



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](#)

수 산 학 석 사 학 위 논 문

극동산 뱀장어(*Anguilla japonica*)의
사육수질과 성장에 대한
양식시스템과 공급사료 종류의 영향



2023년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

수 산 생 물 학 과

최 지 민

수 산 학 석 사 학 위 논 문

극동산 뱀장어(*Anguilla japonica*)의
사육수질과 성장에 대한
양식시스템과 공급사료 종류의 영향



지도교수 박 정 환

이 논문을 수산학 석사 학위 논문으로 제출함.

2023년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

수 산 생 물 학 과

최 지 민

최지민의 수산학석사 학위논문을
인준함.

2023년 8월 18일



위원장 이학박사 김형수 

위원 이학박사 김찬희 

위원 이학박사 박정환 

목 차

I. 서론	1
II. 재료 및 방법	4
1. 실험어 및 사육조건	4
2. 사육 시스템 구성	7
3. 사육 시스템의 유량 설정	9
4. 수질 환경 분석	11
5. 성장도 분석	12
6. 혈액학적 분석	13
7. 어체 일반성분 분석	13
8. 통계 분석	14
III. 결 과	15
1. 수질 환경 분석	15
2. 성장도 분석	19
3. 혈액학적 분석	22
4. 어체 일반성분 분석	24
IV. 고 찰	26
1. 수질 환경 분석	26
2. 성장도 분석	28
3. 혈액학적 분석	29
4. 어체 일반성분 분석	30
5. 종합 결론	31
요약	32
참고문헌	33
감사의 글	41

Effects of different systems and feed types on water quality and growth performance of Japanese eel (*Anguilla japonica*)

Jimin Choi

Department of Fisheries Biology, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Differences in water quality, growth, blood chemistry, and body composition of Japanese eels (*Anguilla japonica*) were examined to determine the effects of feeding different pellet types (paste type and extruded pellet type) and rearing in different systems (recirculating aquaculture system [RAS] and flow-through system [FTS]).

Eels (average weight 32.1 ± 0.4 g) were maintained in a 0.4-ton rearing tank and fed twice a day until satiation. The flow rate of both systems was set to 1.7 L/min, the photoperiod was set to 0L:24D, and the experiment was performed in triplicates. During the experiment, the total ammonia nitrogen and nitrite nitrogen were significantly higher in the RAS and paste groups. The weight gain and specific growth rates were significantly higher in the pellet type ($p < 0.05$), but were not significantly affected ($p > 0.05$) by differences in the aquaculture systems. Additionally, the condition factor and morphological indices did not differ significantly ($p > 0.05$) between the aquaculture systems and feed types. Blood analysis results were significantly affected by culture systems, but not by feed type. Cortisol and SOD levels were significantly higher ($p < 0.05$) in the FTS group than in the RAS group, and GPT levels were significantly higher ($p < 0.05$) in the RAS group than in the FTS group. Whole-body composition was affected by feed intake and crude protein and crude fat content differed significantly between the experimental groups ($p < 0.05$).

The results show that water quality management was more effective when

pellet type feed was supplied than in the paste type, and growth was improved the most when pellet type feed was supplied in RAS. Moreover, given the low environmental stress, it was suggested that feeding pellet type instead of paste type could help improve eel growth.



List of Figures

- Figure 1. Schematic drawing of the experimental recirculating system used in experiment. 8
- Figure 2. Comparison of EC (Electric conductivity, $\mu\text{s}/\text{cm}$) and TDS (Total dissolved solids, g/L) concentration of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste (PA) and pellet (PE) in two different systems (FTS, Flow through system; RAS, recirculating aquaculture system) during 62 days of experiment. 17
- Figure 3. Comparison of nitrate nitrogen (mg/L) concentration of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste (PA) and pellet (PE) in two different systems (FTS, Flow through system; RAS, recirculating aquaculture system) during 62 days of experiment. 18

List of Tables

Table 1. Proximate composition of paste and pellet feed used in experiment	6
Table 2. Water quality of Japanese eel (<i>Anguilla japonica</i>) fed paste and pellet in different systems for 62 days of experiment ...	16
Table 3. Growth performance of Japanese eel (<i>Anguilla japonica</i>) fed paste and pellet in different systems for 62 days of experiment	20
Table 4. Comparison of morphological indices of Japanese eel (<i>Anguilla japonica</i>) fed paste and pellet in different systems for 62 days of experiment	21
Table 5. Comparison of haematological indices of Japanese eel (<i>Anguilla japonica</i>) fed paste and pellet in different systems for 62 days of experiment	23
Table 6. Comparison of whole body composition of Japanese eel (<i>Anguilla japonica</i>) fed paste and pellet in different systems for 62 days of experiment	25

I. 서론

우리나라 내수면어업 생산량은 2017년부터 2022년까지 36천 톤에서 49천 톤으로 증가하였다. 그중 뱀장어의 생산량은 11천 톤에서 18천 톤으로 우리나라 내수면 어업의 약 30%의 생산 비중을 차지하고 있으며, 그 생산량은 지속적인 증가세를 보이고 있다. 또한, 양식어업 생산금액이 제일 높은 넙치류(flatfish, 703,438 백만원) 다음으로 많은 어종이 뱀장어(511,144 백만원)로 우리나라 주요 양식품종 중 하나이다 (KOSTAT, 2022). 뱀장어는 전 세계적으로 16종이 분포하고 있으며, 그중 극동산 뱀장어(*Anguilla japonica*)는 우리나라와 일본, 대만, 중국에서 양식되는 뱀장어의 주요 대상 품종이다. 뱀장어는 고부가가치 어종으로 양질의 단백질과 콜라겐, 비타민 등으로 이루어져 몸에 좋은 식품으로 널리 알려져 인기가 많은 내수면 양식품종이다(국립수산과학원, 2009).

뱀장어 양식방법은 대부분 지수식(Intensive pond culture system)으로 운영되고 있었으나, 최근 생산성 증대와 안정적인 사육관리를 위해 고밀도 순환여과양식 시스템(Recirculating aquaculture system, RAS)으로 전환되고 있다. 지수식의 경우, 개방된 노지에서 사육하는 방법으로 초기시설비와 관리비가 적게 소요된다는 장점이 있다. 그러나, 많은 물과 수면적이 필요하며 사계절 동안 자연적인 영향을 많이 받기 때문에 적정 사육온도 유지 및 유입수로 인한 외부 병원균 및 기생충의 유입을 방지하는데 어려움이 있다(Lee and Kim, 2006; Cho et al., 2011). RAS는 대표적인 친환경 양식방법 중 하나로, 사육수를 재순환시켜 물 사용을 줄이고 배출수 관리 및 영양분 재활용으로 환경에 미치는 영향이 적다(Martins et al., 2010; Zhang et al., 2011). RAS는 초기투자비와 관리비 등이 많이 소요되지만 환경 영향을 최소화할 수 있어 일정한 온도에서 고밀도로 양식이 가능하다. 또한, 지수식 양식 방법에 비해 생육기간이 짧고, 수면적 대비 생산성이 높아 생산비 절감 및 양식

효율을 개선하기 위해 기존의 지수식에서 RAS로 전환되고 있는 추세이다(Lee and Kim, 2006).

RAS는 일반적으로 물리적 그리고 생물학적 여과장치, 펌프, 사육수조 그리고 추가적인 수질 정화장치로 구성되어 시스템 내의 수질 환경을 개선하고 질병 감염에 대한 통제를 가능하게 한다(Hutchinson et al., 2004; Kucuk et al., 2010). 생물을 사육하면서 배출되는 노폐물은 물리적 여과장치를 통해 제거하고, 생물학적 여과장치 내의 질산화 작용으로 수중 내 암모니아와 아질산의 농도를 적정농도로 유지한다. 오존과 ultraviolet (UV) 살균기와 같은 살균장치를 통해 수질을 정화 시켜 사육수의 최소 90%를 재순환시켜 사용할 수 있다(Greiner and Timmons, 1998; Summerfelt and Vinci, 2008; Choi et al., 2019; Aich et al., 2020; Ahmed and Turchini, 2021).

양식산업에서 큰 비용을 차지하며, 관리 효율성 측면에서 가장 중요한 요인은 사료 공급이다(Robb and Crampton, 2013). 뱀장어 양식 업계에서는 사료 공급 시 대부분 반죽사료(paste)에 의존하고 있으며, 일부 양식장에서만 부상 펠릿사료(pellet)를 공급하고 있다(Kim et al., 2008). 그러나 반죽사료는 물에 잘 풀어지는 특성을 가지고 있어 수중 내 유실되는 양이 많고, 부유 고형물이 생성되어 수질이 쉽게 악화된다(Yaqoob et al., 2010; Diamahesa et al., 2021). 또한, RAS에서 반죽사료로 뱀장어 양식 시 여러 문제가 발생할 수 있다. 반죽사료 공급으로 사료의 유실량이 많아지게 되면 사육수 내 고형물이 증가하게 되어 시스템의 수처리 기능이 저하된다. 고농도의 고형물로 인해 뱀장어의 아가미 손상과 스트레스 증가로 인해 성장이 저하되며, 병원체에 영양을 공급하게 되어 질병 감염의 위험성이 증가하게 된다. RAS의 생물학적 여과조의 여과재에 고형물이 쌓이게 되면 자가영양세균이 부착할 수 있는 표면적이 감소하게 되어 질산화 작용에 영향을 주게 되고, 수중 내 암모니아와 아질산 등과 같은 질소화합물의 농도가 증가하게 되어 수질이 악화된다(Chen et al., 1993; Summerfelt and Penne, 2005; Xiao et al., 2019). 고형물의 증가는

RAS 여과조 내 타가영양세균의 과도한 증식을 유발하며 이로 인해 타가영양세균의 산소소비량이 증가하게 된다. 용존산소량(Dissolved oxygen, DO) 감소와 이산화탄소 증가로 pH가 감소하게 되면 주 사육생물인 뱀장어의 대사활동과 성장에 부정적인 영향을 주며, 타가영양세균과 자기영양세균과의 경쟁으로 생물학적 여과조의 효율을 떨어트리게 되어 수질에 영향을 준다. 또한, 고형물 증가로 인한 탁도 증가는 시스템 내 살균 장치의 효율성을 떨어트리며 질병 미생물의 증가로 질병 발생의 위험이 높아진다(Badiola and Bostock, 2012). 따라서, RAS 시스템은 양식생물의 사육에 있어 사육수 수처리 기술이 매우 중요하다. 반죽사료의 공급으로 인한 고형물 증가는 뱀장어의 성장 감소와 RAS 내 생물학적 여과조, 살균장치, 펌프 등의 기능을 저하 시킬 수 있다. 이로 인해, 잦은 수리와 해결을 위한 추가 비용 발생 등으로 결국 생산성과 경제성에 영향을 주게 되는 문제가 발생할 수 있다.

