



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

수온과 사료공급횟수에 따른
넙치(*Paralichthys olivaceus*)의
암모니아 물질 수지 모델 평가



2023년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수 산 생 물 학 과

이 재 만

수 산 학 석 사 학 위 논 문

수온과 사료공급횟수에 따른
넙치(*Paralichthys olivaceus*)의
암모니아 물질 수지 모델 평가

지도교수 박 정 환

이 논문을 수산학 석사 학위 논문으로 제출함.

2023년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수 산 생 물 학 과

이 재 만

이재만의 수산학석사 학위논문을
인준함.

2023년 02월 17일



위 원 장 공학박사 김 찬 희 

위 원 공학박사 권 기 원 

위 원 수산학박사 박 정 환 

목 차

I. 서론	1
II. 재료 및 방법	4
1. 사육 시스템	4
1) 해수 유수식 시스템	4
2) 해수 순환여과 시스템	4
2. 생물 사육	9
3. 넙치의 TAN 물질 수지 모델	11
4. 통계 분석	13
III. 결과	14
1. TAN 농도변화	14
2. TAN 배설량	18
3. TAN 물질 수지 모델	26
IV. 고찰	29
1. TAN 배설	29
2. TAN 물질 수지 모델	31
요약	35
감사의 글	36
참고문헌	38

Evaluation of mass balance model for olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) at
different water temperatures and feeding frequency

JAEMAN LEE

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

Abstract

Olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) is one of the most important aquaculture fish species in Korea and has the advantage of being fast growing and farmed at high density. It accounts for about 56% of domestic farmed fish production, which is of great importance to the domestic aquaculture industry. However, due to persistent pollution in coastal areas, the mortality rate in flow-through fish farms, which produce aquaculture organisms by taking a large amount of natural seawater, is increasing sharply. Similar problems are occurring all over the world, and to solve them, research is being conducted on a recirculating aquaculture system (RAS) that is not affected by the environment like existing marine cages or flow-through water methods.

In designing a RAS, the water flow rate of the system is determined by calculating the mass balance based on the biological load for various water quality factors. One important factor affecting water quality and fish productivity is total ammonia

nitrogen (TAN). Accordingly, an experiment was conducted in this study to derive a TAN mass balance model for olive flounder as a function of water temperature (20, 23, 26 °C) and feeding frequency (1, 2, 3, 4 times/day).

As a result, the higher the water temperature and the lower the feeding frequency, the higher the TAN excretion of flounder. In this way, a specific TAN mass balance model for olive flounder was developed as a function of water temperature and feeding frequency. The weight-specific TAN excretion model formula for olive flounder was $Z=348.82+(-6.8538214e+10)e^{-X}-0.57Y^3$. The model formula for specific excretion of ingested nitrogen TAN was $Z=63.06-18320.04/X^2-0.0412Y^3$. In both models, the X value is water temperature and the Y value is feeding frequency. A model predicting the ratio of excreted nitrogen to ingested nitrogen and a TAN mass balance model were used to establish a design criterion for predicting the water flow rate to maintain the appropriate TAN concentration required in the aquaculture system.

List of Figures

Figure 1. The schematic drawing of the experimental flow-through water aquaculture system	6
Figure 2. The schematic drawing of the experimental recirculating aquaculture system	7
Figure 3. TAN concentration changes at 20°C with four different feeding frequencies	15
Figure 4. TAN concentration changes at 23°C with four different feeding frequencies	16
Figure 5. TAN concentration changes at 26°C with four different feeding frequencies	17
Figure 6. TAN excretion rates(mg TAN·kg flatfish ⁻¹ ·hr ⁻¹) at 20°C with four different feeding frequencies	19
Figure 7. TAN excretion rates(mg TAN·kg flatfish ⁻¹ ·hr ⁻¹) at 23°C with four different feeding frequencies	20
Figure 8. TAN excretion rates(mg TAN·kg flatfish ⁻¹ ·hr ⁻¹) at 26°C with four different feeding frequencies	21
Figure 9. TAN excretion rates(mg TAN·kg feed ⁻¹ ·hr ⁻¹) at 20°C with four different feeding frequencies	23
Figure 10. TAN excretion rates(mg TAN·kg feed ⁻¹ ·hr ⁻¹) at 23°C with four different feeding frequencies	24
Figure 11. TAN excretion rates(mg TAN·kg feed ⁻¹ ·hr ⁻¹) at 26°C with four different feeding frequencies	25
Figure 12. Prediction model for the TAN excretion based on	

temperature and feeding frequency	27
Figure 13. Prediction model for the excreted nitrogen to ingested nitrogen based on temperature and feeding frequency	28



List of Tables

Table 1. Characteristics of bio-media	8
Table 2. Ingredient of commercial feed	10
Table 3. The results of two-way ANOVA on the effect temperature (T), and feeding frequency (F) for TAN excretion rate (mg TAN·kg flatfish ⁻¹ ·day ⁻¹) of Olive flounder (<i>Paralichthys olivaceus</i>)	22
Table 4. Simulation conditions for calculating flow rate	33
Table 5. Simulation value of flow rate(LPM) using model equation by the TAN concentration difference	34

I. 서 론

국내 주요 양식어종인 넙치(*Paralichthys olivaceus*)는 성장이 빠르고 고밀도 사육이 가능하다는 장점이 있어(Hur *et al.*, 2007), 양식 산업 중요성이 매우 높다(Oak, 2007). 2010년대에 이르러 국내 양식어류 생산량의 약 56%를 차지하고 있지만(Shim *et al.*, 2019), 과밀한 시설 및 부적절한 사육환경으로 인해 연안환경오염이 발생하였고, 이는 수질악화, 질병 발생 빈도의 증가로 이어져 폐사율이 증가하는 문제가 심화되고 있다. 또한, 높은 환수율(15~42.6회전/일) 및 과도한 약품 사용으로 경제성과 산업의 경쟁력이 약화 되고 있다(National Institute of Fisheries Science, 2018).

세계적으로도 양식 산업은 지난 50년 동안 급격하게 발전했지만, 양식장 배출수로 인한 여러 환경적인 문제가 지속적으로 나타나고 있다. 이를 해결하기 위해 기존의 해상가두리, 육상양식장에서의 유수식 방법이 아닌 생태학적 영향을 최소화할 수 있는 순환여과 양식시스템(Recirculating aquaculture system, RAS)에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Martins *et al.*, 2010; Rurangwa and Verdegem, 2015).

순환여과 양식시스템은 자연환경으로부터 독립되고 통제된 폐쇄적인 환경에서 생물을 고밀도로 생산하는 시스템이다. 순환여과 양식시스템은 다른 양식시스템보다 상대적으로 적은 물의 사용하여, 배출수를 최소화할 수 있고 통제된 환경으로 인해 질병 발생 감소, 양식 생물의 생산 주기 단축 등의 많은 이점들이 존재한다(Balami, 2021). 하지만, 지속적으로 물을 재사용하고 높은 사육밀도로 사육하기 때문에 사육관리가 어려우며, 높은 시설 비용과, 질병원이 유입될 경우 더 높은 위험성으로 인한 대량 폐사의 위험의 단점도 존재한다(Khun *et al.*, 2010; Good *et al.*, 2009).

따라서 순환여과 양식시스템의 설계는 여러 가지 요소들을 고려하여 진행되어야 한다. 양식시스템의 설계는 양식 대상 어종 선택, 선택한 어종에 대한 생물학적 부하량 계산, 시스템 구성장치 크기 및 구조 결정의 순서로 진행된다. 생물학적 부하량 계산은 물질 수지(Mass balance) 계산법을 이용하여 계산이 이루어진다. 물질 수지를 이용한 분석법은 질량 불변의 법칙을 이용한 공학적인 분석 방법이다. 일반적으로 공학적인 문제점을 해결하는 데 쓰이는 방법으로 질량의 상은 변해도 다시 만들어지거나 없어지지 않는다고 하는 개념에 근거를 두고 있다(Tchobanoglous and Schroeder, 1985). 이러한 공학적인 물질 수지 분석 방법은 양식시스템 내에서 수질의 변화를 예측하는 단순 또는 복잡한 수학적 모델을 만드는 기초가 된다. 양식시스템의 설계 시 수질과 어류 생산성에 영향을 미치는 중요한 매개변수(용존산소, 총 암모니아성 질소(Total ammonia nitrogen, TAN), 이산화탄소(Carbon Dioxide, CO₂) 등)들에 대해 물질 수지 계산을 통해 각각의 값에 대한 임계값을 결정한 후, 각 구성장치에 적용될 최소의 유수량을 결정하게 된다(Park, 2018).

물질 수지 계산에 필요한 수질 요인 중 하나인 TAN은 어류의 성장, 생존 및 아가미 구조에 좋지 않은 영향을 미치며(Kim *et al.*, 1997), 높은 수준의 TAN에 노출될 경우 어류의 배설 장애, 대사 상태의 변화 및 삼투조절에도 좋지 않은 영향을 미친다는 연구결과도 존재한다(Kim *et al.*, 2019). 특히 고밀도로 사육하는 순환여과 양식시스템에서 TAN은 더 높은 위험성을 가져 생물량과 사육밀도를 제한하는 주요 요인이다(Lee, 2015).

따라서 순환여과 시스템을 설계할 시 TAN의 처리는 매우 중요하다. TAN 물질 수지 계산법으로 시스템 내의 유수량을 계산하기 위해서는 넵치의 순 단백질 이용률(Net protein utilization, NPU)이 필요하다. NPU 값은 수온, 생물의 종류, 생물의 크기마다 달라 다양한 연구결과들이 필요

하다. 넙치의 TAN 배설 연구는 어체중(Kikuchi *et al.*, 1992), 수온 및 사료형태(Lee, 2015), 수온, 어체중 및 사육밀도(Kadowaki, 2018)의 조건에서 연구된 바 있다. 하지만 이러한 연구결과들은 실험실 규모 사육시설에서 얻어진 결과이기 때문에 현장에서의 상업적인 이용은 어려운 실정이다.

본 연구에서는 pilot 규모에서 수온 및 사료공급횟수에 따른 넙치의 TAN 배설량을 측정하고 물질 수지 모델을 개발한 후 평가를 진행하여 상업적인 규모의 순환여과 양식시스템을 설계하기 위한 기초자료로 제공하고자 한다.



II. 재료 및 방법

1. 사육 시스템

1) 해수 유수식 시스템

해수 유수식 양식시스템은 원형 PP 수조(D 4.0 m×H 1.0 m) 2개, 모래여과기(MFS35, Emaux, Kwai Cung, Hong Kong) 1개, UV 살균기(375 W, Samjeetech, Anyang, Korea) 1개, 순수산소발생기(0.48 Kw, O2MOS-7LC, Goyang, Korea) 2개, 수조 내 순환펌프(160 LPM, UP 200 W, Hyubshin, Seoul, Korea) 2개로 구성하였다(Figure 1).

