

Development of an Oxygen Supply Control Model for Recirculating Aquaculture Systems Based on Mass Balance Equations

Geonwoo Park[†] · Sangyeon Lee^{††} · Jaeyoung Jung^{†††} ·
Sengkyoun Jo^{††††} · Woonjung Kim^{†††††} · Hakjong Shin^{††††††}

ABSTRACT

This study proposes a simulation framework to reproduce dissolved oxygen (DO) dynamics in flow-through aquaculture systems and evaluate oxygen supply control strategies. A DO mass balance model based on a CSTR(Continuous Stirred-Tank Reactor) assumption was developed for two 40 ton tanks in a commercial aquaculture facility. The oxygen consumption rate, representing fish metabolism and other factors, was treated as a system variable and inversely estimated from measured DO time series using 1 minute observations of DO, water temperature, salinity, flow rate, oxygen supply, biomass, and feeding data. The reconstructed DO showed strong agreement with observations, with mean absolute errors(MAE) of 0.099 mg/L and 0.249 mg/L and mean absolute percentage errors(MAPE) of 0.992% and 2.245% for the two tanks, confirming that the model captures DO fluctuations at operational time scales. Analysis of the inferred consumption patterns indicated elevated oxygen demand 1-3 hours after feeding and a relatively stable baseline demand during nighttime, with consumption levels and variability changing under different operating conditions. Based on these results, oxygen supply control scenarios were simulated to assess DO stability, control frequency, and the potential for oversupply. The proposed simulator and estimated consumption profiles provide a virtual test environment for designing and validating PID and model predictive control strategies and for developing oxygen demand prediction models in smart aquaculture systems.

Keywords : Flow-Through Aquaculture System, Control, Mass-Balance, Dissolved Oxygen

질량수지 방정식 기반 유수식 양식 시스템 산소 공급 제어 모델 개발

박 건 우[†] · 이 상 연^{††} · 정 재 영^{†††} · 조 성 균^{††††} · 김 운 중^{†††††} · 신 학 종^{††††††}

요 약

본 연구는 유수식 양식 시스템에서 용존산소(DO)의 동역학을 정량적으로 재현하고, 산소 공급 제어 전략을 평가하기 위한 데이터 기반 시뮬레이션 프레임워크를 제안한다. 실제 양식장의 40톤 규모 수조 2개를 대상으로 연속 완전혼합 반응기(CSTR) 가정에 기반한 DO 질량수지 모델을 구축하고, 어류 대사와 기타 요인을 포함하는 산소 소비율을 시스템 변수로 정의하였다. DO, 수온, 염도, 유량, 산소 공급량을 1분 간격으로 수집하고, 생체량 및 급이 데이터를 결합하여 실측 DO 시계열로부터 시간에 따라 변하는 산소 소비율을 역산하였다. 재구성된 DO는 실측값과 높은 일치도를 보였으며, 두 수조에서 평균 절대 오차(MAE) 0.099 mg/L와 0.249 mg/L, 평균 절대 백분율 오차(MAPE) 0.992%, 2.245%의 정확도를 나타내어 제안된 모델이 운전 시간 스케일에서 DO 변화를 적절히 묘사함을 확인하였다. 산소 소비 패턴 분석 결과, 급이 이후 1-3시간 동안 소비량이 증가하고 야간에는 비교적 안정적인 기준 수요가 유지되는 특성이 관찰되었으며, 운영 조건 변화에 따라 소비 수준과 변동성이 달라지는 경향이 나타났다. 이를 바탕으로 산소 공급 제어 시나리오를 시뮬레이션하여 DO 안정성, 제어 빈도 및 과다 공급 가능성을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 시뮬레이터와 소비율 추정 결과는 향후 PID 및 모델 예측 제어 기법의 설계·검증을 위한 가상 시험 환경으로 활용될 수 있으며, 스마트 양식 시스템에서 데이터 기반 산소 수요 예측 모델 개발을 위한 기초 자료를 제공한다.

키워드 : 유수식, 제어, 질량수지, 용존산소

※ 본 결과물은 2025년도 교육부 및 대전광역시 지원으로 대전RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2025-RISE-06-013).