반면에 부상 펠릿사료는 반죽사료에 비해 취급 및 보관이 쉽다. 부상 펠릿사료 공급 시 사육생물이 수면에서 사료를 섭취할 수 있어 양식업자가 사육어의 먹이 반응을 관찰하여 그에 따라 먹이 공급을 유용하게 할 수 있다. 또한, 반죽사료 보다 물에 풀어짐이 적어 수질 환경을 안정적으로 유지하기 비교적 편하다는 장점이 있다 (Yaqoob et al., 2010; Robb and Crampton, 2013; Diamahesa et al., 2021). 따라서, 양식시스템의 안정적인 관리와 생산량 증가를 위해 뱀장어 사육에 RAS 시스템 적용 시 반죽사료에서 부상 펠릿사료로의 전환이 필요한 실정이다.

본 연구의 목적으로는 첫째, 최근 주목받고 있는 친환경 양식방법인 RAS에서 사료 종류를 달리하였을 때 수질 비교분석 그리고 둘째, 뱀장어 사육 시 반죽사료와 부상 펠릿사료를 공급하였을 때에 따른 성장도 및 건강도 분석이다. 이를 통해 뱀장어를 RAS에서 부상 펠릿사료로 사육 시 적용 가능성을 확인하여 친환경적인 뱀장어 양식장 운영을 위한 관리 요소 개발의 기초자료를 확보하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험어 및 사육조건

본 실험은 뱀장어를 유수식(Flow through system, FTS)과 RAS에서 각각 반죽 사료(paste)와 부상 펠릿사료(pellet)로 구분하여 공급하였으며, 62일 동안 사육 실험을 진행하였다.

실험에 사용된 뱀장어는 국립수산물과학원 첨단양식실증센터에서 사육 중이던 개체와 일반 뱀장어 양식장에서 구입한 개체들을 2주 동안 사육관리하여 적응시킨 후 무작위로 선별하여 3 반복으로 진행하였다. 평균전장 326 ± 22 mm, 평균무게 32.1 ± 0.4 g의 뱀장어를 수조당 60 마리, 총무게 2.00 ± 0.02 kg, 밀도 5.01 ± 0.04 kg/m³로 12개의 수조에 수용 후, 일주일 동안의 수조 내 적응기간을 가진 후 실험을 시작하였다.

실험에 사용할 사료는 제조하여 사용하려고 했으나 반죽사료의 경우 점성을 위한 전분 추가로 반죽과 부상 펠릿 사료를 동일 성분으로 제조하는데 어려움이 있었다. 실험에 사용한 사료는 뱀장어 양식 현장에서 많이 이용되고 있는 시판용 분말 사료(흑자사료, Suhyup, Uiryong, Korea)와 부상 펠릿사료(F-GR, Purina, Seongnam, Korea)를 택하였다. 사료의 proximate analysis를 Table 1에 나타내었다. 먹이 공급은 실험기간 동안 1일 2회(10:00, 17:00)로, 먹이 반응이 없을 때까지 반복으로 공급하였다. 반죽사료는 수분함량 50%로 제조하여 공급하였으며, 공급 후 남은 사료는 건조 후 무게를 측정해 섭취량을 계산하였다.

수온의 경우, 1 kW의 히터(OKE-HE-100, Sewon OKE, Busan, Korea)로 RAS 실험수조의 수온을 25°C로 유지하였으며, FTS 실험수조는, 저온의 유입수(지하수)로 인한 온도 변화를 최소화하기 위하여 2 kW의 히터(OKE-HE-100,

Sewon OKE, Busan, Korea)를 사용했다. 일정한 대기온도 유지를 위해서 난방기 (RNW2900P2S, LG Electronics, Seoul, Korea)를 이용하여 25℃로 유지한 채 상시 가동하였다. 용존산소량은 수조마다 에어스톤 2개를 설치하고 에어브로워(Hiblow HP-200, Techno Takatsuki Co., Ltd, Osaka, Japan) 를 이용하여 6 mg/L 이상으로 유지하였다. pH는 FTS 실험구의 유입수 범위에서 유지하기 위해 지하수 수치를 기준으로 잡아 RAS 실험구의 pH 값이 그보다 낮아지면 중탄산나트륨(NaHCO_3 , OCI Company, Seoul, Korea)을 첨가하며 관리하였다. 광주기는 실험기간 동안 24 D로 계속 유지하였다. RAS 실험구는 무환수로 진행하였으며, RAS 실험구는 증발량과 고형물제거기를 세척하면서 발생하는 유실량 만큼 지하수로 채워주었다. 모든 실험수조는 5 μm -microfilter (PP filter, Human science Co., Ltd, Hanam, Korea)로 여과된 지하수를 사용하였다.

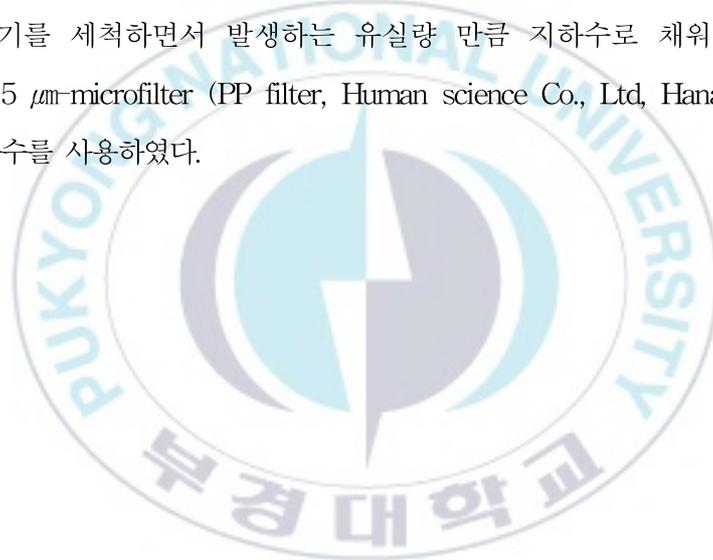


Table 1. Proximate composition of paste and pellet feed used in experiment

Component (% dry matter)	Content (%)	
	PA*	PE**
Moisture	5.8	5.4
Crude protein	67.2	67.7
Crude fat	7.0	9.6
Crude ash	11.0	10.7

*PA, paste; **PE, pellet

2. 사육 시스템 구성

본 실험에 사용된 RAS의 모식도는 Figure 1에 나타내었다. 시스템은 0.4 ton (\varnothing 100 cm \times H 50 cm) polypropylene (PP) 원형수조로 된 사육조와 생물학적 여과조, 외부여과기(20 W, EHEIM classic 600, EHEIM, Deizisau, Denmark), UV 살균기(18 W, UV-A18W, PERIHA, Guangdong, China)로 구성하였다. 외부여과기 내부에는 폴리나젤 스펀지(35ppi, DYnTEC, Seoul, Korea)를 넣어 고형물제거의 역할을 하도록 하였으며, 주 1회 분리하여 내부를 세척하였다. 생물학적 여과조에는 한 달 이상 숙성시킨 유동상 여과재(TK1, TaeJin Engineering, Busan, Korea) 100 L를 넣었으며, 유니온 호스를 설치해 여과재가 부유할 수 있도록 하였다. 여과조에는 15 W 펌프를 설치해 UV 살균기를 거쳐 다시 사육조로 물이 이동할 수 있도록 했다. 펌프에는 전극식 자동수위센서(YQ-5000, Youngjin, Korea)를 연결하여 사육조와 여과조의 수위를 일정하게 유지하였다.