사육 수조로 유입되는 사육수는 모래여과기와 UV 살균기를 통과한 후 유입되었으며, 각 수조의 유입수 배관에 직접 순수산소발생기 라인을 연결하여 산소를 공급하였다. 수조 내 회전율은 일간 20회전으로 설정하였으며, 수표면의 유막을 제거하기 위하여 수조 중심부에서 가장자리로 수표면을 따라 PVC배관을 설치하였다. 또한 수조 바닥면에 침강되는 고형물을 신속하게 제거할 수 있도록 수조 내 별도의 순환펌프를 설치하여 수조 내 수류를 개선하였으며, standing wall을 활용하여 수위를 0.6 m로 설정하였다.

2) 해수 순환여과 시스템

해수 순환여과 양식시스템은 원형 PP 수조(D 4.0 m×H 1.0 m) 2개, 생물학적 여과조(D 1.8 m×H 1.8 m) 1개, 저수조(2.0×1.0×0.55 m) 1개, 드럼필터(SD-812, Seodong Tech, Iksan, Korea), 모래여과기(MFS35, Emaux, Kwai Cung, Hong Kong) 1개, UV 살균기(375 W, Samjeetech, Anyang, Korea) 2개, 히트펌프(3 HP, DSV-8(F)A, Daesunheatenersys,

Eumseong, Korea), 순수산소발생기(0.48 Kw, O2MOS-7LC, Goyang, Korea) 1개, 산소용해기, 순환펌프(2 HP, PASS-1688SS-T, Hanil, Bucheon, Korea) 2개, 수조 내 순환펌프(160 LPM, UP 200 W, Hyubshin, Seoul, Korea) 2개로 구성하였다(Figure 2).

드럼필터 역세수 및 보충수는 모래여과기와 UV 살균기를 통과한 해수를 사용하였다. 유수식 시스템과 마찬가지로 수표면의 유막을 제거하기 위하여 수조 중심부에서 가장자리로 수표면을 따라 PVC배관을 설치하였다. 또한 수조 바닥면에 침강되는 고형물을 신속하게 제거할 수 있도록 수조 내 별도의 순환펌프를 설치하여 수조 내 수류를 개선하였으며, 고형물을 제거하기 위한 드럼필터 내의 망은 60 μ m 스테인리스 망을 이용하였다. 전체 시스템의 수량은 약 25 톤으로, 시스템의 회전율은 디지털 유량계(RT200MI, Blue-White, California, USA)를 이용해 일간 24회전으로 설정하였고, standing wall을 활용하여 수위를 0.6 m로 설정하였다. 별도로 환수는 해주지 않았으며, 저수조의 볼밸브를 조절하여 증발량만큼 신규용수를 공급하였다. 생물학적 여과조 내의 여과재(Kaldnes K1 media, Table. 1)는 충분히 숙성시킨 후 사용하였으며, 충전율은 60% 이었다.

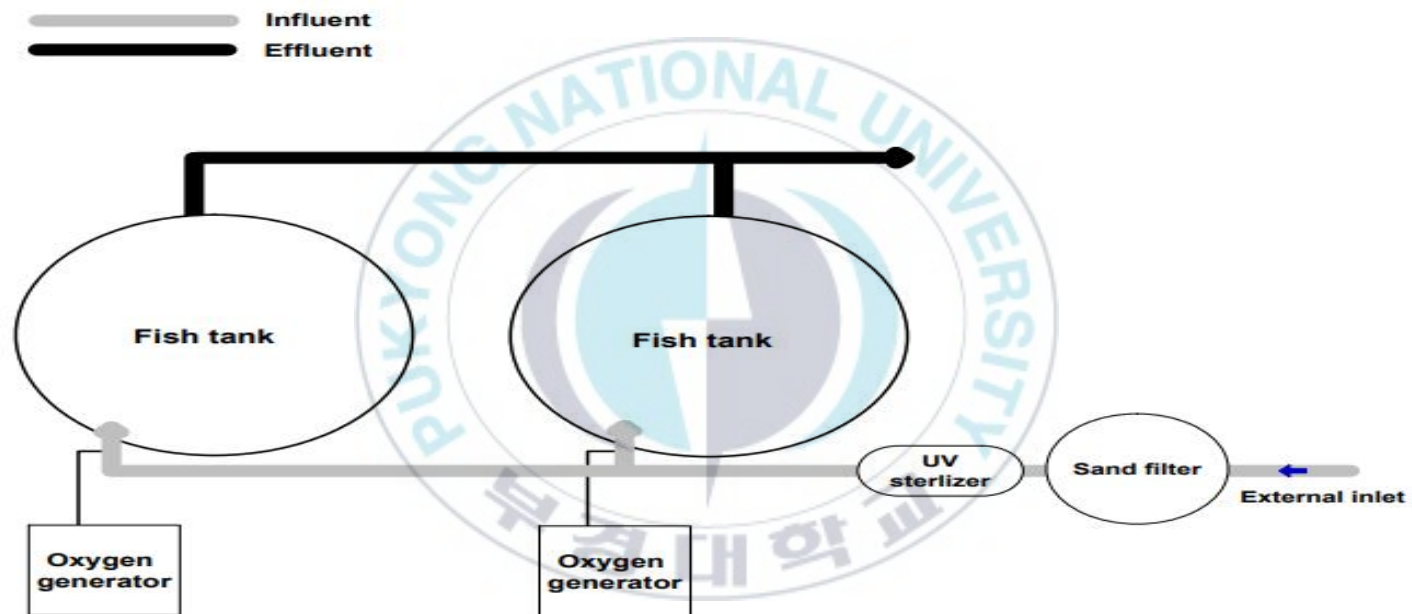


Figure 1. The schematic drawing of the experimental flow-through water aquaculture system.

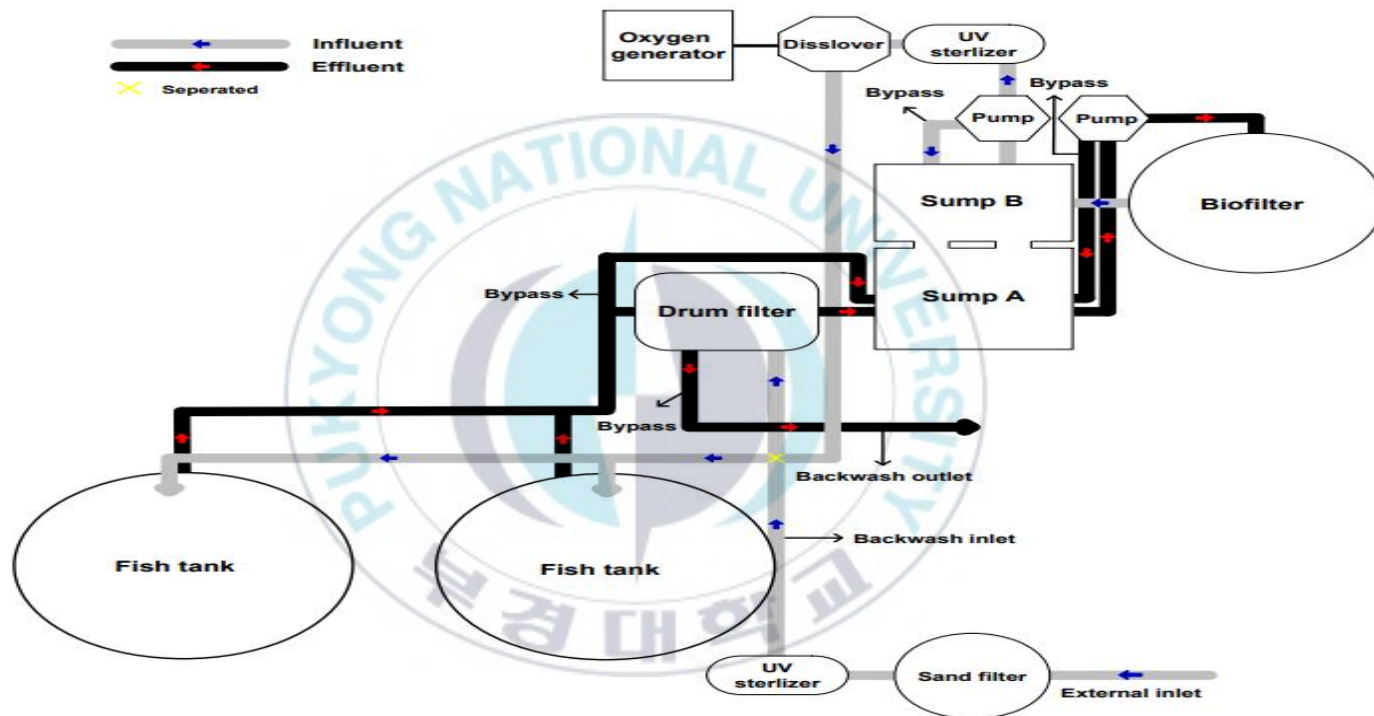


Figure 2. The schematic drawing of the experimental recirculating aquaculture system.

Table 1. Characteristics of bio-media

Media	Kaldnes K1
Type	Flat cylinder
Quality of material	High density polyethylene
Density	$0.92\sim 0.96\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$
Diameter	$10.0\pm 0.2\text{ mm}$
Height	$7.0\pm 0.2\text{ mm}$
Specific surface area (m^2/m^3)	$500\pm 50\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$

2. 생물 사육

본 실험에 사용된 실험어류는 경상남도 하동군에 있는 양식장 (TaeKwang, Korea)에서 사육 중인 넙치를 분양받았다. 사육수온은 히트 펌프를 이용하여 실험온도를 유지하였으며, 순수산소발생기를 이용하여 사육 수조에 충분한 산소를 공급하였다. 20℃에서의 실험은 유수식 시스템에서, 23, 26℃의 실험은 순환여과 시스템에서 실시하였다. 각 수온조건에서 사료공급 1, 2회와 3, 4회로 나누어 3일간 실시하였으며, 각 실험구 별로 3일간의 적응기간을 두었다. 수온의 경우에도 3일에 걸쳐 서서히 높여주었으며, 실험어의 평균 체중은 실험 시작 전, 종료 후 수조 당 30마리씩 측정하였다.

사료는 시판 넙치용 배합 사료(Jeil Feed, Daejeon, Korea)를 공급(Table 2)하였으며, 20℃ 실험에서는 1.5 kg, 23, 26℃ 실험에서는 1.8 kg 사료를 1~4회에 나누어 공급하였다. 공급시간은 횟수별로, 1회(11:00), 2회(11:00, 16:00), 3회(11:00, 14:00, 17:00), 4회(11:00, 13:00, 15:00, 17:00)에 공급하였다.

수온 20, 23, 26℃의 실험구에 대해 두 수조에 수용한 어체중은 각각 104.0, 131.5, 159.0 kg 이었고, 이 때 사용한 어류의 개체 중량의 범위는 346~585 g 이었다.

전체 실험 기간 동안 광주기는 타이머를 이용하여 12L(07:00-19:00):12D(19:00-07:00)로 조절하였다. 순환여과양식 시스템을 이용한 23, 26℃ 실험구에서는 pH와 알칼리도 하락을 방지하기 위해 중탄산나트륨을 일간 2회(13:00, 17:00) 1 kg 씩 여과조에 넣어주었다.