† 정 회 원 : 한국전자통신연구원 위촉연구원

†† 비 회 원 : 한국전자통신연구원 선임연구원

††† 비 회 원 : 한국전자통신연구원 책임연구원

†††† 비 회 원 : 한국전자통신연구원 농축해양수산지능연구센터장

††††† 비 회 원 : 한남대학교 화학과 교수

†††††† 정 회 원 : 한국전자통신연구원 선임연구원

Manuscript Received : December 11, 2025

Accepted : January 23, 2026

*Corresponding Author : Hakjong Shin(hakjong@etri.re.kr)

1. 서 론

인구 증가 및 기후 변화로 인해 식량 안보에 대한 문제가 대두되면서 양식업은 인류에게 중요한 단백질원을 공급해주는 산업으로 주목받고 있다. 2022년 기준 양식업은 약 1억 3,090만 톤에 달했으며 이중 약 9,440만 톤이 수생동물로, 약 9,100만 톤의 수생동물 생산량을 기록한 어업에 비해 더 많은 수산생물 생산량을 기록하였다[1]. 이는 전 세계적인 수산물 수요의 증가를 충족시키는데 양식업이 기여할 수 있음을 나타낸다. 따라서 양식업의 성장은 지속 가능성을 우선적으로 고려하여, 균형 있는 발전을 도모하고 수산물 수요 지역에 실질적인 이익을 제공하는 방향으로 이루어져야 한다.

최근에는 양식업에도 지속 가능한 생산성 및 에너지 효율성의 향상을 위하여 자동화 및 제어 기술이 도입되고 있다. 특히 유수식 양식업은 가장 흔한 양식 생산 시스템 중 하나이며, 그 특징 때문에 자동화 및 제어 기술이 필요한 양식법이다. 유수식 양식법은 지속적으로 많은 물을 펌프로 들여오고 다시 배출하는 원리를 가지고 있다. 이러한 유수식 양식 시스템은 외부 유입수를 그대로 들여와 사용하기 때문에 수질 제어가 상대적으로 어려우며, 특히 용존산소량(Dissolved oxygen, DO)의 조절이 필수적이다. DO는 어류의 생존에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나로, 어류의 성장률과 사료 섭취 효율뿐만 아니라 생리적 안정성을 유지하는데도 영향을 준다[2]. DO는 수온, 염도 등 수질 요인과 어류의 생체량, 산소 소비율 등 생물학적 요인, 수조의 크기, 유량 등 시스템적 요인, 사료 공급량과 같은 외부 요인들 까지 다양한 요소들에 의해 영향을 받고 실시간으로 변화한다. 이 때문에 대부분의 양식장에서는 DO의 조절에 신경을 쓰고 있으며 그 때문에 액화 산소나 산소발생기를 이용하여 수조 내 DO 농도를 조절하고 있다. 하지만 대부분의 양식장에서는 안정성을 우려하여 조절 시스템을 두지 않고 산소를 지속적으로 공급하는 방식을 채택하고 있다. 이러한 방식은 에너지 측면에서 비효율적이며, 만약 센서 기반 제어 장치를 도입할 경우 에너지 효율을 향상시킬 수 있다.[3]. 따라서 양식업의 지속 가능한 생산 및 에너지 효율성의 향상을 위해서 자동화 및 제어 기술이 필요한 상황이다. 스마트양식으로 대표되는 자동화 및 제어 기술과 같은 지능형 기술들은 양식업 내에서 노동력을 줄이고 생산성을 향상시킬 수 있어서 큰 이익을 가져다 줄 수 있다[4]. 일부 양식장에서는 이를 도입하여 사용하고 있으며 수온, DO, pH 등 주요 수질 인자의 임계값을 설정하고 이를 기준으로 농도나 공급량을 조절한다.

하지만 이러한 시스템은 운영 난이도가 높고, 에너지 소비 및 운영비용 증가 또한 발생할 수 있다. 즉 제어 시스템을 도입하되, 효율적으로 운영을 할 수 있도록 해야 한다. 현재 제어 기술을 도입한 양식장에서는 대부분 on/off 제어 방식을 사용하고 있다. On/off 제어는 구조가 단순하고 운영 난이도가 낮아서 많이 애용되고 있는 제어 방식으로, 기준값

(threshold)을 중심으로 작동여부를 결정한다.