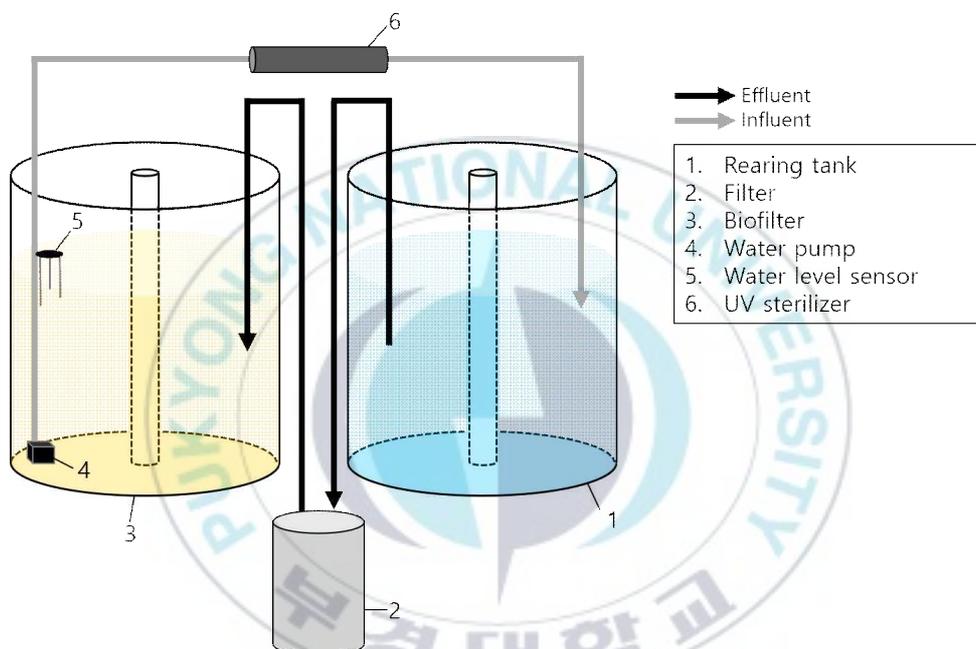


Figure 1. Schematic drawing of the experimental recirculating system used in experiment.

3. 사육 시스템의 유량 설정

뱀장어 사육시 수중에 배출되는 총 암모니아성 질소 (Total ammonia nitrogen, TAN) 농도를 적정 수준으로 유지하기 위해 물질수지(mass balance) 계산을 통해 필요한 최소의 유량을 결정하였다.

뱀장어의 TAN 배설량 계산을 위해 사료 내 단백질 함량은 부상 펠릿사료를 기준으로 하였으며, 순 단백질 이용률(Net protein utilization, NPU)은 Jauncey(1982)의 연구를 참고하여 20%로 설정 후 식 1을 통해 하루 TAN 생성량 (TAN_p)을 도출해냈다. 그 후, 하루 TAN 생성량을 처리할 수 있는 최대 필요 유량(Q)을 mass balance approach (식 2)를 이용하여 계산하였다. 사육조에서 생물학적 여과조로 배출되는 TAN 농도(C_{out})는 뱀장어의 TAN 안전농도를 참고하였으며, 사육조로 다시 유입되는 TAN 농도(C_{in})는 시스템에 사용한 생물학적 여과조의 질소 처리량에 따라 값을 설정하였다. 아래 두 식을 이용하여 적정 유량을 계산한 결과, RAS 시스템 내의 유량을 1.7 L/min (6.12 rotation/day)로 설정하였으며, FTS 실험구도 동일한 조건을 맞추기 위해 같은 유량으로 설정하여 실험을 진행하였다.

$$TAN_p = (1 - NPU) \times P_f \times N \times W \quad (\text{식 1})$$

TAN_p = TAN 생성량 (kg/day)

NPU = 순 단백질 이용률 (%)

P_f = 사료 내 단백질 함량 (fraction)

N = 단백질 내 질소 함량 (fraction)

W = 하루 공급 사료량 (kg)

$$Q = \frac{TAN_p}{1,440 \times (C_{out} - C_{in}) / 1,000,000} \quad (\text{식 2})$$

Q = 유량 (L/min)

C_{in} = 유입되는 TAN 농도 (mg/L)

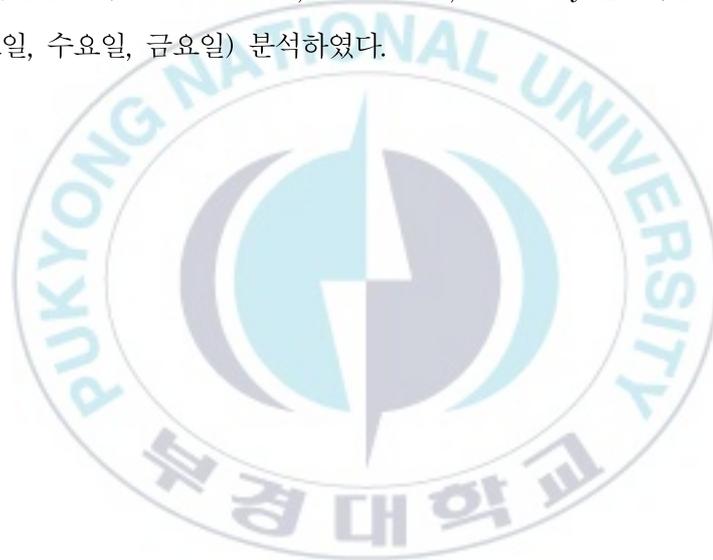
C_{out} = 배출되는 TAN 농도 (mg/L)

1,440과 1,000,000 = 단위 변환 상수



4. 수질 환경 분석

사육수의 수질 환경은 수온, DO, pH, 전기전도도(Electrical conductivity, EC), 총 용존 고형물(Total dissolved solids, TDS)을 다항목 수질측정기(YSI-650 Inc.; Yellow spring Instruments, Yellow Springs, Ohio, USA)를 이용하여 오전 사료공급 전에 매일 1회 측정하였다. TAN, 아질산성 질소(NO_2^- -N), 질산성 질소(NO_3^- -N)는 사료 공급 전에 채수하여 분석 시약키트(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)로 분석하여 흡광광도계(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용한 비색법으로 주 3회(월요일, 수요일, 금요일) 분석하였다.



5. 성장도 분석

사육실험 종료 후 어체측정을 위해 24시간 절식시킨 후, 각 실험구의 뱀장어는 MS-222 (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 이용하여 100 ppm 농도로 마취한 후 평균 전장(mm) 및 무게(g)를 측정하였다. 측정값에 따라 실험어의 증체율 (Weight gain rate, WGR), 일일성장률(Specific growth rate, SGR), 생존율 (Survival rate), 사료계수(Feed coefficient ratio, FCR) 그리고 비만도(Condition factor, CF)를 도출하였으며, 수조별 5 마리씩, 내장 무게(g)와 간 무게(g)를 측정하여, 내장중량지수(Viscerosomatic index, VSI, %) 그리고 간중량지수 (Hepatosomatic index, HSI, %)를 아래 제시한 식으로 계산하였다.

$$\text{WGR (\%)} = [\text{Final weight (g)} \times \text{initial weight (g)} \times 100] / \text{initial weight (g)} \quad (\text{식 1})$$

$$\text{SGR (\%/d)} = [\text{Log}_e(\text{final weight (g)}) - \text{Log}_e(\text{initial weight (g)})] \times 100 / \text{days} \quad (\text{식 2})$$

$$\begin{aligned} \text{Survival rate (\%)} \\ = (\text{Initial individuals} - \text{Final individuals}) / \text{Initial individuals} \times 100 \end{aligned} \quad (\text{식 3})$$

$$\text{FCR} = \text{Feed intake (kg)} / [\text{Final total weight (kg)} - \text{initial total weight (kg)}] \quad (\text{식 4})$$

$$\text{CF} = [\text{wet weight (g)} / (\text{total length (mm)})^3] \times 100 \quad (\text{식 5})$$

$$\text{VSI (\%)} = [\text{wet weight of viscera (g)} / \text{wet weight (g)}] \times 100 \quad (\text{식 6})$$

$$\text{HSI (\%)} = [\text{wet weight of liver (g)} / \text{wet weight (g)}] \times 100 \quad (\text{식 7})$$

6. 혈액학적 분석

사육 시스템별 사료 종류에 따른 뱀장어의 스트레스 정도를 보기 위해 혈액 내 스트레스 호르몬, 항산화 효소 그리고 간 기능 효소를 분석하였다. 실험 종료 후 헤파린(Sigma aldrich, St. Louis, USA) 주사액이 처리된 1 mL 주사기를 사용하여 실험어의 미부혈관에서 수조당 5마리의 혈액을 채혈하였다. 채혈한 혈액은 6,000 rpm (Rotation per minute)에서 20분간 원심분리한 후 혈장을 채취하여 분석실험 전까지 동결보존(-80℃)하였다. 혈액분석기(FUJI DRI-CHEM NX 600V, FUJIFILM, Japan)를 사용하여 Glutamic oxaloacetic transaminase (GOT), Glutamic pyruvic transaminase (GPT), Glucose를 분석하였다. 또한, ELISA kit (MyBioSource, San Diego, USA)를 사용하여, Cortisol, Superoxide dismutase (SOD), Catalase (CAT)를 분석하였다.

7. 어체 일반성분 분석

실험어의 어체 일반성분분석을 위하여 각 수조에서 3마리를 무작위로 샘플하여 측정 전까지 동결보존(-80℃)하였다. 성분분석은 동결건조 후, 수분함량은 135℃에 2시간 동안, 조회분은 600℃에 2시간 동안 건조한 후 측정하였다. 조지방은 속실렛 추출법(Soxhlet extraction), 조단백질은 킬달증류법(Kjeldahl Method)으로 측정하였다.

8. 통계 분석

통계처리는 SPSS 24 program (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 Two-way ANOVA-test [2 (사육 시스템; FTS, RAS) × 2 (사료 종류; paste, pellet)]를 통해 실험구 간 상관요인을 분석하였으며, Bonferroni로 주효과 분석을 통해 실험구 간의 유의성을 검정하였다($p < 0.05$).