Table 2. Ingredient of commercial feed

Ingredient	Content (%)
Crude Protein	≥ 53
Crude fat	≥ 10
Calcium	≥ 2.7
Phosphorus	≤ 1.8
Crude fiber	≤ 1
Crude ash	≤ 13

3. 넙치의 TAN 물질 수지 모델

넙치의 TAN 물질 수지 모델을 도출하기 위해 각각의 조건별로 실험을 하면서, 수온과 사료공급횟수에 따른 넙치의 TAN 배설량을 (식 1, 2)을 이용하여 계산하였다. 사료공급 전, 후 11시간까지는 1시간마다 측정하였고, 그 이후는 2시간, 4시간, 4시간, 3시간 간격으로 사육 수조의 유입수와 배출수의 TAN 농도를 Salicylate method (Hach method 8155)를 이용하여 분광광도계(DR 900, Hach, Loveland, USA)로 일간 15회 측정하였다. 계산한 값들은 Sigmaplot 10.0을 이용하여 그래프로 도식화한 후, 시간당 TAN 배설량을 나타내는 그래프 아래의 면적을 적분하여 넙치의 일간 TAN 배설량($\text{mg TAN} \cdot \text{kg flatfish}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$) 및 사료 1 kg 당 TAN 배설량($\text{mg TAN} \cdot \text{kg feed}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$)을 추정하였다. 이후 추정된 넙치의 일간 TAN 배설량을 통해 수온과 사료공급횟수에 따른 TAN 배설량 모델과 섭취한 질소로 배설된 질소의 비율 모델을 도출하였다. 개발된 모델을 통해 식 3에서의 필요한 1-NPU 값을 계산한 후 최종적으로 TAN 물질 수지 계산식 (식 4)를 이용하여 도출된 TAN 물질 수지 모델 평가를 진행하였다.

어체중 및 시간 당 TAN 배설량 ($\text{mg TAN} \cdot \text{kg flatfish}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)

$$= (C_{\text{out}} - C_{\text{in}})Q/W$$

$$C_{\text{out}} = \text{배출수의 TAN 농도 (mg TAN} \cdot \text{L}^{-1}) \quad (\text{식 1})$$

$$C_{\text{in}} = \text{유입수의 TAN 농도 (mg TAN} \cdot \text{L}^{-1})$$

$$Q = \text{실험 수조를 지나는 유량 (L} \cdot \text{hr}^{-1})$$

$$W = \text{넙치 체중 (kg)}$$

사료량 및 시간 당 TAN 배설량 (mg TAN·kg feed⁻¹·hr⁻¹)

$$= (C_{out} - C_{in})Q/W$$

C_{out} = 배출수의 TAN 농도 (mg TAN·L⁻¹)

(식 2)

C_{in} = 유입수의 TAN 농도 (mg TAN·L⁻¹)

Q = 실험 수조를 지나는 유량 (L·hr⁻¹)

W = 사료 공급량 (kg)

$$TAN_p = (1 - NPU) \times P_f \times N \times W$$

(식 3)

P_f = 사료 내 단백질 함량 (fraction)

N = 단백질 내 질소 함량 (fraction)

W = 사료량 (kg)

TAN의 Mass balance 계산식

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

TAN_p = TAN 생성량 (kg/day)

(식 4)

C_{in} = 유입되는 TAN 농도 (mg TAN·L⁻¹)

C_{out} = 배출되는 TAN 농도 (mg TAN·L⁻¹)

Q = 실험 수조를 지나는 유량 (L·min⁻¹)

1,440과 1,000,000 = 단위 변환 상수

4. 통계 분석

통계 처리는 SPSS 25.0 통계프로그램을 이용하였다. 수온과 사료공급횟수에 대해 two-way ANOVA test를 실시하여 수온과 사료공급횟수가 넙치의 TAN 배설 특성에 미치는 영향을 평가하였으며, Scheffe multiple comparison test를 이용하여 평균 간의 유의차($p < 0.05$)를 검정하였다.



III. 결과

1. TAN 농도 변화

수온 20, 23, 26℃에서 사료공급횟수에 따른 TAN 농도 변화를 Figure 3, 4, 5에 나타내었다.

26℃에서 사료공급 2회를 제외한, 수온과 사료공급횟수에 따른 TAN 농도 값은 명확한 일주기 경향을 나타내었다. 20℃에서의 TAN 농도 값은 23, 26℃에서의 농도 값에 비해 낮았다. 모든 수온에서 사료를 1회에 모두 공급하였을 때, 사료공급 후 지속적으로 상승하여 4~6시간 후에 최고값을 나타낸 후, 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 사료를 2번에 나누어 공급하였을 때는 26℃를 제외한 20, 23℃에서는 1회 공급 시와 유사하게 사료 1차 공급 후 4~5시간까지 상승하여 1차 최고값을 나타내었다. 이후 다시 감소한 후, 2차 공급 후 3시간까지 다시 상승하여, 2차 최고값을 나타내었으며, 이는 가장 높은 TAN 농도 값이었다. 이후 지속적으로 감소하여 사료공급 전과 비슷한 농도 값을 나타내었다. 사료를 3, 4회에 나누어 공급하였을 때는 뚜렷한 최고값은 나타나지 않았으며, 4회에 나누어 공급하였을 때가 3회에 나누어 공급했을 때보다 낮은 TAN 농도 값을 나타내었다. 사료공급 3, 4회 모두 사료 1차 공급 후 4시간까지 상승한 후 완만한 상승과 감소를 반복하다 11시간 후부터 감소하는 경향을 나타내었다.

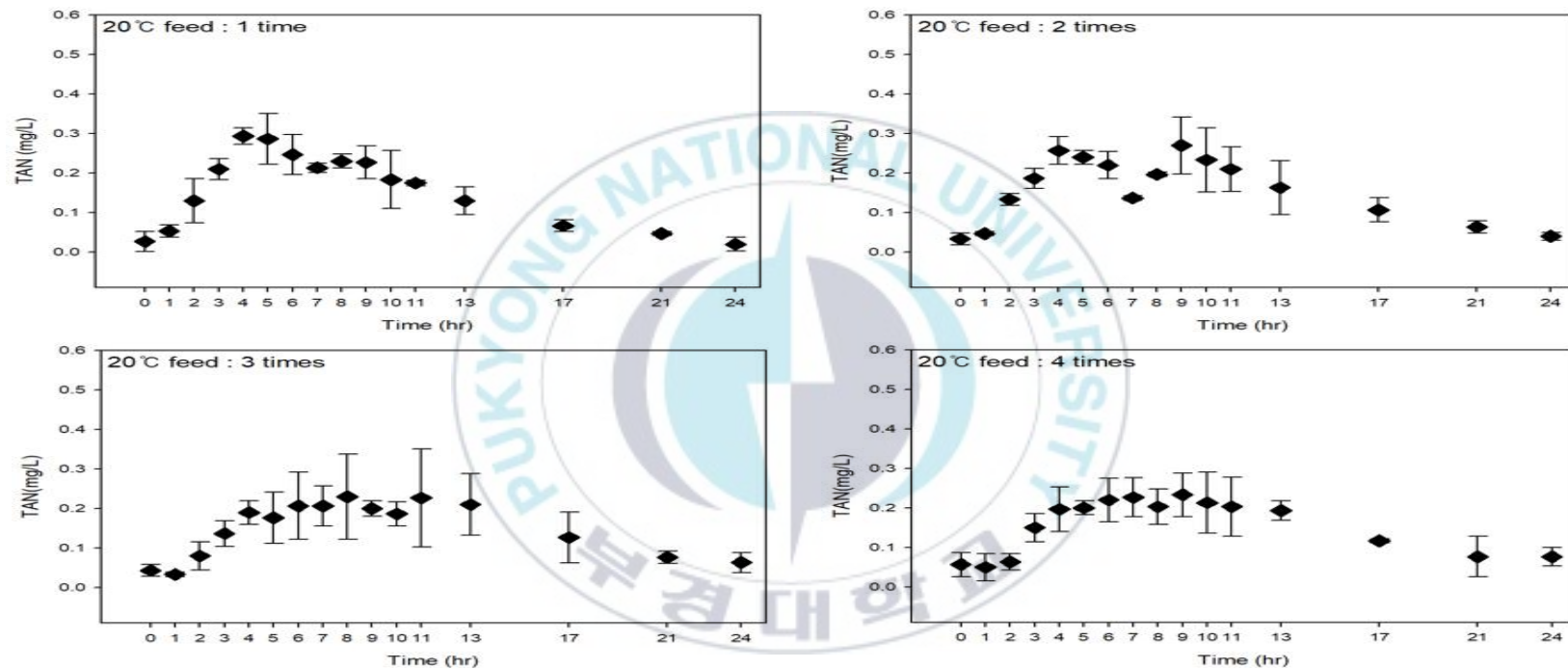


Figure 3. TAN concentration changes at 20°C with four different feeding frequencies.

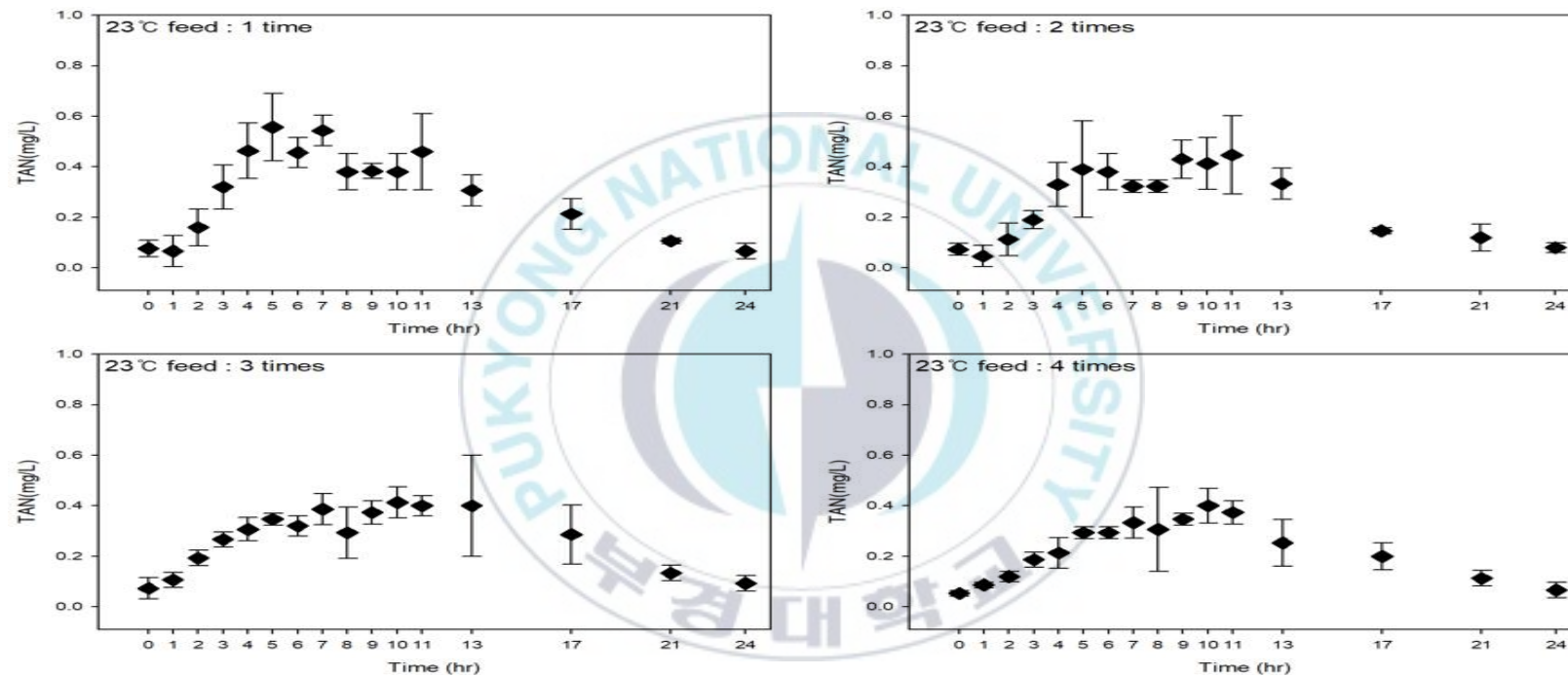


Figure 4. TAN concentration changes at 23°C with four different feeding frequencies.