본 논문에서는 유수식 양식 시스템 내에서 측정된 실제 DO 데이터를 활용하여, 일정 기준값에 따라 산소 제어 장치가 작동 및 중단되는 제어 알고리즘을 구현하고 그 거동을 시뮬레이션해서 그래프로 표현하였다. 생물, 수질 등 외부 요인에 따른 DO의 변동 특성과 제어 패턴을 분석함으로써 on/off 제어로 인해 실제 DO의 변화에 미치는 영향을 평가하였다.

본 연구의 목적은 실측 데이터를 바탕으로 On/Off 제어 시나리오에서의 DO 응답 특성을 모사하고, 제어 민감도와 시스템 반응 특성을 비교함으로써 향후 정교한 제어기법인 PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어나 모델 예측 제어 (Model Predictive Control, MPC)을 적용하기 위한 기초 모델을 제시하는 데 있다. 이를 통해 기초 데이터를 확보하고, 단순한 경험적 제어에 의존하던 기존 유수식 양식 시스템 관리에서, 데이터 기반 제어 모델로의 전환 가능성을 검토하는 시발점으로서 의의를 가진다.

2. 실험 방법

2.1 시스템 개요

본 연구에 사용된 시스템은 전라남도 해남군 송지면에 위치한 유수식 양식장의 2개 수조이다(Fig. 1). 각 수조는 콘크리트 재질의 40t 규모였으며 유입수는 전처리를 통해 공급되었으며 산소콘을 통해 산소가 공급되었다. 또한 수조 내부의 수질을 측정하기 위해 수온, 염도, DO 센서를 설치하였으며 산소콘에 공급되는 관에도 산소 유량계를 설치하였다. DO 제어는 기본 공급선과 추가 제어선 총 2가지 라인을 통해 산소를 공급하는 구조를 사용하였으며, 제어선은 수조 내 DO 기준값에 따라 개폐 여부가 결정되었다. 수조의 회전수는 일간 10회전이었다.

2.2 데이터 수집 및 전처리

본 연구에 사용된 데이터의 기간은 2025년 10월 23일부터 2025년 11월 09일까지였다. 수집된 데이터는 크게 사육 데이터, 수질 데이터, 유량 제어 데이터들로 구성되었다. 사육 데이터에는 어류 개체수(Fish_number), 어류 개체무게(Fish_weight),



Fig. 1. Testbed utilized in the experiment

일일 사료 급여량(Feed_amount), 사료 급여 시간(Feed_time) 등 어류 생체와 관련된 데이터들이 포함되었으며 이들은 일일 단위로 수집되었다(Date). 수질 데이터에는 수조 내 DO (Tank_DO), 수온(Temp), 유입수 DO(IN_DO), 염도(Salinity) 등 시스템 내 수질에 관한 데이터가 포함되었다. 산소 유량 제어 데이터에는 각 수조별 상시 공급되는 산소 유량 데이터(NOR_DO)와 제어 여부에 따라 추가로 공급되는 산소 유량 데이터(REG_DO)가 포함되었다. 여기에 실제 환경에 맞게 시뮬레이션을 적용할 수 있도록 수조의 크기, 회전수 등 시스템의 정보에 대한 값을 input data로 추가하였다. 사육 데이터 중 일일 사료 급여량 및 급여 시간, 급여 횟수는 일일 간격으로 기록 및 수집되었다. 어류 개체수와 어류 개체 무게는 1달에 2번 각 수조마다 50 마리를 샘플링하여 기록하였으며 폐사체는 매일 기록 및 수집하였다. 수질 데이터와 산소 유량 제어 데이터들은 수조에 설치된 센서를 통해 1분 간격으로 측정 및 수집되었다(Date_time). Fig. 2에서 x축은 날짜를 나타내며 y축은 각각 DO, 수온, 산소의 포화도를 나타낸다. 검은색 선은 DO를, 초록색 선은 수온을 나타내며 주황색 그에 따른 산소의 포화도를 나타내었다. 여기에서 보이듯 유수식 양식은 시간의 흐름에 따라 수온의 변화가 상당히 급격해지며 DO에도 영향을 미쳤다. 수조에 공급되는 산소는 액화 산소를 사용하였으며 산소콘에 라인을 연결하여 수조에 공급하는 방식을 취하였다. 이때 산소콘에 연결된 관에 설치된 유량계를 통해 산소 유량 데이터를 수집하였으며 1분 간격으로 제어 여부 및 공급되는 유량을 확인 및 수집하였다(Date_time).