Ⅲ. 결 과

1. 수질 환경 분석

양식시스템을 FTS와 RAS 실험구로 구분하여 극동산 뱀장어(*Anguilla japonica*)에 반죽사료와 부상 펠릿사료를 62일 동안 공급하며 측정된 수질 결과는 다음과 같다(Table 2). 실험기간 동안 사육수의 수온 DO, pH는 실험구별 유의한 차이가 나타났으나($p < 0.05$), 평균적으로 수온은 24.4~24.7°C, DO는 6.8~7.1 mg/L 그리고 pH는 6.77~6.86로 설정했던 사육환경 조건에 맞게 유지하였다. 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소는 양식시스템과 사료 종류에 따라 유의적인 차이가 나타났으며($p < 0.05$), 양식시스템과 사료 종류 간의 유의적인 상관관계가 나타났다($p < 0.05$). RAS 실험구에서 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소는 평균 1.00 ± 0.64 mg/L와 0.757 ± 0.464 mg/L로 FTS 실험구에 비해 유의적으로 높게 나타났으며($p < 0.05$), 반죽사료 공급 시 총 암모니아 질소 농도와 아질산성 질소 농도는 0.859 ± 0.651 mg/L, 0.485 ± 0.502 mg/L로 부상 펠릿사료보다 유의적으로 더 높게 나타났다($p < 0.05$).

각 실험구의 EC와 TDS는 RAS 실험구에서 실험이 진행될수록 증가하였다(Figure 2). 질산성 질소는 FTS 실험구에서 평균 4.17 ± 0.31 mg/L로 유지되었으나, RAS 실험구에서는 실험이 진행함에 따라 꾸준히 증가하였다(Figure 3).

Table 2. Water quality of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste and pellet in different systems for 62 days of experiment

System	Feed	Temperature (°C)	DO (mg/L)	pH	TAN (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)
*FTS	paste	24.4±0.2	6.83±0.35	6.86±0.12	0.530±0.159	0.151±0.102
	pellet	24.7±0.2	6.80±0.34	6.85±0.13	0.396±0.108	0.146±0.093
**RAS	paste	24.5±0.3	6.85±0.41	6.81±0.22	1.28±0.78	0.852±0.435
	pellet	24.7±0.2	7.06±0.30	6.77±0.23	0.806±0.356	0.671±0.386
Two-way ANOVA						
System		<i>p</i> =0.215	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05
	*FTS	24.6±0.3	6.81±0.40	6.86±0.14	0.463±0.169	0.141±0.105
	**RAS	24.6±0.4	6.96±0.43	6.79±0.27	1.00±0.64	0.757±0.464
Feed		<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> =0.058	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05
	paste	24.5±0.4	6.84±0.45	6.84±0.20	0.859±0.651	0.485±0.502
	pellet	24.7±0.3	6.93±0.39	6.81±0.23	0.599±0.344	0.410±0.401
Interaction		<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> =0.415	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05

*FTS, Flow through system; **RAS, Recirculating aquaculture system

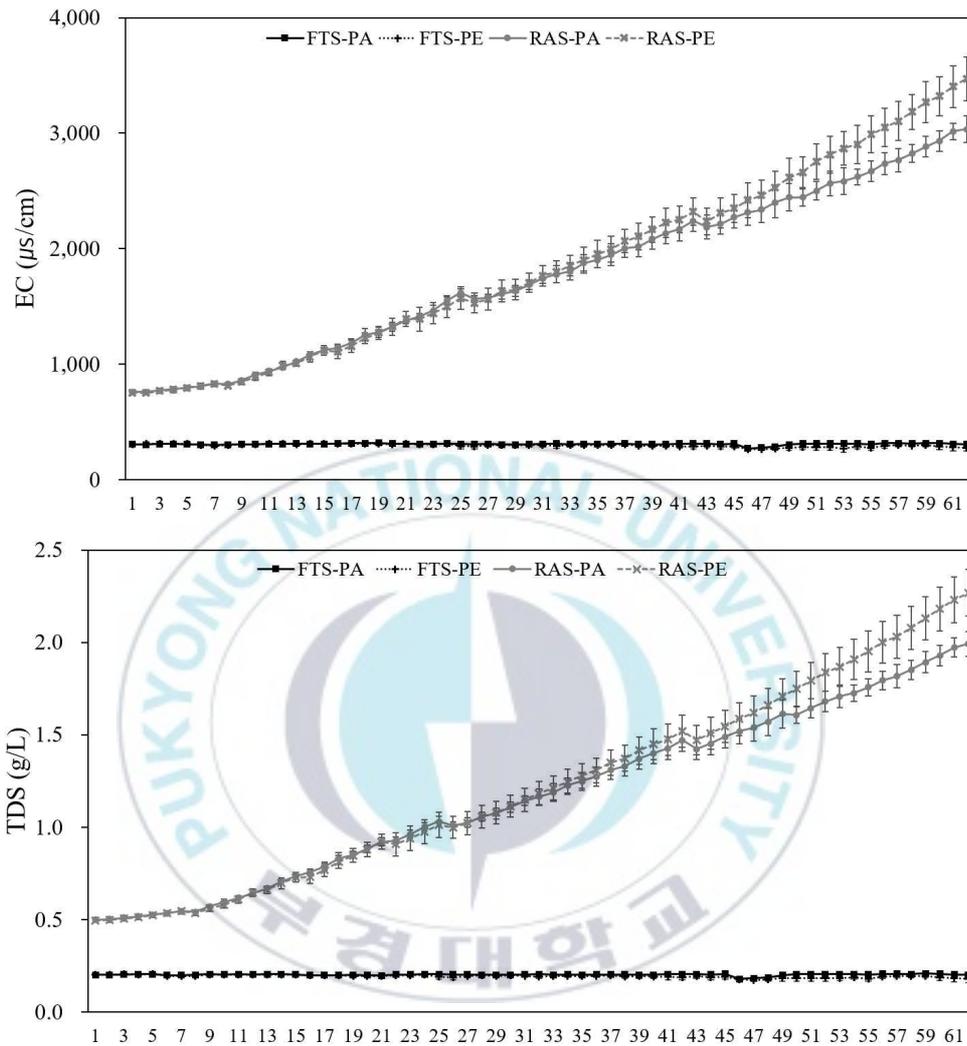


Figure 2. Comparison of EC (Electric conductivity, $\mu\text{s}/\text{cm}$) and TDS (Total dissolved solids, g/L) concentration of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste (PA) and pellet (PE) in two different systems (FTS, Flow through system; RAS, recirculating aquaculture system) during 62 days of experiment

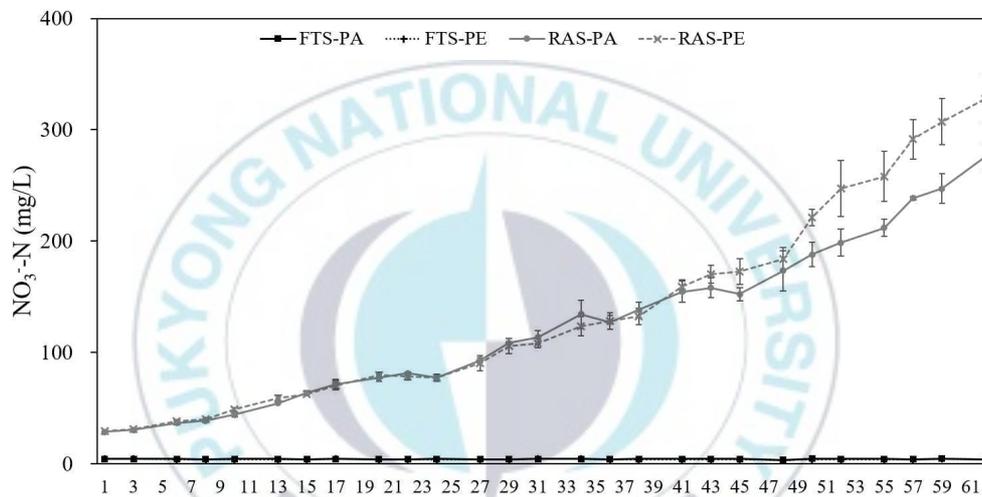


Figure 3. Comparison of nitrate nitrogen (mg/L) concentration of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste (PA) and pellet (PE) in two different systems (FTS, Flow through system; RAS, recirculating aquaculture system) during 62 days of experiment.

2. 성장도 분석

뱀장어의 양식시스템에 따른 반죽사료와 부상 펠릿사료 공급에 대한 성장 결과는 다음과 같다(Table 3). 뱀장어의 성장은 양식시스템에 따른 영향을 받지 않았으며 ($p>0.05$), 사료 종류에 따라 영향을 받은 것으로 나타났으나($p<0.05$), 양식시스템과 사료 종류 간에 유의적인 상관관계가 나타나지 않았다($p>0.05$). 전체 WGR, SGR는 반죽사료보다 부상 펠릿사료를 공급했을 때 $154\pm 10\%$, $1.5\pm 0.1\%/day$ 로 유의적으로 높게 나타났으며($p<0.05$), FCR도 부상 펠릿사료를 공급했을 때 1.23 ± 0.05 로 유의적으로 낮은 값이 나타났다($p<0.05$). 실험기간 동안 양식시스템과 사료종류에 따라 먹이 섭취량에 유의적인 차이가 나타났으나($p<0.05$), 양식시스템과 사료 종류 간에 유의적인 상관관계가 나타나지 않았다($p=0.235$). RAS와 반죽사료 실험구에서 각 4.16 ± 0.23 kg, 4.20 ± 0.25 kg으로 다른 실험구에 비해 사료 섭취량이 많은 결과가 나타났다.

뱀장어의 CF, VSI, HSI 결과는 Table 4에 나타났다. 양식시스템과 사료종류에 대해 유의한 차이가 나타나지 않았으며($p>0.05$), 서로 간의 상관요인이 나타나지 않았다($p>0.05$).