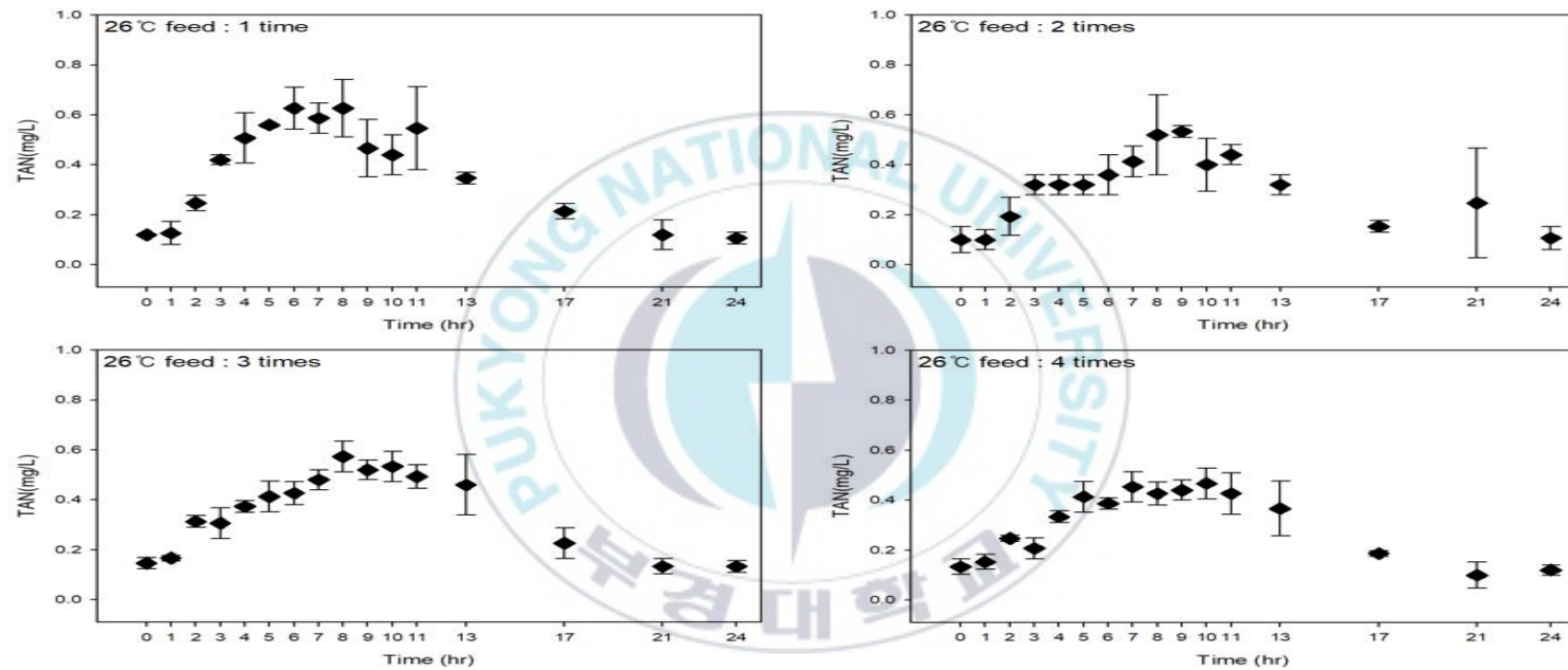


Figure 5. TAN concentration changes at 26°C with four different feeding frequencies.

2. TAN 배설량

수온 20, 23, 26℃에서 사료공급횟수에 따른 시간 당 넙치의 TAN 배설량 변화를 어체중(Figure 6, 7, 8) 및 사료량(Figure 9, 10, 11)을 기준으로 아래에 나타내었다.

TAN 배설 일주기 경향은 TAN 농도 일주기 변화와 경향과 유사하게 나타났다으며, 넙치의 체중 당 일간 TAN 배설량은 수온과 사료공급횟수에 모두 영향을 받았다. 수온 20, 23, 26℃에서 각각 193 ± 30.0 , 328 ± 47.4 , 332 ± 52.1 mg TAN·kg flatfish⁻¹·day⁻¹, 사료공급횟수 1, 2, 3, 4회에서 각각 310 ± 101.6 , 263 ± 61.1 , 313 ± 89.9 , 254 ± 40.9 mg TAN·kg flatfish⁻¹·day⁻¹로 나타나(Table 3), 수온과 사료공급횟수 모두 TAN 배설량에 상호작용을 하였다($p < 0.05$). 수온 23, 26℃에서는 유의한 차이가 없었으며($p > 0.05$), 또한 사료공급횟수 1, 3회와 2, 4회에서는 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$).

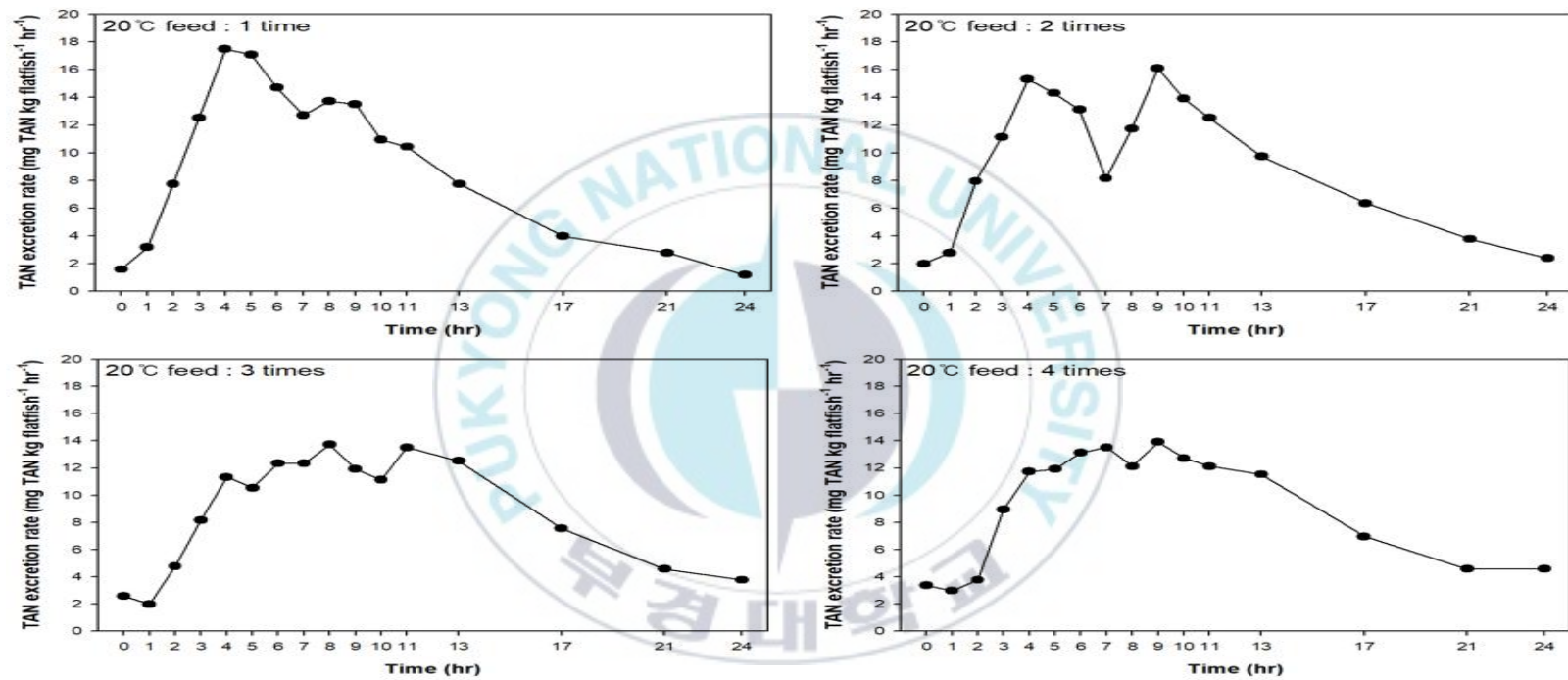


Figure 6. TAN excretion rates(mg TAN·kg flatfish⁻¹·hr⁻¹) at 20°C with four different feeding frequencies.