모든 데이터는 CSV 형식으로 정리되었으며 수질 데이터 및 유량 제어 데이터 수집 중 발생한 결측치는 선형 보간을 통해 보정하였다. 최종 사용된 dataset은 각 수조당 3개의 CSV 파일로 구성되어 총 6개의 dataset이 사용되었다. 수조 1 시뮬레이션에 사용된 dataset 중 1분 간격으로 수집된 수질 및 산소 유량 제어 데이터는 24,308개의 시간 관측치(row)와 6개의 변수(feature)로 구성되어 있었다. 수조 2 시뮬레이션에 사용된 dataset 중 1분 간격으로 수집된 수질 및 산소 유량 제어 데이터는 24,267개의 시간 관측치(row)와 6개의 변수로 구성되어 있었다. 각 사육 데이터는 5개의 변수로 구성되어 있었으며 18개의 일일 관측치를(row) 수질 및 산소 유량 dataset에 합병 및 정렬하여 사용되었다. 시스템에 대한 정보인 수조의 크기와 회전수는 고정값으로 사용되었다. 사육 데이터 중 2주 간격 사이에 빈 어류 개체 무게는 TGC(Thermal Growth Coefficient) 방정식을 사용하여 결측치를 보간하였

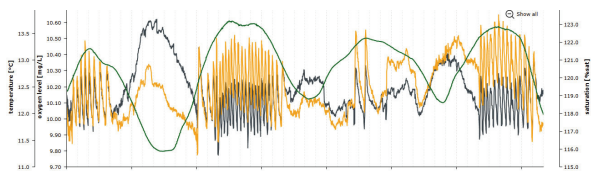


Fig. 2. Water quality data

다. 일일 단위로 수집된 사육 데이터 중 개체수와 개체 무게 데이터는 각 날짜 동안 값이 일정한 것으로 가정하여 1분 간격 데이터로 확장 및 병합하여 최종 분석용 dataset을 구성하였다. 급여 시간 및 급여량 데이터는 실제로 급여한 시간과 수질 및 산소 유량 데이터의 시간과 일치하는 시점에 적용 및 병합하여 사용되었다. 각 수조의 수질 dataset 중 DO 변수에서 센서 이상으로 인해 각각 213개, 172개의 이상치가 발생하였으며, 각각 0.87%, 0.70%의 이상치가 발생하였다. 데이터 전처리 중 발생한 이상치는 IQR 방식을 이용하여 분류 및 제거하였다.

2.3 시뮬레이션 구조

본 시뮬레이션의 모델은 기본적으로 CSTR(Continuous Stirred-Tank Reactor) 기반의 질량수지 방정식을 기본으로 하며, 이를 수조 내 DO 질량수지 방정식으로 변경하여 사용하였다. CSTR 질량수지 방정식은 완전혼합을 가정한 상태로 공간적으로 균일한 농도 $C(t)$ 하나로 시스템을 표현한다. 또한 유입과 유출 개념을 설정하여 실제 양식장에서 수조 내 유입수와 배출수의 유량에 따라 DO의 변화를 고려할 수 있는 요소로 작용하였다. 이러한 요소들과 더불어 CSTR은 직관적이며 실제 양식장 수조에서 교반되는 DO 형태를 파악하기에 사용하기 좋다는 장점 덕분에 수조 내 DO 시뮬레이션을 진행할 때 기본 방정식으로 많이 사용된다[5].

