 1984. Chronic toxicity of ammonia to rainbow trout, Trans Am Fish Soc., (113), pp. 56-73.
- Tidwell, J.H. 2012. Aquaculture Production Systems. Chapter 12. Biofloc-based Aquaculture Systems. The World Aquaculture Society, Kentucky State University, pp. 279-307.
- Tomasso, J. R. 1994. Toxicity of Nitrogenous Wastes to Aquaculture Animals. Reviews in Fishery Science, 2, (4) pp. 291-314.
- Vyas, A. 2020. New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. Trends of Microbial Biotechnology for Sustainable Agriculture and Biomedicine Systems: Perspectives for Human Health, 2020, pp. 31-42.
- Widanarni., Ekasari, J. and Maryam, S. 2012. Evaluation of Biofloc Technology Application on Water Quality and Production Performance of Red Tilapia *Oreochromis* sp. Cultured at Different Stocking Densities. HAYATI Journal of Biosciences, Vol. 19. No. 2, pp. 73-80.
- Xu, W.J., Morris, T.C. and Samocha, T.M., 2016. Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. Aquaculture, 453, (2016) pp. 169-175.
- Zaki, M.A.A., Alabssawy, A.N., Nour A.E.M., Basuini, M.F., Dawood, M.A.O., Alkahtani. and Abdel-Daim, M.M. 2020. The impact of stocking density and dietary carbon sources on the growth, oxidative

- status and stress markers of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared under biofloc conditions. Aquaculture Reports, 16, (2020) 100282.
- Zhen, H., Lee, J.W., Chandran, K., Kim, S.P. and Brotto, A.C. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. Bioresour Technol, 188, pp. 92-98.
- Zhao, B., He, Y.L. and Zhang, X.F. 2010. Nitrogen removal capability through simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Bacillus* sp. LY. Environmental Technology vol. 31, No. 4, 1 April 2010, pp. 409-416.
- 김나나, 박준성, 이정호, 황주애, 최지용, 김형수, 2022. 바이오플락기술 기반 아쿠아포닉스와 수경재배 시스템에서 사육한 메기와 피텔 성장에 관한 연구. 수산해양교육연구, 34, (2), pp. 360-370.
- 김동완, 구재근, 박성우, 2007. 양식 뱀장어(*Anguilla japonica*)의 아질산 독성에 미치는 아스피린의 투여효과. 한국어병학회지, 20, (3), pp. 291-297.
- 김광석, 임상구, 방인철, 최진, 이상민, 2013. 미꾸리(*Misgurnus anguillicaudatus*) 치어 성장을 위한 사료의 적정 단백질 및 지질 함량. 한국수산과학회지, 46, (4), pp. 371-376, 2013.
- 김석렬, 장진우, 김범주, 장인권, 임현정, 김수경, 2019. 바이오플락과 아쿠아포닉스를 이용한 도심형 양식시스템에서의 메기양식. Korean Journal of Environmental Biology, 37, (4), pp. 545-553.
- 박준성, 이정호, 김나나, 황주애, 김형수, 2021. 바이오플락 양식기술(Biofloc Technology, BFT)로 사육한 메기의 성장 및 수질변화 연구. 수산해양교육연구, 33, (2), pp. 367-375.

- 서석, 최은지, 박정환, 2019. 질산성 질소가 감성돔(*Acanthopagrus schlegelii*) 치어에 미치는 급성 독성 영향. 한국수산과학회지, 52, (3), pp. 268-273.
- 염동혁, 이성규, 2006. 미꾸리(*Misgurnus anguillicaudatus*)의 치어 및 자어에 대한 4가지 농약의 급성독성. J. Environ. Toxicol., Vol. 21, No. 4 (2006), pp. 311-316.
- 이동훈. 2021. 황금 비단잉어를 이용한 Hybrid 바이오플락 아쿠아포닉 시스템과 수경재배 시스템의 엽채류 생산성 비교 연구. 수산해양교육연구, 33, (5), pp. 1027-1037.
- 장인권, 김수경a, 김수경b, 전제천, 서형철, 조영록. 2014. 새우양식 기술지, 친환경 새우양식을 위한 바이오플락 양식기술. 국립수산과학원 서해수산연구소, pp. 210.
- 최지용, 박준성, 김형수, 황주애, 이동길, 이정호, 2020. Biofloc Technology (BFT) 적용을 위한 수질특성에 대한 연구. 수산해양교육연구, 32, (6), pp. 1632-1638.
- 하헌주, 정관식, 2017. 아쿠아포닉스의 국내 도입가능성에 관한 연구. 수산해양교육연구, 29, (4), pp. 1225-1234.
- 황주애, 이정호, 박준성, 최종렬, 이동길, 김형수, 2021. 바이오플락 기반 아쿠아포닉스 시스템 개발에 의한 뱀장어(*Anguilla japonica*)와 재배작물의 성장에 미치는 영향. 한국수산과학회지, 54, (4), pp. 418-425.

Acknowledgement

학위과정 동안 정말 많은 분들께 도움과 조언을 받았습니다. 학위 논문 지도 뿐 아니라 한 분야의 전문가로서 가져야 할 덕목과 지혜를 가르쳐 주신 박정환 지도교수님, 학위 논문에 부족한 부분이 많았음에도 시간을 내어 정말 많은 조언과 큰 도움을 주신 김병기 교수님, 이승형 교수님, 김찬희 교수님, 김창훈 교수님, 그리고 함께 근무하며 옆에서 항상 응원해주셨던 이정호 연구관님, 이동길 연구관님, 김형수 박사님, 황주애 박사님, 송준영 박사님, 김나나 박사님, 최지용 박사님, 박종성 박사님, 구인본 박사님, 정해승 연구사에게 진심 어린 감사의 말씀을 드립니다.

또한 현재에 이르기까지 수산양식과 생물의 지식에 대한 뿌리를 알려주신 곽우석 교수님, 강석중 교수님, 김남길 교수님, 정우건 교수님, 박찬일 교수님, 백근욱 교수님, 연구기간 동안 함께 울고 웃었던 국립수산과학원 첨단양식실증센터 직원 분들에게도 감사의 말씀을 드리며, 연구소 생활 중 잘난 것 없는 선배의 잔소리를 참으며 같이 휴일에 상관없이 연구와 실험을 하며 저의 뒤를 따라 학위과정을 이어가고 있는 최종렬, 최지민 후배님에게도 감사의 말씀을 드립니다.

끝으로 항상 저를 위해 희생하시며 무한한 믿음과 함께 물심양면으로 지원해주신 부모님과 동생에게 머리 숙여 무한한 감사를 표하며, 앞으로 계속 정진하여 우리나라의 수산 양식 발전에 기여할 것을 약속 드립니다.