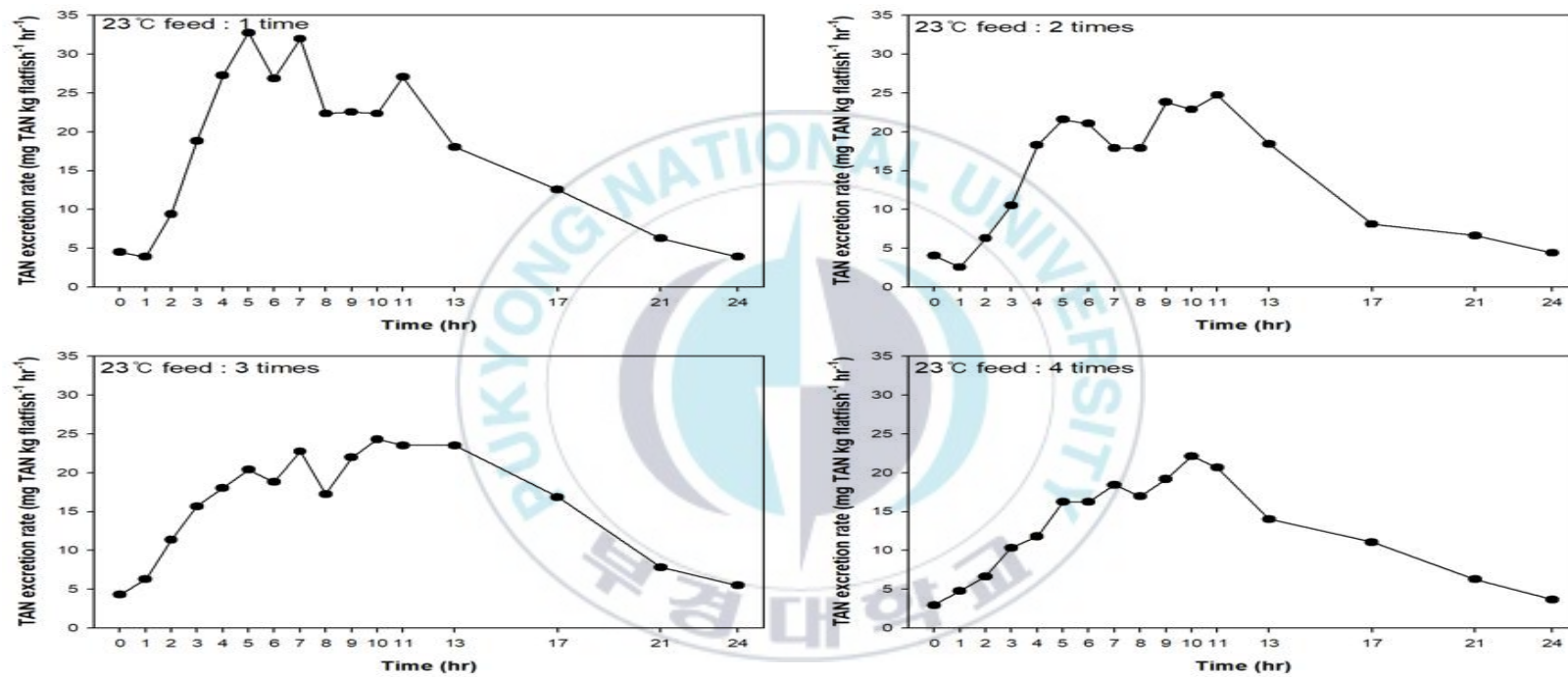


Figure 7. TAN excretion rates(mg TAN·kg flatfish⁻¹·hr⁻¹) at 23°C with four different feeding frequencies.

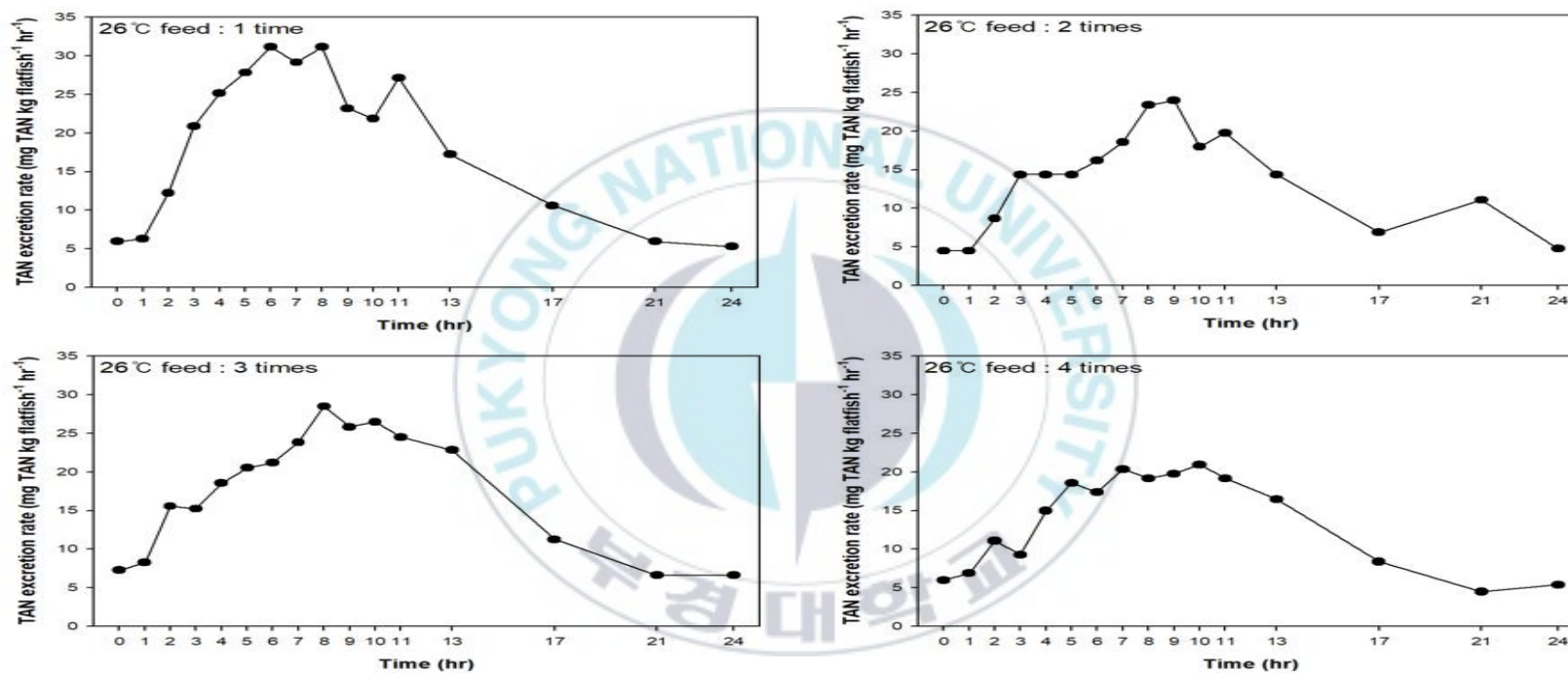


Figure 8. TAN excretion rates(mg TAN·kg flatfish⁻¹·hr⁻¹) at 26°C with four different feeding frequencies.

Table 3. The results of two-way ANOVA on the effect temperature (T), and feeding frequency (F) for TAN excretion rate (mg TAN·kg flatfish⁻¹·day⁻¹) of Olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)

Temperature (°C)	Feeding frequency				Pooled mean
	1	2	3	4	
20	178±24.9	192±29.6	199±49.9	203±20.6	193±30.0 ^B
23	373±35.8	301±17.6	367±7.2	275±8.95	329±47.4 ^A
26	378±19.6	296±49.8	373±24.0	284±17.1	333±52.1 ^A
Pooled mean	310±101 ^a	263±61.1 ^b	313±89.9 ^a	254±40.9 ^b	285±78.6
Analysis of variance					
		Sum of square mean	df	square mean	<i>P</i> value
Overall		196,472.02	11	17,861.09	0.000
T		151,738.05	2	75,869.02	0.000
F		25,720.22	3	8,573.407	0.000
T×F		19,013.75	6	3,168.959	0.008

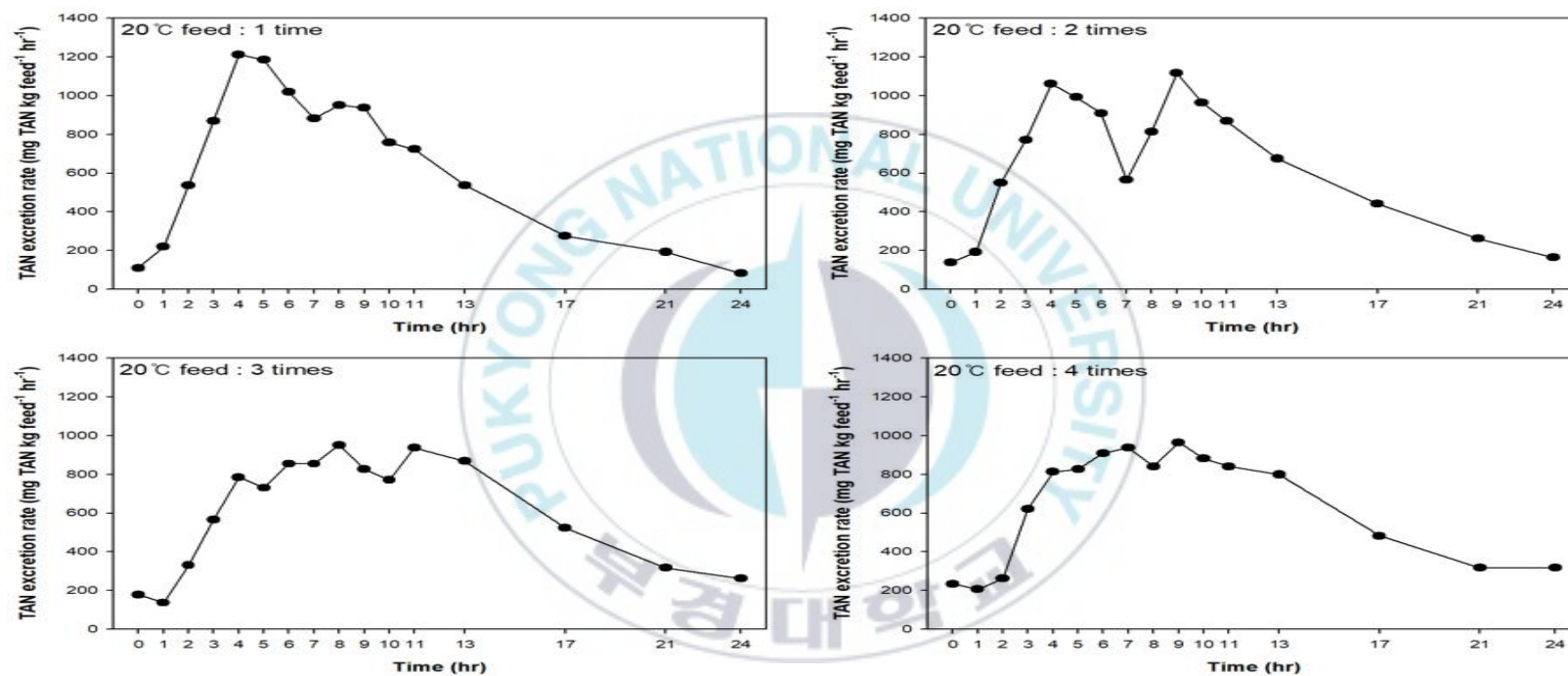


Figure 9. TAN excretion rates(mg TAN $\cdot$ kg feed $^{-1}$ $\cdot$ hr $^{-1}$) at 20°C with four different feeding frequencies.