Table 3. Growth performance of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste and pellet in two different systems for 62 days of experiment

System	Feed	Final BW (g)	Final TW (kg)	¹ WGR (%)	² SGR (%/day)	³ Survival rate (%)	Feed intake (kg)	⁴ FCR
*FTS	paste	75.4±4.8	4.67±0.30	134±17	1.37±0.11	98.9±0.9	4.08±0.32	1.54±0.05
	pellet	78.9±3.4	4.91±0.11	148±9	1.46±0.06	98.4±1.6	3.46±0.62	1.20±0.04
**RAS	paste	75.4±5.1	4.62±0.19	135±12	1.38±0.08	98.9±1.9	4.33±0.08	1.65±0.13
	pellet	83.3±1.9	5.17±0.20	159±9	1.54±0.05	100±0	4.00±0.21	1.26±0.04
Two-way ANOVA								
	System	<i>p</i> =0.358	<i>p</i> =0.435	<i>p</i> =0.410	<i>p</i> =0.399	<i>p</i> =0.336	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> =0.080
	*FTS	77.1±4.2	4.79±0.24	141±14	1.42±0.10	98.7±1.2	3.77±0.40	1.37±0.19
	**RAS	79.4±5.5	4.89±0.35	147±16	1.46±0.11	99.5±1.4	4.16±0.23	1.45±0.23
	Feed	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> =0.721	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.05
	paste	75.4±4.4	4.65±0.23	135±13	1.37±0.09	98.9±1.3	4.20±0.25	1.59±0.10
	pellet	81.1±3.4	5.04±0.20	154±10	1.50±0.06	99.2±1.3	3.73±0.33	1.23±0.05
	Interaction	<i>p</i> =0.367	<i>p</i> =0.243	<i>p</i> =0.489	<i>p</i> =0.561	<i>p</i> =0.318	<i>p</i> =0.235	<i>p</i> =0.624

*FTS, Flow through system; **RAS, Recirculating aquaculture system

¹WGR, Weight gain rate (%) = [Final weight (g) × initial weight (g) × 100]/initial weight (g)

²SGR, Specific growth rate (%/day) = [Loge(final weight (g)) – Loge(initial weight (g))] × 100/days

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

⁴FCR, Feed coefficient ratio = Feed intake (kg)/[Final total weight (kg) – initial total weight (kg)]

Table 4. Comparison of morphological indices of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste and pellet in two different systems for 62 days of experiment

System	Feed	¹ CF	² VSI (%)	³ HSI (%)
*FTS	paste	0.13±0.01	5.41±0.23	1.67±0.07
	pellet	0.13±0.00	5.33±0.17	1.33±0.13
**RAS	paste	0.13±0.01	5.29±0.41	1.45±0.14
	pellet	0.13±0.01	5.95±0.30	1.60±0.10
Two-way ANOVA				
System		<i>p</i> =0.580	<i>p</i> =0.175	<i>p</i> =0.699
	*FTS	0.13±0.00	5.37±0.18	1.50±0.21
	**RAS	0.13±0.01	5.62±0.48	1.53±0.14
Feed		<i>p</i> =0.580	<i>p</i> =0.123	<i>p</i> =0.171
	paste	0.13±0.01	5.35±0.30	1.56±0.16
	pellet	0.13±0.00	5.64±0.40	1.46±0.18
Interaction		<i>p</i> =0.122	<i>p</i> =0.061	<i>p</i> <0.05

*FTS, Flow through system; **RAS, Recirculating aquaculture system

¹CF (Condition factor) = [wet weight (g)/(total length (mm))³] × 100

²VSI (Visceralsomatic index) (%) = [wet weight of viscera (g)/wet weight (g)] × 100

³HSI (Hepatosomatic index) (%) = (wet weight of liver (g)/wet weight (g)) × 100

3. 혈액학적 분석

뱀장어의 스트레스 분석 결과는 Table 5에 나타났다. 스트레스 분석 결과, 양식 시스템에 따라 유의적인 차이가 나타났으며($p < 0.05$), 사료 종류에 따라 유의적인 차이는 나타나지 않았다($p > 0.05$). 양식시스템과 사료 종류 간의 유의적인 상관관계는 나타나지 않았다($p > 0.05$). Cortisol과 SOD는 FTS 실험구에서 18.7 ± 9.7 ng/ml, 129 ± 45 ng/ml로 더 높은 값이 나타났으나, GPT는 RAS 실험구에서 9.37 ± 1.40 U/L로 더 높은 결과 값이 나타났다. Glucose, CAT, GOT는 양식시스템 실험구간 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$)



Table 5. Comparison of haematological indices of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste and pellet in two different systems for 62 days of experiment

System	Feed	Cortisol (ng/ml)	Glucose (mg/dL)	SOD (ng/ml)	CAT (U/ml)	GOT (U/L)	GPT (U/L)
*FTS	paste	21.1±9.8	114±19	150±51	44.6±12.0	73.6±18.2	7.73±0.80
	pellet	16.3±9.5	121±29	107±25	36.1±18.3	64.6±25.6	7.73±1.03
**RAS	paste	12.1±6.5	127±32	85.2±23.6	41.9±13.5	59.4±45.2	9.80±1.32
	pellet	7.92±5.6	130±53	82.8±29.0	49.5±13.9	54.3±30.8	8.93±1.39
Two-way ANOVA							
System		$p<0.05$	$p=0.213$	$p<0.05$	$p=0.290$	$p=0.139$	$p<0.05$
	*FTS	18.7±9.7	117±24	129±45	40.1±15.8	69.1±22.3	7.73±0.91
	**RAS	10.0±6.27	129±43	84.0±25.6	45.7±13.9	56.9±38.1	9.37±1.40
Feed		$p=0.103$	$p=0.597$	$p=0.067$	$p=0.938$	$p=0.392$	$p=0.153$
	paste	16.6±9.31	121±27	120±52	43.2±12.5	66.5±34.6	8.77±1.50
	pellet	12.1±8.71	125±42	95.8±29.1	42.8±17.2	59.5±28.3	8.33±1.35
Interaction		$p=0.914$	$p=0.839$	$p=0.099$	$p=0.116$	$p=0.810$	$p=0.153$

*FTS, Flow through system

**RAS, Recirculating aquaculture system

4. 어체 일반성분 분석

뱀장어의 일반성분 분석 결과는 다음과 같이 나왔다(Table 6). 수분함량은 양식 시스템과 사료 종류에 따라 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p=0.462$). 조단백질과 조지방 함량은 양식시스템과 사료종류에 따라 유의적인 차이가 나타났다($p<0.05$). 조단백질은 FTS와 부상 펠릿사료 실험구에서 $19.5\pm 0.78\%$, $19.9\pm 0.46\%$ 로 더 높은 값이 나타났으며, 조지방은 반대로 RAS와 반죽사료 실험구에서 $13.6\pm 0.43\%$, $13.6\pm 0.43\%$ 로 더 높은 값이 나타났다. 두 조건 간의 상관관계 분석 결과, 조단백질은 유의적인 차이가 나타나지 않았으며($p=0.863$), 조지방은 유의적인 차이가 나타났다($p<0.05$).

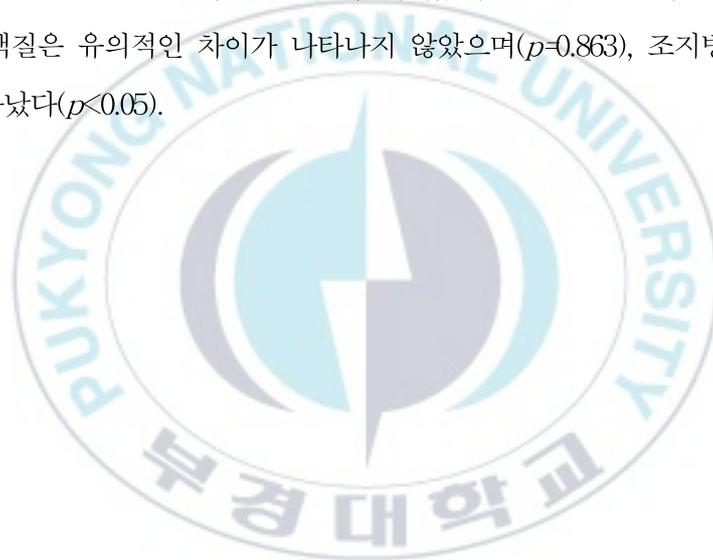


Table 6. Comparison of whole body composition of Japanese eel (*Anguilla japonica*) fed paste and pellet in different systems for 62 days of experiment

System	Feed	Moisture (%)	Crude protein (%)	Crude fat (%)	Crude ash (%)
*FTS	paste	65.1±0.2	18.8±0.1	13.2±0.3	2.50±0.09
	pellet	65.0±0.2	20.1±0.4	11.9±0.2	2.48±0.21
**RAS	paste	65.0±0.4	18.3±0.2	13.9±0.2	2.41±0.05
	pellet	64.6±0.3	19.7±0.5	13.2±0.3	2.21±0.13
Two-way ANOVA					
System		$p=0.189$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p<0.05$
	*FTS	65.1±0.2	19.5±0.8	12.6±0.8	2.49±0.14
	**RAS	64.8±0.4	19.0±0.8	13.6±0.4	2.31±0.14
Feed		$p=0.097$	$p<0.05$	$p<0.05$	$p=0.180$
	paste	65.1±0.3	18.5±0.3	13.6±0.4	2.46±0.08
	pellet	64.8±0.3	19.9±0.5	12.6±0.7	2.34±0.22
Interaction		$p=0.462$	$p=0.863$	$p<0.05$	$p=0.277$

*FTS, Flow through system;

**RAS, Recirculating aquaculture system

IV. 고 찰

이 실험에서는 최근 주목받는 친환경 양식방식인 RAS를 이용하여 뱀장어를 부상 펠릿사료로 사육 시에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여, FTS와 RAS 양식시스템에서 반죽사료와 부상 펠릿사료를 공급하였을 때 뱀장어의 수질 변화 및 성장도, 건강도 차이를 비교분석하였다.