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{in} - C) + r(C, t) \tag{1}$$

수조 내 DO(mg/L)를 $DO(t)$, 부피를 $V(L)$ 라고 하였을 때, 이 방정식의 매커니즘은 다음과 같으며, 일반적으로 DO 질량수지식에서 많이 사용되는 매커니즘이다[6].

$$\begin{aligned} &(\text{수조 내 DO 변화율}) = (\text{유입 되는 산소}) - (\text{소비 되는 산소}) \\ &+ (\text{유입 및 유출로 인해 변화하는 DO}) \end{aligned}$$

즉 부피가 V 인 수조에서 수조 내 산소 공급량 O_{sup} 에서 수조 내 산소 소비량 O_{con} 을 뺀 값과 시간에 따라 변할 수 있는 DO 교환 속도 상수 $k_{ex}(t)$ 를 가지는 외부 유입수와의 1차 DO 교환 항의 값들을 더한 결과로, 이를 바탕으로 만들어진 방정

Table 1. Collected data

Water_data	Flow_data	Growth_data
Date_time	Date_time	Date
Tank_DO	NOR_DO	Fish_number
IN_DO	REG_DO	Fish_weight
Temp	•	Feed_amount
Salinity	•	Feed_time

식은 DO의 시간적 변화($\frac{dDO}{dt}$)를 계산하는 동적 모델 방정식이다.

$$\frac{dDO}{dt} = \frac{O_{sup}(t) - O_{con}(t)}{V} + k_{ex}(t) (DO_{in}(t) - DO(t)) \quad (2)$$

유수식 시스템 내에서 산소를 소비하는 경우는 어류의 활동으로 인한 경우와 미생물의 활동으로 인한 경우 등 다양한 경우가 존재한다. 하지만 어류의 활동을 제외한 나머지 경우는 전체 시스템에 미치는 영향이 크지 않기 때문에 산소 소비항에 들어가는 파라미터는 어류의 활동으로 인한 경우만을 포함하였다. 본 연구에서는 모델 단순화를 위해 산소 소비를 어류 활동 중심으로 구성하여 어류의 개체당 산소 소비량을 r_{base} 라고 하고, 여기에 영향을 주는 요인들을 곱연산으로 하여 방정식을 설정하였다. 단 이후 모델링에 포함되지 않은 일부 소비 요인들을 포함하는 소비율인 $r_{base}(t)$ 로 재정의하여 역산하였다. 유수식 시스템에서 산소 소비는 주로 사료 투입량(f_{feed})과 생체량(B) 등에 좌우되며[7] 어류는 사료를 급이할 때 산소 소비량이 급격히 증가한다. 또한 수온(T)에 따라 대사효율이 달라지며[8] 이때 이에 따른 산소 소비 변수 값을 설정할 수 있다(f_T). 따라서 이들에 대한 조건도 포함하여 다음과 같은 산소 소비 방정식을 설정하였다.

$$O_{con}(t) = B(t) \cdot r_{base} \cdot f_T(T(t)) \cdot f_{feed}(t) \quad (3)$$

본 연구의 목적 중 하나는 수조에서 실제로 요구되었던 산소 소비율을 시간에 따라 역산하여, 급이량, 수온, 유량 등의 상태 변수에 따른 DO 수요 패턴을 정량화 하는 것이다. 이를 위해 DO 질량수지 방정식을 기반으로 한 모델을 사용하고, 공급 및 혼합 항은 실측 데이터로부터 계산된 항으로, 소비 항은 미지의 항으로 취급하여 매 시각마다 역산하였다.

이때 Equation(2)을 이산 시간 Δt 에서 전진 오일러(Explicit Euler)방식으로 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\frac{DO(t + \Delta t) - DO(t)}{\Delta t} \approx \frac{O_{sup}(t) - O_{con}(t)}{V} + k_{ex}(t) (DO_{in}(t) - DO(t)) \quad (4)$$

이를 $O_{con}(t)$ 에 대해 풀면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$O_{con}(t) = O_{sup}(t) + V \left[k_{ex}(t) (DO_{in}(t) - DO(t)) - \frac{DO(t + \Delta t) - DO(t)}{\Delta t} \right] \quad (5)$$