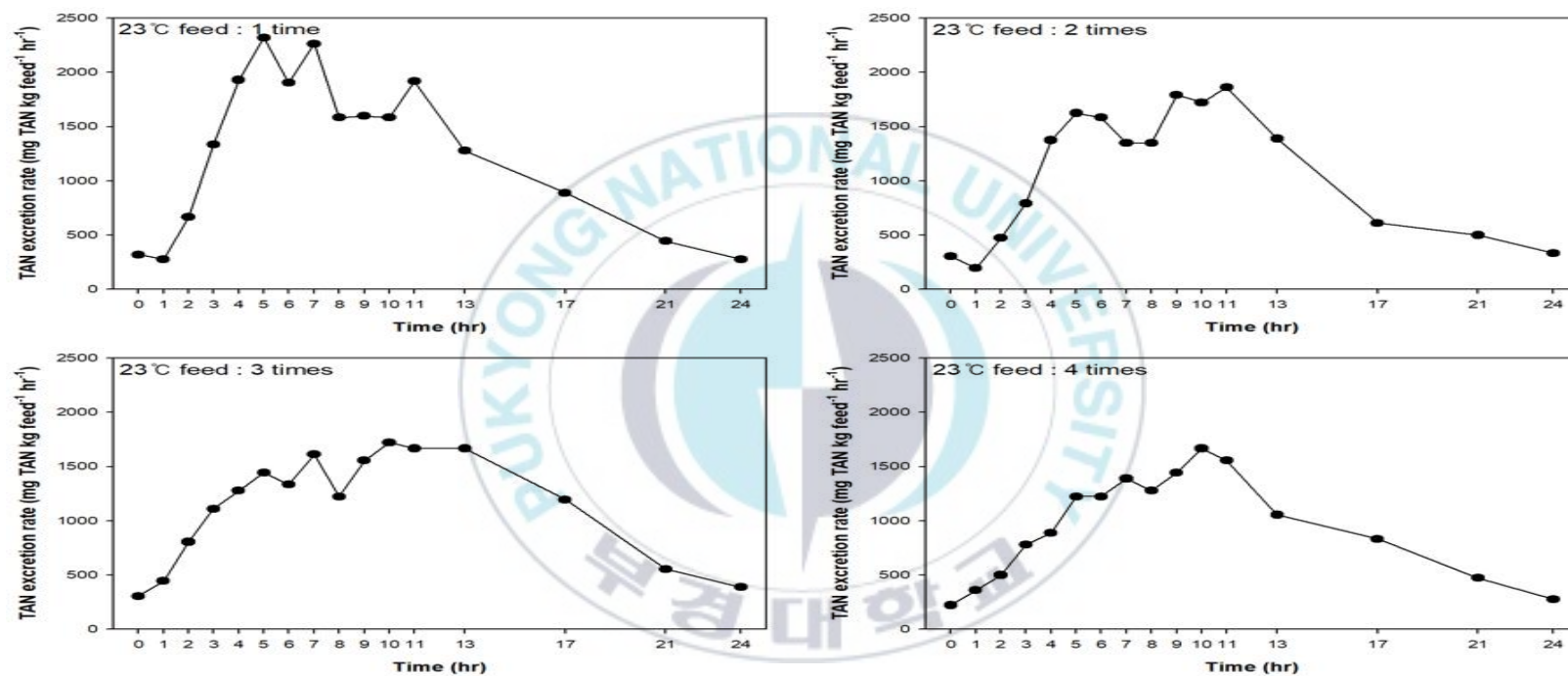


Figure 10. TAN excretion rates(mg TAN·kg feed⁻¹·hr⁻¹) at 23°C with four different feeding frequencies.

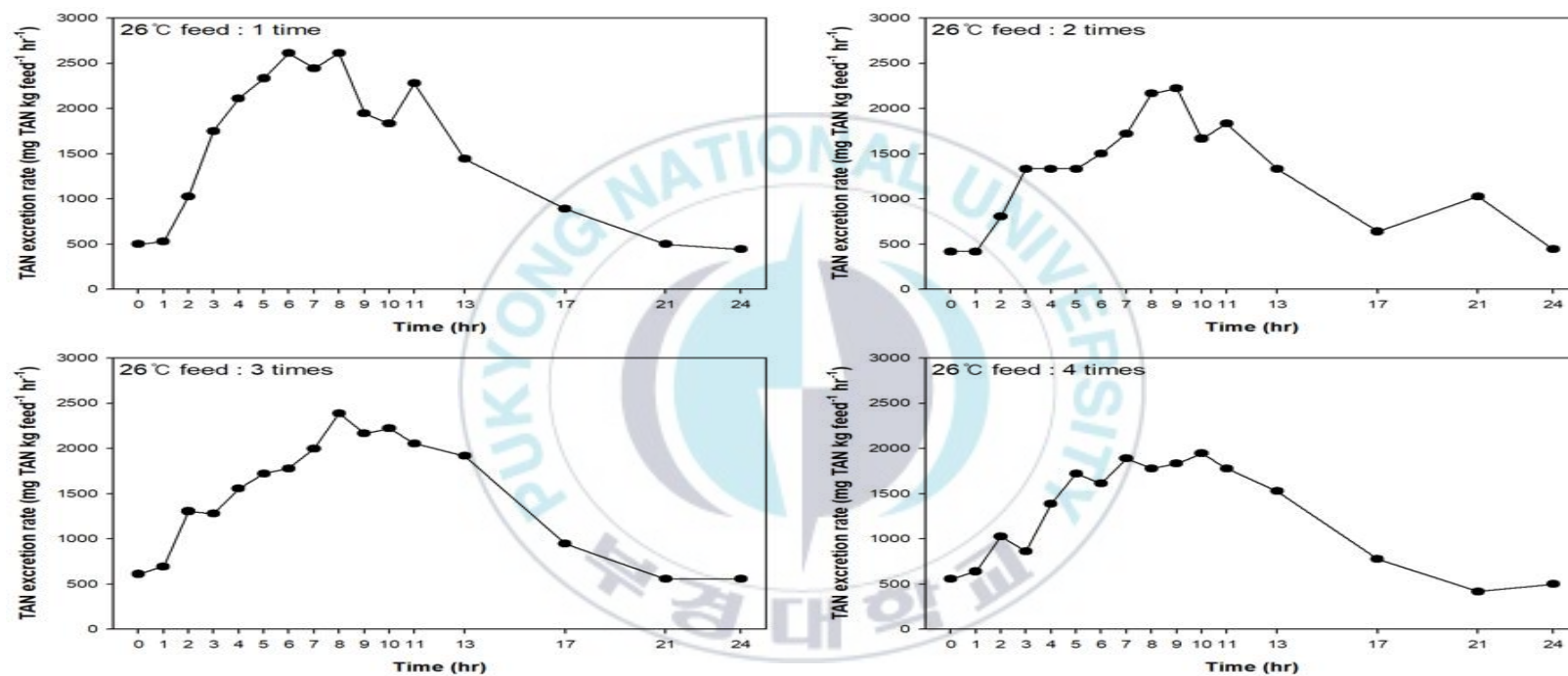


Figure 11. TAN excretion rates(mg TAN·kg feed⁻¹·hr⁻¹) at 26°C with four different feeding frequencies.

3. TAN 물질 수지 모델

넙치의 수온과 사료공급횟수에 대한 TAN 물질 수지 모델을 TAN 배설량($\text{mg} \cdot \text{kg flatfish}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$)과 섭취한 질소로 배설된 질소의 비율(%) 두 가지 형태로 각각 Figure. 12와 13에 나타내었다. 수온이 높을수록 TAN 배설량과 섭취한 질소로 배설된 질소의 비율은 증가하였으며, 사료공급횟수는 공급횟수가 잦을수록 낮아지는 경향을 나타내었다. 섭취한 질소로 배설된 질소의 비율(%)을 통해 수온과 사료공급횟수에 따른 넙치의 NPU 값을 계산할 수 있었으며, 수온(X), 사료공급횟수(Y), TAN 배설량 및 섭취한 질소로 배설된 질소의 비율(Z)의 상관관계식은 다음과 같다.

TAN excretion :

$$Z = 348.82 + (-6.8538214e+10) e^{-X} - 0.57Y^3 \quad (X: 20 \sim 26, Y: 1 \sim 4)$$

Excreted nitrogen to ingested nitrogen :

$$Z = 63.06 - 18320.04/X^2 - 0.0412Y^3 \quad (X: 20 \sim 26, Y: 1 \sim 4)$$

$$Z = 348.82 + (-6.8538214e+10)e^{-x} - 0.57Y^3 \quad (R^2 = 0.7343)$$

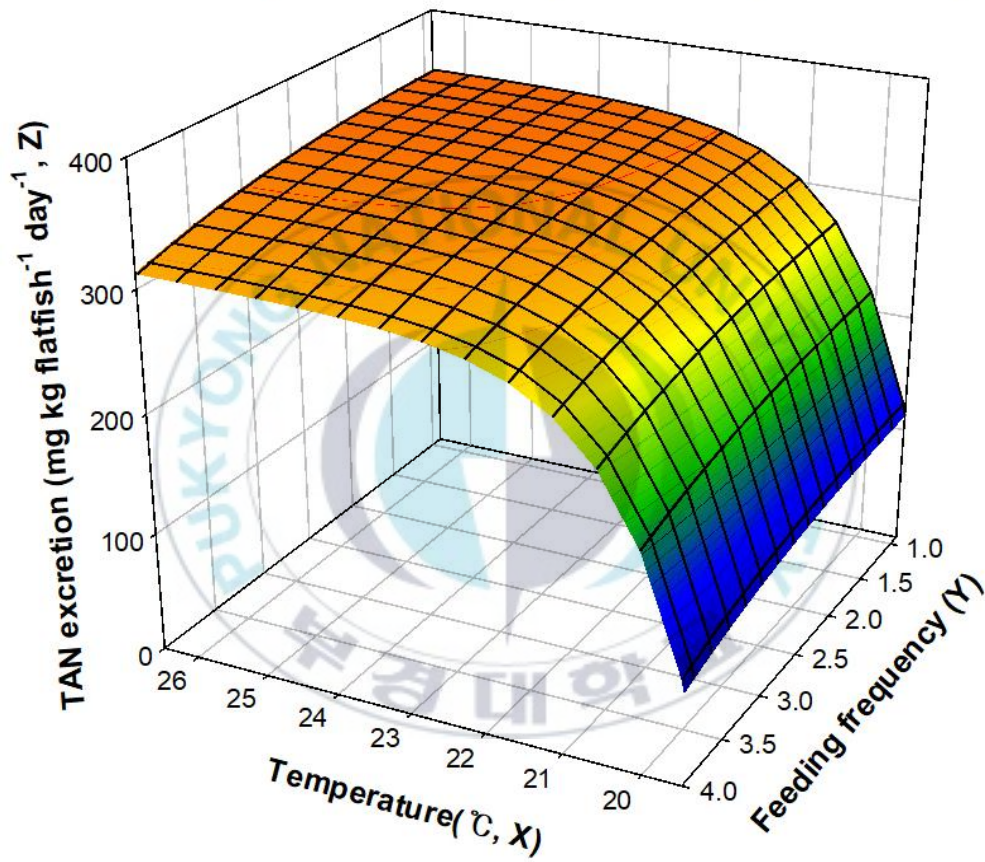


Figure 12. Prediction model for the TAN excretion based on temperature and feeding frequency.