1. 수질 환경 분석

실험기간 동안 뱀장어 사육 온도는 24℃로 적정수온 범위인 22.5℃ ~ 26.5℃ 내로 유지하였다(Sadler, 1979; Seymour, 1989). 수중 내 EC는 용해된 이온의 농도와 이온 전하에 영향을 받아 TDS의 지표로도 사용된다. EC의 증가는 낮은 환수율, 사료 유실과 어류의 배설물 분해로 인해 수조 내 영양분이 축적되면서 TDS의 증가로 이어진다(Rafiee and Saad, 2005; Velichkova and Sirakov, 2013). 무환수로 진행된 RAS 실험구에서 실험이 진행됨에 따라 먹이 공급량이 증가하면서 여과되지 않은 부유물의 증가로 인해 EC와 TDS가 지속적으로 증가하였다.

물의 교환이 거의 없는 RAS는 질산화와 고형물 제거를 위한 효율적인 수처리가 중요하다. 사육수 수질과 생산성에 영향을 미칠 수 있는 산소, 암모니아 등과 같은 매개변수의 관리를 통해 시스템 내 적절한 균형을 이룰 수 있도록 설계가 필요하다 (Timmons et al., 2002; Wik et al., 2009). 이 실험에서는 암모니아라는 매개변수에 대한 임계값을 정한 후, 질소 부하량이 생겨 실험어와 사육 수질에 영향이 미치지 않도록 mass balance 계산을 통해 실험 환경에 적합한 유량을 구하여 실험을 진행하였다.

모든 실험구에서 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소는 실험기간 동안 최 등 (2022)이 제시한 뱀장어(*A. marmorata*)의 pH 7에서의 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소의 안전농도인 2.35 mg/L와 2.96 mg/L 이하로 유지되었다. 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소는 FTS 보다 RAS에서 그리고 부상 펠렛사료 보다 반죽사료 실험구에서 높은 값이 나타났다. 사육수가 계속 유입되는 FTS와 달리 RAS는 폐쇄적인 특징과 수중 내 유실이 많은 반죽사료의 특성으로 인하여 RAS 시스템 내의 수관에 고형물이 쌓이게 되어 사육수의 순환율이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. Obirikorang et al.(2019)이 진행한 RAS에서 순환율을 달리한 실험에서 순환율이 낮을수록 수중 내 고형물이 증가하여 총 암모니아성 질소 농도가 더 높은 결과가 나타났다.

본 실험 결과, RAS 실험구에서 질산성 질소가 무환수 조건으로 인하여 실험이 진행될수록 계속 증가하는 경향이 나타났다. 질산화 과정이 일어나는 RAS의 생물학적 여과조는 질산염이 더 이상 산화되지 못한다. 사육수의 수조 내 체류시간이 길어지고 환수율이 낮으면 RAS 시스템 내 질산염의 농도가 증가하게 된다. 암모니아와 아질산에 비해 질산염은 독성 농도가 낮지만 사육수 내에 지속적으로 축적되면 사육생물의 건강과 생존율에 영향을 미치기 때문에 RAS에서는 환수나 탈질화 장치를 통해 질산염 농도를 관리해야 한다(Van Rijin and Schreier, 2006; Kuhn et al., 2010; Preena et al., 2021). 본 실험의 종료 시점의 질산염 농도는 328 mg/L로 Bhatnagar와 Devi (2013)가 제시한 질산염 적정농도 범위인 0~100mg/L 보다 높게 나타났다. 그러나, Tomasso (1994)에 따르면 담수어의 질산염 중앙치사 농도는 1,000 mg/L를 초과하기 때문에, 실험기간 동안 질산염의 축적으로 인한 영향은 크게 미치지 않은 것으로 보인다. 뱀장어의 질산염 농도에 따른 스트레스 및 성장저하 영향에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, RAS에서 뱀장어 사육 시 생존율 개선 및 사육 환경의 유지를 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2. 성장도 분석

62일 동안 뱀장어를 양식시스템과 사료 종류를 다르게 하여 사육실험한 결과, 생존율은 98% 이상으로 각 실험구에 영향을 받지 않았다. 성장도는 반죽보다 부상 펠릿사료를 공급한 실험구에서 TW, WGR, SGR이 높은 결과값이 나타났다. 반죽 사료를 공급한 실험구에서 먹이 섭취량이 더 많았지만 부상 펠릿사료보다 낮은 성장률과 높은 사료계수가 나타났다. 이는 반죽사료의 특성상 수중 내 유실이 많기 때문으로 사료된다(Robb and Clampton, 2013). 뱀장어(*A. japonica*)를 대상으로 한 선행연구(Kim et al., 2008)에서 부상 펠릿사료를 공급했을 때 반죽사료보다 개선된 성장을 보였으며, Höner et al.,(1989)의 Thinlip mullet (*Liza ramada*)으로 유수식과 RAS에서 사료종류를 다르게 하여 공급한 실험에서 RAS는 부상 펠릿사료 공급 시 성장도가 높은 것으로 나타나 본 연구와 동일한 경향이 나타났다.

VSI와 HSI는 어류의 소화와 흡수, 소화 효소의 합성과 분비 그리고 탄수화물 대사와 관련된 어류의 대사활동 분석에 중요역할을 한다(Ighwela et al., 2014). 내장과 간은 에너지 저장의 역할을 하기 때문에, 먹이 공급량이 많아짐에 따라 CF, VSI, HSI 값이 증가하게 되는데(Kim et al., 2021a; Kim et al., 2021b; Du et al., 2006), 이 실험에서 반죽사료 실험구가 부상 펠릿사료 실험구보다 먹이 섭취량이 많았지만, CF, VSI, HSI 값에 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 이는 반죽사료의 높은 유실률로 공급량보다 실제 섭취량이 적었기 때문으로 판단된다.

3. 혈액학적 분석

혈액학적 성상은 영양과 환경조건을 반영하여 어류의 생리적 상태, 스트레스, 면역반응, 질병 저항성을 평가하는 중요한 지표이다(Fazio, 2019; Yu et al., 2023).

어류는 스트레스가 많은 환경에서 1차 반응으로 cortisol이 분비되고, 2차 반응으로 glucose가 생성되어 어류가 스트레스에 대처하기 위해 대사활동을 증가시킬 때 에너지원으로 사용하게 된다(Amano et al., 2021; Yu et al., 2023). 스트레스 요인의 작용이 지속되면 glucose 농도는 기존농도로 감소하게 되기 때문에, 혈장 내 glucose는 초기 스트레스에 의한 급성반응의 지표로 사용될 수 있다(Makaras et al., 2020; Tan et al., 2018). Amano et al.(2021)의 연구에서 비슷한 밀도로 사육실험 한 결과 cortisol의 결과 범위는 5-20 ng/ml로 본 실험과 유사한 결과가 나타났다. Cortisol은 RAS 실험구보다 FTS 실험구에서 유의적으로 더 높은 농도가 나타났으며, glucose는 유의적인 차이는 나타나지 않았지만 FTS 실험구에서 더 낮은 농도가 나타났다. 본 실험은 겨울철에 진행되어 FTS 실험구의 경우 사육수온은 평균 24℃로 유지하였지만 수온이 16℃ 이하의 지하수가 계속 주입되었다. 유입수와 사육수의 높은 수온 차이와 수주(water column)에 따른 수온변화로 인해 폐쇄적인 RAS 실험구에 비해 뱀장어에 스트레스가 지속적으로 작용된 것으로 추정된다(Summerfelt, 2000).

환경 스트레스는 어류 체내에 활성산소종의 주 생성 원인 중 하나이며 SOD, CAT와 같은 항산화 효소가 작용하게 되면 활성산소종은 제거가 되어 어류는 산화 스트레스로부터 보호가 된다(Kim et al., 2020). 활성산소종이 과하게 축적되면 어류의 세포와 조직에 부정적인 영향을 미치게 된다. 또한, 활성산소종의 생성이 제거 속도보다 빠르면 산화 스트레스를 유발하기 때문에 항산화 효소의 활성도는 환경 스트레스에 대한 생체지표로 사용될 수 있다(Martínez-Álvarez et al., 2005; Yu et al., 2023). 실험 결과, SOD는 RAS보다 FTS에서 유의적으로 더 높은 농도가 나타났으며, 낮은 온도의 지하수의 유입으로 FTS 실험구에서 환경 스트레스 작용이 더

높은 것으로 판단된다.

GOT, GPT는 간 기능의 지표로 사용된다. 간 손상이나 환경스트레스에 의한 영향을 안 받을 때는 효소의 활성도가 낮지만, 영향을 받으면 활성도가 증가해 어류의 건강상태 및 간 손상을 평가하는데 사용된다(Tan et al., 2018; Kim et al., 2020). 실험 결과, GPT가 양식시스템에 따라 유의적인 차이가 나타나 FTS보다 RAS에서 높은 값이 나타났으며, 유럽 농어(*Dicentrarchus labrax*)를 이용한 Zhang et al. (2021)의 연구에서도 비슷한 결과가 나타났다.