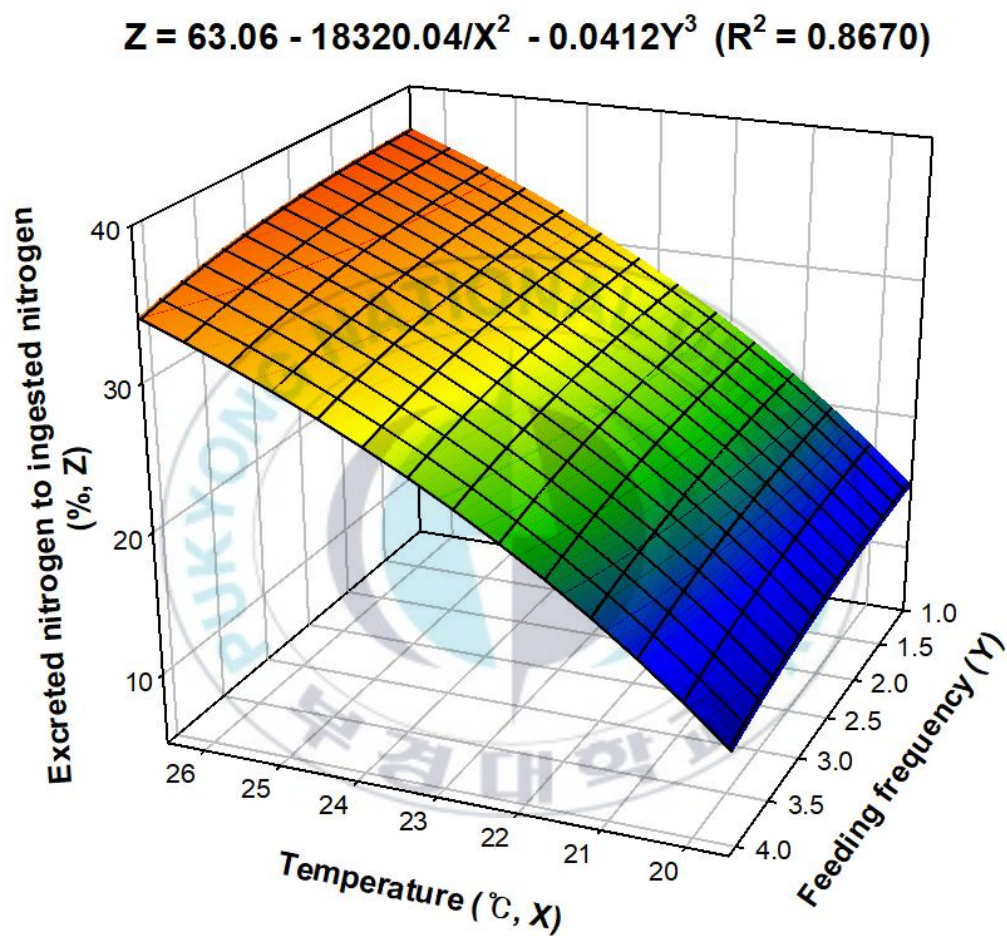


Figure 13. Prediction model for the excreted nitrogen to ingested nitrogen based on temperature and feeding frequency.

IV. 고찰

1. TAN 배설

본 연구에서는 양식시스템 설계에 필요한 기초자료제공을 위해, 수온 및 사료공급횟수에 따른 넙치의 TAN 물질 수치 모델 평가를 진행하였다.

본 실험에서 수온과 사료공급횟수는 넙치의 TAN 배설량에 영향을 미쳤다. 넙치의 TAN 배설 패턴은 수온이 증가할수록 높아지는 패턴을 보였지만, 23, 26℃에서 유의한 차이를 나타내지 않았다($p>0.05$). 이러한 결과가 나타난 이유는 수온 실험구 간에 어체의 평균 개체 중량에 다소 차이가 있었기 때문이라 생각된다. 20℃에서 23, 26℃보다 값이 크게 차이가 나는 것은 수온의 영향이 주된 이유라 판단되지만, 실험 시스템의 운전 방식의 차이에 따른 효과가 반영된 것을 배제할 수 없다. 유수식 시스템의 경우 TAN 농도 0 mg/L 의 새로운 유입수가 수조로 유입되지만 순환여과식 시스템의 경우 TAN 농도가 유수식에 비해 다소 높게 유지되었다. 높은 TAN 농도는 어류의 대사에 영향을 줄 수 있으므로(Lee, 2015;Kim *et al.*, 2019), 안전농도 값을 계산하여 어류에게 미치는 영향을 판단한다. 일반적으로 안전농도는 96시간 반수 치사 농도(96-h LC₅₀)에 0.09를 곱한 값으로 추정할 수 있다(Boyd, 2013). 넙치의 경우 암모니아 96시간 반수 치사 농도는 26.008 mg/L (Kim *et al.*, 2009)로 보고된 바 있다. 이를 통해 계산된 안전농도 값은 2.34 mg/L 였다. 본 실험에서의 TAN 농도 측정 최고값은 0.63 mg/L 로 계산된 안전농도 값보다 낮기에 수중의 TAN이 어류에게 영향을 미쳤을 것으로는 판단되지 않는다. 따라서 운전 방식에 의한 차이보다는 수온에 의한 영향이 주된 원인으로 추측할 수 있다.

수온은 생물의 TAN 배설에 영향을 주는 주요 외부 요인 중 하나이다.

일반적으로 어류의 TAN 배설은 수온이 높아지면 증가하게 되며(Forsberg and Summerfelt, 1992), 다양한 어종 (Areolated grouper (*Epinephelus areolatus*, Leung *et al.*, 1999), 강도다리(*Platichthys stellatus*, Oh *et al.*, 2009), 볼락(*Sebastes inermis*, Oh and Choi, 2009), pikeperch (*Sander lucioperca*, Frisk *et al.*, 2013))에서 수온이 높아질수록 TAN 배설량이 증가한다는 연구결과가 있다. 이것은 수온이 상승하면서 사료의 섭취량이 증가하기 때문이며 수온이 높을수록 TAN 배설량이 증가하는 본 실험의 연구결과는 수온 12, 15, 20, 25℃에서 넙치의 식후 TAN 배설량에 대한 Lee (2015)의 연구결과와도 일치하였다.

사료공급횟수에 따른 넙치의 어체중 당 TAN 배설 패턴은 모든 수온에서 수조별로 다소 상이한 결과를 나타내었다. 전체 수조에 대해 같은 실험 조건을 맞추어 주었으나 작은 소형 수조와는 달리 큰 규모의 수조에서는 사육수조의 위치, 유체의 유동 특성 등 통제하기 어려운 변동 요인들이 발생할 수 있다. 이로 인해 수조 내 물리학적 특성 및 성장 정도의 차이 등이 수조별 배설 패턴의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 사료를 2회로 나누어 공급하였을 때 20, 23℃에서 최고값이 2회 나타났으며 두 번째의 최고값이 더 높게 나타났다. 이러한 경향은 강도다리(Oh *et al.*, 2009), 농어(*Dicentrarchus labrax*), seabream (*Sparus auratus*), 터봇(*Scophthalmus maximus*), 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)에서도 보고된 바 있다(Dosdat *et al.*, 1996). 두 번째의 최고값이 더 높게 나타난 이유는 처음 공급한 사료를 섭취하고 배설하는 TAN의 영향이 완전히 사라지지 않은 상태에서 추가적인 사료공급으로 인해 TAN의 배설이 이루어져 나타난 것으로 생각된다.

2. TAN 물질 수지 모델

도출된 모델을 이용하여 TAN 물질 수지 계산식을 통해 실제 양식시스템 설계에 적용 가능한지 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 시뮬레이션에 필요한 요소들의 값은 수산과학원 넙치 양식 표준 매뉴얼(2016)을 참고하여 사육밀도와 일간 사료공급률을 설정하였으며, 사료 내 단백질 함량은 본 실험에서 사용한 사료와 동일하게 설정하였다. 나머지 요소들의 값은 임의로 설정하여, Table 4에 나타내었다. 본 실험결과에서 도출된 모델 식을 통해 TAN 생성량 계산에 필요한 1-NPU 값을 구했으며, 이후 물질 수지 계산식을 통해 $C_{out} - C_{in}$ 의 값에 따라 양식시스템에 필요한 유수량의 값을 Table 5에 나타내었다. C_{out} 값은 앞에서 계산된 TAN 안전농도 값인 2 mg/L로 설정하였고, C_{in} 값은 0, 0.5, 1.0 mg/L로 설정하여 시뮬레이션을 진행하여 필요한 유수량을 도출하였다.

본 연구결과와 동일하게 수온이 높아질수록 증가하는 TAN 배설량 처리를 위해 필요한 유수량은 증가하였고, 사료공급횟수가 잦을수록 필요한 유수량은 감소하였다(Table 5). 따라서 넙치를 수온 20~26℃의 범위에서 사육할 때 사료공급횟수는 4번을 공급하는 것이 생산성 측면에서 가장 유리할 것으로 판단된다.

순환여과 양식시스템에서 어류를 사육할 때는 경제적인 이득을 위해 성장률을 최대한으로 높여 생산주기를 단축시키는 것이 중요하다(Balami, 2021). 일반적으로 생물은 적정 수온 범위 내에서 수온이 높을수록 대사율이 높아지며, 빠르게 성장하는 Q_{10} 법칙이 적용된다(Wuenschel *et al.*, 2005; Oh *et al.*, 2012). 다양한 어종에 있어 적정수온 범위 내 수온이 높을수록 높은 성장률을 나타낸다는 연구결과들은 보고되었다(Myeong *et al.*, 1997; Kang *et al.*, 2004; Handeland *et al.*, 2008., Lee *et al.*, 2021).

다른 어종들과 마찬가지로 넙치도 수온이 높을 때 더 높은 성장률을 보인다(Kim *et al.*, 2010). 사료공급횟수 또한 양식어의 성장 및 수질관리에 주요한 요인으로(Kim *et al.*, 2010), 양식 어류의 최대성장을 위한 적정 사료공급횟수는 어체 크기, 어종, 수온 등의 영향을 받는다(Riche *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2010). 본 연구결과에도 나타났듯이 수온이 높을수록 TAN 배설량은 증가하게 되고 사료공급횟수도 TAN 배설량에 영향을 미쳤다. 수온과 사료공급횟수에 따라 넙치의 TAN 배설량은 달라지며 이는 시스템 내의 질소 부하량 변화로 이어지기 때문에 이에 맞는 적정 유수량의 계산은 필수적이다.

어종에 따라 질소 소화율이 다르기 때문에(Park, 2005), 본 연구에서 도출되어진 TAN 물질 수지 모델은 넙치에 특화된 모델이다. 따라서 넙치양식을 위한 순환여과 시스템 설계 시 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 이 모델은 수온 20~26℃에서만 적용이 가능하기에 더 넓은 범위의 수온에서 사육하는 유수식 시스템의 설계에는 적용되기 어렵다는 단점을 가져 다양한 수온조건에서의 추가적인 연구를 통해 모델을 보완할 필요성이 있으며, 성공적인 순환여과 양식시스템의 설계를 위해서는 용존산소, 이산화탄소, 총 부유고형물 등의 수질 요인에 따른 물질 수지 모델의 추가적인 도출이 필요할 것으로 보인다.