4. 어체 일반성분 분석

어류의 체성분은 사료의 단백질 및 지질 함량 그리고 사육환경에 따라 영향을 받는다(Okorie et al., 2007; Seo et al., 2013). 사료 내 단백질은 주로 에너지 대사 이외의 조직 단백질의 유지 및 합성에 사용된다. 적정 섭취량보다 사료를 많이 공급하게 되면 단백질이 에너지 대사에 관여해 지방으로 전환되기 때문에 체내에 저장되면서 단백질 함량은 감소하게 되고 지방 함량은 증가하게 되는 연구결과가 보고되었다(Heinsbroek et al., 2007; Xu et al., 2017; Kim et al., 2021b; Ezhilmathi et al., 2022). 본 실험에서 FTS보다 RAS 실험구에서 그리고 부상 펠릿사료 보다 반죽사료 실험구에서 사료 섭취량이 더 많은 결과가 나타났다. 뱀장어의 조지방 함량은 RAS 실험구와 반죽사료 실험구에서 유의적으로 높게 나타나($p < 0.05$), 실험구 별 사료 섭취량의 결과와 비슷한 경향이 나타났다. 조단백질의 경우 조지방의 결과와 반대로 나타났다. 사료 내 지방 함량에 따라 체내 지방함량도 달라진다는 연구결과가 있다(Xu et al., 2017; Chen et al., 2020). 본 실험에서는 부상 펠릿 사료의 조지방 함량이 반죽사료에 비해 높은 함량을 가지고 있음에도 불구하고 반죽사료를 공급한 실험구에서 조지방 함량이 유의적으로 높게 나타나 공급 사료의

지방함량에 따라 어체성분에 영향을 주지 않은 것으로 나타났다.

5. 종합 결론

본 연구를 통해 두 가지 양식시스템인 FTS와 RAS에서 각각 반죽사료와 부상 펠릿사료를 공급하였을 때 수질 환경, 성장도 그리고 혈액분석을 통한 스트레스를 분석하였다. 반죽사료 보다 부상 펠릿사료 공급 시 수질 환경이 안정적으로 유지되어 시스템 관리 측면에서 부상 펠릿사료가 유리하다는 결과가 나타났다. 성장률은 RAS와 부상 펠릿사료 실험구에서 전체적으로 높은 결과 값이 나타났으며, 사육시스템에서 FTS보다 RAS에서 사육했을 때 더 낮은 스트레스를 보였다. 따라서, RAS에서 뱀장어 사육할 때 부상 펠릿사료의 공급은 수질과 시스템 관리에 유리해지며, 스트레스에 영향을 주지 않으며 높은 성장률을 볼 수 있다는 결과가 나타나 반죽사료에서 부상 펠릿사료로의 대체 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 반죽사료와 성분함량이 비슷한 상업용 부상 펠릿사료를 실험에 사용했지만, 동일한 성분의 반죽사료와 부상 펠릿사료를 공급했을 때 수질과 성장실험에 대한 추가적인 실험도 필요하다고 생각된다. 특히, 일반 뱀장어 양식장의 사육 환경을 반영한 수준의 고밀도(약 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 이상)와 고수온($28\sim 30^\circ\text{C}$)인 환경에서 반죽과 부상 펠릿사료 공급했을 때의 연구결과가 뒷받침되어야 양식현장에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 사료종류와 양식시스템에 따른 경제성분석을 통해 RAS 시스템 적용을 통한 친환경적인 양식으로의 산업적인 발전을 기대할 수 있을 것이다.

요 약

본 연구는 유수식(Flow through system, FTS)과 순환여과양식시스템(Recirculating aquaculture system, RAS)에서 뱀장어(*Anguilla japonica*)를 사육하며 반죽사료와 부상 펠릿사료를 공급하였을 때 수질과 성장도를 비교분석하여 RAS에서 부상 펠릿사료 적용 가능성을 보기 위해 진행하였다.

평균 무게 32.1 ± 0.4 g의 뱀장어를 0.4 ton의 원형수조에 수용 후, 1일 2회 반복으로 먹이를 공급하였다. 두 시스템 모두 1.7 L/min으로 유량을 설정하였으며, 광주기는 0L:24D로 3 반복으로 진행하였다. 실험기간 동안 사육수의 총 암모니아성 질소와 아질산성 질소는 RAS와 반죽사료 실험구에서 유의적으로 높게 나왔다. 실험 종료 후, 증체율과 일일성장율은 반죽사료보다 부상 펠릿사료 실험구에서 유의적으로 높게 나타났으나($p < 0.05$), 양식시스템 간에 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$). 비만도와 중량지수는 실험구간에 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 혈액 분석 결과, cortisol과 SOD는 사료종류 간에 유의적인 차이는 나타나지 않았으나($p > 0.05$), 양식시스템 간에서는 FTS 실험구에서 높은 농도가 나타났으며, GPT는 RAS 실험구가 FTS 실험구보다 높은 농도가 나타났다. 뱀장어의 일반성분 분석 결과, 사료 섭취량에 영향을 받았으며, 조단백질과 조지방 함량은 실험구 간에서 유의적인 차이가 나타났다($p < 0.05$).

이 실험을 통해, 반죽사료보다 부상 펠릿사료 공급 시 수질관리에 더 유리하였으며, RAS에서 부상 펠릿사료 공급 시 가장 개선된 성장도가 나타났다. 또한, 환경에 대한 스트레스가 낮은 것으로 보아 뱀장어 양성 시 반죽사료 대신 부상 펠릿사료 공급 시 개선된 효과를 볼 수 있음을 제시하였다.

참 고 문 헌

- Ahmed, N., & Turchini, G. M. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner production*, 297, 126604.
- Aich, N., Nama, S., Biswal, A., & Paul, T. (2020). A review on recirculating aquaculture systems: Challenges and opportunities for sustainable aquaculture. *Innovative Farming*, 5(1), 017-024.
- Amano, M., Amiya, N., Mizusawa, K., & Chiba, H. (2021). Effects of background color and rearing density on stress-related hormones in the juvenile Japanese eel *Anguilla japonica*. *Fisheries Science*, 87(4), 521-528.
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35.
- Bhatnagar, A., & Devi, P. (2013). Water quality guidelines for the management of pond fish culture. *International journal of environmental sciences*, 3(6), 1980-2009.
- Chen, S., Timmons, M. B., Aneshansley, D. J., & Bisogni Jr, J. J. (1993). Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. *Aquaculture*, 112(2-3), 143-155.
- Chen, S. J., Liu, P., Jia, Y. M., Liao, H. P., Zhu, S. X., Zhou, L. L., ... & Gan, L. (2020). Dietary lipid concentrations influence growth, body composition,

- morphology of the liver and mid-intestine, and antioxidant status of marbled eel (*Anguilla marmorata*). *Aquaculture International*, 28, 2287-2302.
- Cho, H. S., Choi, J. H., Ko, H. B., Seo, J. S., & Ahn, J. C. (2011). Evaluation of major nutrients of domestic farmed eels *Anguilla japonica*. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(3), 237-242.
- Choi, T., Kim, P. K., & Park, J. (2019). Impacts of the Hydraulic Loading Rate and C/N Ratio on Nitrification in a Trickling Filter with Styrofoam Bead Media in Seawater. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52(3), 256-267.
- Diamahesa, W. A., Fukada, H., & Masumoto, T. (2021). Effect of dietary moisture content on growth and feed intake in conger eel *Conger myriaster*. *Aquaculture Science*, 69(1), 71-77.
- Du, Z. Y., Liu, Y. J., Tian, L. X., He, J. G., Cao, J. M., & Liang, G. Y. (2006). The influence of feeding rate on growth, feed efficiency and body composition of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Aquaculture International*, 14, 247-257.
- Ezhilmathi, S., Ahilan, B., Uma, A., Felix, N., Cheryl, A., & Somu Sunder Lingam, R. (2022). Effect of stocking density on growth performance, digestive enzyme activity, body composition and gene expression of Asian seabass reared in recirculating aquaculture system. *Aquaculture Research*, 53(5), 1963-1972.
- Fazio, F. (2019). Fish hematology analysis as an important tool of aquaculture: a review. *Aquaculture*, 500, 237-242.
- Greiner, A. D., & Timmons, M. B. (1998). Evaluation of the nitrification rates of

- microbead and trickling filters in an intensive recirculating tilapia production facility. *Aquacultural Engineering*, 18(3), 189–200.
- Hamidoghli, A., Bae, J., Won, S., Lee, S., Kim, D. J., & Bai, S. C. (2019). A review on Japanese eel (*Anguilla japonica*) aquaculture, with special emphasis on nutrition. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 27(2), 226–241.
- Heinsbroek, L. T., Van Hooff, P. L., Swinkels, W., Tanck, M. W., Schrama, J. W., & Verreth, J. A. (2007). Effects of feed composition on life history developments in feed intake, metabolism, growth and body composition of European eel, *Anguilla anguilla*. *Aquaculture*, 267(1–4), 175–187.
- Höner, G., Hillers, A., Konjevic, D., & Milojevic, S. (1989). Growth of mullet (*Liza ramada*) fed three commercial trout and eel feeds in open and closed aquaculture systems. *Journal of applied ichthyology*, 5(4), 157–164.
- Hutchinson, W., Jeffrey, M., O'Sullivan, D. D., Casement, D., & Clarke, S. (2004). *Recirculating aquaculture systems minimum standards for design, construction and management*. Kent Town: Inland Aquaculture Association of South Australia Inc.
- Ighwela, K. A., Ahmad, A. B., & Abol-Munafi, A. B. (2014). The selection of viscerosomatic and hepatosomatic indices for the measurement and analysis of *Oreochromis niloticus* condition fed with varying dietary maltose levels. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 1(3), 18–20.
- Jauncey, K. (1982). The effects of varying dietary protein level on the growth, food conversion, protein utilization and body composition of juvenile tilapias (*Sarotherodon mossambicus*). *Aquaculture*, 27(1), 43–54.

- Kim, S. W., Rim, S. K., Sohn, S. G., & Lee, J. (2008). Comparison of growth and water quality in juvenile Japanese eel, *Anguilla japonica* fed commercial extruded pellet and paste type diets. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 20(1), 90–94.
- Kim, J. H., Cho, J. H., Kim, S. R., & Hur, Y. B. (2020). Toxic effects of waterborne ammonia exposure on hematological parameters, oxidative stress and stress indicators of juvenile hybrid grouper, *Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 80, 103453.
- Kim, Y. O., Oh, S. Y., & Lee, W. S. (2021a). Feeding ratio affects growth, body composition, and blood chemistry of mandarin fish (*Siniperca scherzeri*) in recirculating aquaculture system. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 24(6), 219–227.
- Kim, Y. O., Oh, S. Y., & Kim, T. (2021b). Effects of the Feeding Rate on Growth Performance, Body Composition, and Hematological Properties of Juvenile Mandarin Fish *Siniperca scherzeri* in a Recirculating Aquaculture System. *Sustainability*, 13(15), 8257.
- KOSTAT (Statistics Korea). 2023. 2022 Fishery Production Trend Survey Result (Provisional). Retrieved from https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301080400&bid=225&act=view&list_no=4239136 on May 3, 2023.
- Kucuk, H., Midilli, A., Özdemir, A., Çakmak, E., & Dincer, I. (2010). Exergetic performance analysis of a recirculating aquaculture system. *Energy conversion and management*, 51(5), 1033–1043.

- Kuhn, D. D., Drahos, D. D., Marsh, L., & Flick Jr, G. J. (2010). Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 43(2), 78–82.
- Lee, J. S., & Kim, D. Y. (2006). The current status and future directions of Korean inland freshwater aquaculture. *The Journal of Fisheries Business Administration*, 37(3), 1-24.
- Makaras, T., Razumienė, J., Gurevičienė, V., Šakinytė, I., Stankevičiūtė, M., & Kazlauskienė, N. (2020). A new approach of stress evaluation in fish using β -d-Glucose measurement in fish holding-water. *Ecological Indicators*, 109, 105829.
- Martínez-Álvarez, R. M., Morales, A. E., & Sanz, A. (2005). Antioxidant defenses in fish: biotic and abiotic factors. *Reviews in Fish Biology and fisheries*, 15, 75–88.
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C., Heinsbroek, L. T., Schneider, O., Blancheton, J. P., ... & Verreth, J. A. J. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural engineering*, 43(3), 83–93.
- Obirikorang, K. A., Agbo, N. W., Obirikorang, C., Adjei-Boateng, D., Ahiave, S. E., & Skov, P. V. (2019). Effects of water flow rates on growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture International*, 27, 449–462.
- Okorie, O. E., Kim, Y. C., Lee, S., Bae, J. Y., Yoo, J. H., Han, K., ... & Choi, S. M. (2007). Reevaluation of the dietary protein requirements and optimum dietary protein to energy ratios in Japanese eel, *Anguilla japonica*. *Journal*

- of the World Aquaculture Society, 38(3), 418-426.
- Preena, P. G., Rejish Kumar, V. J., & Singh, I. S. B. (2021). Nitrification and denitrification in recirculating aquaculture systems: the processes and players. *Reviews in Aquaculture*, 13(4), 2053-2075.
- Rafiee, G., & Saad, C. R. (2005). Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis sp.*) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 244(1-4), 109-118.
- Robb, D. H., Crampton, V. O. (2013). On-farm feeding and feed management: perspectives from the fish feed industry. *On-farm feeding and feed management in aquaculture*, 489, 518.
- Sadler, K. (1979). Effects of temperature on the growth and survival of the European eel, *Anguilla anguilla* L. *Journal of fish biology*, 15(4), 499-507.
- Seo, J. S., Choi, J. H., Seo, J. H., Ahn, T. H., Chong, W. S., Kim, S. H., ... & Ahn, J. C. (2013). Comparison of major nutrients in eels *Anguilla japonica* cultured with different formula feeds or at different farms. *Fisheries and aquatic sciences*, 16(2), 85-92.
- Seymour, E. A. (1989). Devising optimum feeding regimes and temperatures for the warmwater culture of eel, *Anguilla anguilla* L. *Aquaculture Research*, 20(3), 311-324.
- Summerfelt, R. C. (2000). Water quality considerations for aquaculture. *Department of animal ecology*, 2-7.
- Summerfelt, R. C., & Penne, C. R. (2005). Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen

- filter. *Aquacultural Engineering*, 33(3), 214-224.
- Summerfelt, S. T., & Vinci, B. J. (2008). Better management practices for recirculating aquaculture systems. *Environ. Best Manage. Pract. Aquacult*, 389-426.
- Tan, C., Sun, D., Tan, H., Liu, W., Luo, G., & Wei, X. (2018). Effects of stocking density on growth, body composition, digestive enzyme levels and blood biochemical parameters of *Anguilla marmorata* in a recirculating aquaculture system. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(1), 9-16.
- Timmons, M. B., Ebeling, J., Wheaton, F., Summerfelt, S., & Vinci, B. (2002). Mass balances, loading rates, and fish growth. *Recirculating Aquaculture Systems*, 2nd ed. Cayuga Aqua Ventures, New York, USA, 89-116.
- Tomasso, J. R. (1994). Toxicity of nitrogenous wastes to aquaculture animals. *Reviews in Fisheries Science*, 2(4), 291-314.
- Van Rijn, J., Tal, Y., & Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating systems: theory and applications. *Aquacultural engineering*, 34(3), 364-376.
- Velichkova, K. N., & Sirakov, I. N. (2013). The usage of aquatic floating macrophytes (*Lemna* and *Wolffia*) as biofilter in recirculation aquaculture system (RAS). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 13(1).
- Wik, T. E., Lindén, B. T., & Wramner, P. I. (2009). Integrated dynamic aquaculture and wastewater treatment modelling for recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 287(3-4), 361-370.
- Xiao, R., Wei, Y., An, D., Li, D., Ta, X., Wu, Y., & Ren, Q. (2019). A review

- on the research status and development trend of equipment in water treatment processes of recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 863-895.
- Xu, H., Li, X., Sun, W., Chen, J., Gao, Q., Shuai, K., & Leng, X. (2017). Effects of different feeding rates of extruded and pelleted feeds on growth and nutrient retention in channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture international*, 25, 1361-1372.
- Yaqoob, M., Ali, M. R., & Mehmood, S. (2010). Comparison of growth performance of major and Chinese carps fed on floating and sinking pelleted supplementary feeds in ponds. *Pak. J. Zool*, 42(6), 765-769.
- Yu, Y. B., Choi, J. H., Lee, J. H., Jo, A. H., Lee, K. M., & Kim, J. H. (2023). Biofloc Technology in Fish Aquaculture: A Review. *Antioxidants*, 12(2), 398.
- Zhang, S. Y., Li, G., Wu, H. B., Liu, X. G., Yao, Y. H., Tao, L., & Liu, H. (2011). An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquacultural Engineering*, 45(3), 93-102.
- Zhang, Q., Zhang, Y., Zhang, X., Rabbi, M. H., Guo, R., Shi, S., ... & Liu, Y. (2021). Effects of dietary florfenicol contained feeds on growth and immunity of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) in flow-through and recirculating aquaculture system. *Aquaculture Reports*, 19, 100602.
- 최종렬, 박준성, 황주애, 이동길, & 김형수. (2022). 암모니아 및 아질산 급성독성에 따른 무태장어 (*Anguilla marmorata*) 치어의 영향. *한국수산과학회지*, 55(5), 697-704.
- 국립수산과학원. 2009. 뱀장어 양식 표준 지침서. 국립수산과학원, 1-246pp.

감사의 글

이 논문이 완성되기까지 2년의 석사과정 동안 많은 분의 도움과 조언을 받았습니다. 짧게라도 이 글을 통해 감사함을 전하고자 합니다.

우선 바쁘신 와중에도 아낌없이 지도해 주신 박정환 교수님께 감사드립니다. 대학생일 때 그리고 대학원을 진학 후에도 찾아뵈는 때마다 항상 반겨주시며 학위 논문의 주제가 된 실험에 관한 얘기를 나눌 때 해주신 조언과 가르침 덕분에 앞으로 수산생물학을 계속 전공하는데 있어 필요한 시야를 넓힐 수 있었으며 많은 깨달음을 얻을 수 있었습니다. 또한, 부족함이 많은 제 학위논문을 교정해 주시면서 연구자로서 가져야 할 마음가짐을 알려주시고 따뜻한 말씀을 많이 해주신 김찬희 교수님과 김형수 박사님께도 진심 어린 존경과 감사의 말씀을 드리며, 대학교와 대학원 과정 동안 많은 가르침을 주신 공승표, 김동수, 김종명, 김창훈, 남윤권, 배승철, 최윤희 교수님께도 감사드립니다.

2020년에 입사 후 대학원에 진학한다고 했을 때 응원을 아끼지 않으셨던 첨단양식실증센터(구 내수면양식연구센터) 식구들에게 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 같은 파트타임 대학원생으로 동고동락하고 짓궂은 동생의 장난을 넓은 마음으로 받아준 박준성 박사님과 최종렬 오빠 그리고 새벽에 불안해할 때마다 했던 걱정이 무색해질 정도로 힘을 준 소중한 친구들 김민희, 김한솔, 조은아, 한단희, 허승주에게도 감사의 말을 전합니다.

무엇보다 항상 뭐든 잘할 것이라는 믿음을 주시고 저를 아낌없이 지원해 주시고 사랑해 주시는 부모님과 오빠 그리고 친척들에 무한한 감사를 드립니다.

모두의 관심과 응원 덕분에 무사히 석사과정을 마칠 수 있었습니다. 짧고도 길었던 2년의 시간 동안 배우고 느꼈던 점들을 토대로 부족한 부분들을 채우며 앞으로 더욱더 발전하는 연구자가 되겠습니다. 감사합니다.