Table 4. Simulation conditions for calculating flow rate

Water volume (m ²)	50
Stoking density (kg/m ²)	25
Individual fish weight (g)	1000
Total fish weight (kg)	1250
Daily feeding rate (%)	20℃ (0.5%), 23℃ (0.8%), 26℃ (1%)
Total feed amount (kg)	20℃ (6.25kg), 23℃ (10kg), 26℃ (12.5kg)
Protein content in feed (%)	53

Table 5. Simulation value of flow rate(LPM) using model equation by the TAN concentration difference

$C_{out} - C_{in}$ (mg/L)	Temperature (°C)	Feeding frequency			
		1	2	3	4
2.0	20	31.69	31.16	29.72	26.91
	23	83.58	82.74	80.43	75.94
	26	132.20	131.14	128.26	122.65
1.5	20	42.25	41.54	39.62	35.88
	23	111.45	110.31	107.24	101.26
	26	176.26	174.85	171.01	163.53
1.0	20	63.37	62.31	59.43	53.82
	23	167.17	165.47	160.86	151.88
	26	264.40	262.27	256.51	245.29

요약

넙치(*Paralichthys olivaceus*)는 국내 주요 양식어종으로 성장이 빠르고 고밀도 사육이 가능하다는 장점이 있다. 국내 양식 어류 생산량의 약 56%를 차지하고 있어 국내 양식 산업에 있어 중요성이 높다. 하지만 지속적인 연안환경오염으로 대량의 자연 해수를 취수하여 양식생물을 생산하는 유수식 양식장에서 폐사율이 크게 증가하고 있다. 세계적으로도 유사한 문제점들이 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위해 기존의 해상가두리 또는 유수식 방법과 같이 환경에 영향을 받는 시스템이 아닌 순환여과식 양식 시스템(RAS)에 관한 연구가 이루어지고 있다.

RAS를 설계할 때 여러 수질 요인에 대한 생물학적 부하량을 기준으로 물질수지 계산을 하여 시스템의 유수량을 결정하게 된다. 그 중 total ammonia nitrogen (TAN)은 수질과 어류 생산성에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 이에 따라 본 연구에서는 수온(20, 23, 26℃)과 사료공급횟수(1, 2, 3, 4회)에 따른 넙치의 TAN 물질 수지 모델을 도출하기 위해 실험을 진행하였다.

그 결과, 넙치의 TAN 배설량은 수온이 높을수록, 사료공급횟수가 적을수록 많이 배설되었다. 이를 통해 수온과 사료공급횟수에 따라 변동하는 넙치에 특화된 TAN 물질 수지 모델을 도출하였다. 도출된 넙치의 TAN 배설량 모델식은 $Z=348.82+(-6.8538214e+10)e^{-X}-0.57Y^3$ 이었다. 섭취한 질소로 배설된 질소의 비율의 모델식은 $Z=63.06-18320.04/X^2-0.0412Y^3$ 이었다. 두 모델에서 X값은 수온, Y값은 사료공급횟수이다. 섭취한 질소 대비 배설된 질소 비율을 예측하는 모델과 TAN 물질 수지 모델을 이용하여 양식시스템에서 필요한 적정 TAN 농도를 유지하기 위한 유수량을 도출하는 설계 기준을 마련할 수 있었다.

감사의 글

이 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 분들에게 이 글을 통해 짧게나마 감사함을 전하려고 합니다.

누구보다 큰 도움을 주시고 저를 올바른 방향으로 이끌어주시며 지금의 결실을 맺을 수 있게 지도해주셨던 지도교수님이신 박정환 교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 바쁘신 와중에도 부족함이 많은 제 논문을 지도해주신 김찬희 교수님과 권기원 박사님께도 진심으로 감사드립니다. 그리고 대학교, 대학원 과정동안 많은 가르침을 주신 김종명, 공승표, 남윤권, 이승형, 최윤희 교수님께도 감사드립니다.

항상 저를 믿어주시고 아낌없는 지원과 격려를 보내주신 부모님과 형제 승윤이형, 재욱이에게도 감사의 마음을 전합니다.

고성 센터에서 1년 동안 함께 지내며 못난 동생 말들어주고 맞춰 준다 고생하고 정신적으로 버틸 수 있게 많이 도와준 주량이 아쉬운 영훈이형, 학부시절부터 석사과정까지 험난한 여정을 함께 마친 뽀질이 재건이, 실험 도와준다고 고생한 한본인 성천상에게 감사의 말씀을 전하고 모두 석사졸업 축하합니다. 저의 정신적 버팀목이자 제 2의 지도교수님이신 항상 본받고 싶은 멋진 형 배재현 대표이사님 여러모로 정말 감사하다는 말을 전합니다. 실험실 생활에 있어 많은 도움을 주셨던 아직도 어렵지만 친해지고 싶은 태건이형, 거제로 떠나버린 동훈이형, 항상 다정한 서울남자 근홍이형, 항상 밝은 에너지를 주는 은지누나, 연구사 준혁이형에게도 감사의 말씀을 드립니다. 저의 영원한 듀오 지수형, 존재만으로도 든직한 지훈이, 차기 센터장 건우, 실험실 산단선생님 진서, 탈모가 걱정인 지호, 실험실 일로 고생하신 홍석선배, 고성군민 도형이형, 장길이에게도 감사와 응원의 말을 전합니다. 또 고성센터 운영에 많은 도움을 주신 곽상욱 선생님과 이모에게도

감사의 말을 전합니다. 마지막으로 늦은시간에도 같이 술마셔준다 고생하고
항상 앞으로 나아갈 수 있게 자극제가 되어준 대학동기 제환, 우현, 충영에
게도 고맙다는 말을 전합니다.

지난 시간들을 되돌아보면 정말 빠르게 지나간 2년 이었습니다. 2년이라
는 시간동안 배우고 느낀 것들을 토대로 더 성장해 나가겠습니다. 다시 한
번 도움을 주신 모든 분들에게 감사의 말을 전하며 이 논문을 바칩니다.



참고문헌

- Aslam, S. N., Navada, S., Bye, G. R., Mota, V. C., Terjesen, B. F., & Mikkelsen, Ø. (2019). Effect of CO₂ on elemental concentrations in recirculating aquaculture system tanks. *Aquaculture*, 511, 734254.
- Balami, S. (2019). Recirculation aquaculture systems: components, advantages, and drawbacks. Education, 2021.
- Boyd, C. E. (2013). Ammonia toxicity degrades animal health, growth. *Global Aquaculture Advocate* Dec.
- Cai, Y., & Summerfelt, R. C. (1992). Effects of temperature and size on oxygen consumption and ammonia excretion by walleye. *Aquaculture*, 104(1-2), 127-138.
- Dosdat, A., Servais, F., Metailler, R., Huelvan, C., & Desbruyeres, E. (1996). Comparison of nitrogenous losses in five teleost fish species. *Aquaculture*, 141(1-2), 107-127.
- Hur, J. W., Park, I. S., & Chang, Y. J. (2007). Physiological responses of the olive flounder, *Paralichthys olivaceus*, to a series stress during the transportation process. *Ichthyological Research*, 54(1), 32-37.
- Handeland SO, Imsland AK and Stefansson SO(2008). The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts. *Aquaculture*, 283, 36-42.
- Kang D, Han H and Jun C(2004). Influence of water temperature on growth of yearling sea bass, *Lateolabrax japonicas* in indoor tank.

- J. Aquaculture, 17(4), 240-245.
- Kim, H. S., Kim, H. Y., & CHIN, P. (1997). Effects of Ammonia on Survival and Growth of the Flounder Larva, *Paralichthys olivaceus*. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 30(3), 488-495.
- Kim, J. H., Kang, Y. J., Kim, K. I., Kim, S. K., & Kim, J. H. (2019). Toxic effects of nitrogenous compounds (ammonia, nitrite, and nitrate) on acute toxicity and antioxidant responses of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Environmental toxicology and pharmacology, 67, 73-78.
- Kim, K. D., Nam, M. M., Kim, K. W., Kim, D. G., & Son, M. H. (2010). Effects of Feeding Rate and Frequency on the Winter Growth and Body Composition of Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus*. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 43(3), 217-222.
- Kikuchi, K., Takeda, S., Honda, H., & Kiyono, M. (1992). Nitrogenous Excretion of Juvenile and Young Japanese Flounder. 日本水産學會誌, 58(12), 2329-2333.
- Kadowaki, S. (2018). Influence of Displacement Behavior on Nitrogen Excretion by Starved Flounder *Paralichthys olivaceus*. Mem. Fac. Fish. Kagoshima Univ, 67, 13-20.
- Lee, J. (2015). Postprandial Ammonia Excretion and Oxygen Consumption Rates in Olive Flounder *Paralichthys olivaceus* Fed Two Different Feed Types According to Water Temperature Change. Fisheries and Aquatic Sciences, 18(4), 373-378.

- Lee, S. M., Cho, S. H., & Kim, D. J. (2000). Effects of feeding frequency and dietary energy level on growth and body composition of juvenile flounder, *Paralichthys olivaceus* (Temminck & Schlegel). *Aquaculture Research*, 31(12), 917-921.
- 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.
- Myeong, J. I., Pack, S. Y., & Chang, Y. J. (1997). Effects of water temperature and feeding rate on growth and feed efficiency of korean rockfish *Sebastes schlegeli*. *Journal of Aquaculture*, 10(3), 311-320.
- Oh, S. Y., & Choi, S. J. (2009). Effect of water temperature on ammonia excretion of juvenile dark-banded rockfish *Sebastes inermis*. *Ocean and Polar Research*, 31(3), 231-238.
- Oh, S. Y., Jang, Y. S., Park, H. S., Choi, Y. U., & Kim, C. K. (2012). The Influence of Water Temperature and Body Weight on Metabolic Rate of Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*. *Ocean and Polar Research*, 34(1), 93-99.
- Oh, S. Y., Jang, Y. S., Noh, C. H., Choi, H. J., Myoung, J. G., & Kim, C. K. (2009). Effect of water temperature on ammonia excretion of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus*. *Korean Journal of Ichthyology*, 21(1), 1-6.
- Person-Le Ruyet, J., Chartois, H., & Quemener, L. (1995). Comparative

- acute ammonia toxicity in marine fish and plasma ammonia response. *Aquaculture*, 136(1-2), 181-194.
- Priestley, S. M., Stevenson, A. E., & Alexander, L. G. (2006). The influence of feeding frequency on growth and body condition of the common goldfish (*Carassius auratus*). *The Journal of nutrition*, 136(7), 1979S-1981S.
- Randall, D. J., & Tsui, T. K. N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine pollution bulletin*, 45(1-12), 17-23.
- Rurangwa, E., & Verdegem, M. C. (2015). Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. *Reviews in aquaculture*, 7(2), 117-130.
- Riche, M., Haley, D. I., Oetker, M., Garbrecht, S., & Garling, D. L. (2004). Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*, 234(1-4), 657-673.
- Ruohonen, K., Vielma, J., & Grove, D. J. (1998). Effects of feeding frequency on growth and food utilisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low-fat herring or dry pellets. *Aquaculture*, 165(1-2), 111-121.
- Tchobanoglous, G., & Schroeder, E. E. (1985). Water quality: characteristics, modeling, modification.
- 넙치 양식 표준 지침서. 2006. 국립수산물과학원
- 넙치 양식 표준 매뉴얼, 2016, 국립수산물과학원
- 박정환. (2018). 순환여과양식 시스템의 구성 및 생물생산 요소 설계 방안. *한국수산물과학회 양식분과 학술대회*, 356-356.