본 연구에서는 $DO(t)$, $DO(t + \Delta t)$ 에 실측 DO를 사용하여 위의 식으로부터 각 시점의 $O_{con}(t)$ 를 먼저 역산하였다. 그 다음 Equation(3)을 다시 정리하여 다음과 같은 형태로 $r_{base}(t)$ 를 계산하였다.

$$r_{base}(t) = \frac{O_{con}(t)}{B(t)f_T(T(t))f_{feed}(t)} \quad (6)$$

즉 Equation(2),(3),(4),(5)식을 통해 질량 수지가 성립하도록 하는 총 소비량 $O_{con}(t)$ 를 먼저 구하고 이를 Equation(6)에 대입함으로써 생체량, 수온, 급이 조건을 보정한 후의 역산된 기준 산소 소비율을 얻는 구조다. 이때 역산과정에서 발생할 수 있는 비물리적인 값을 방지하기 위해 $O_{con}(t)$ 는 항상 0이상이라고 가정하였고, 비현실적으로 큰 값은 상한을 설정하여 클리핑 하였다. 이후 결과 분석에서는 개별 시점의 절대값보단 $r_{base}(t)$ 의 시간적 패턴과 상태 의존성에 초점을 맞춰 해석하였다.

3. 모델 구현 및 분석

본 실험에서 사용된 시뮬레이션은 Python 3.11 환경에서 구현되었다. 데이터 전처리와 수치 계산은 Numpy와 Pandas를 이용하여 수행되었으며 시각화는 Matplotlib를 사용하였다. 또한 연속된 측정 시각의 차이를 이용하되, 1~2분 범위의 정수값으로 제한하여 수치 안정성을 확보하였다. 그리고 첫 시각의 DO는 실측 DO로 설정하였고 교환계수 $k_{ex}(t)$ 는 일간 10회전을 기준으로 하여 계산하고, 시동 초기에는 0에서 목표값까지 선형적으로 증가하도록 스케일링하였다. 전체 과정은 실측 DO 투입 후 $O_{con}(t)$ 을 역산하여 $r_{base}(t)$ 를 계산한 뒤 DO를 재구성하는 순서로 진행되었으며 이때 DO 재구성 결과는 질량수지 모델과 역산 절차가 일관성을 가지는지 검증하

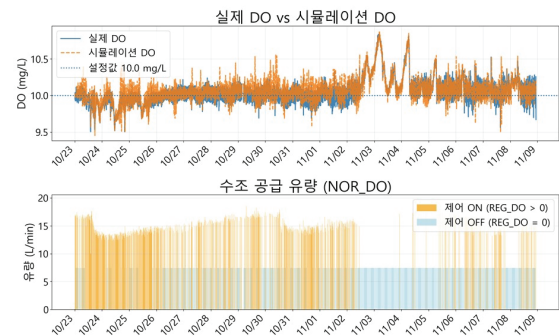


Fig. 3. Experimental Tank 1

Table 2. Simulation results in Tank 1

Evaluation metrics	Value
MAE(mg/L)	0.099
RMSE(mg/L)	0.132
MAPE(%)	0.992
Mean_Real_DO(mg/L)	10.05
Mean_Sim_DO(mg/L)	10.08
Data_Points	24207

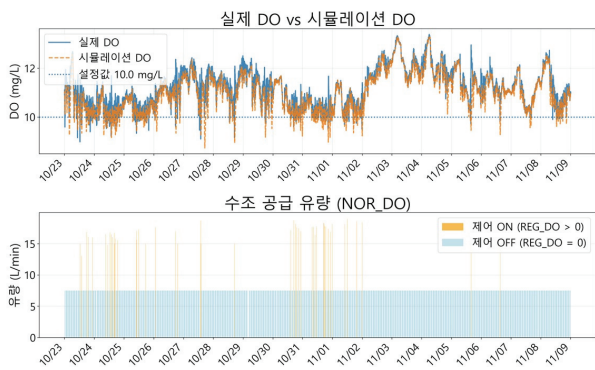


Fig. 4. Experimental Tank 2

Table 3. Simulation results in Tank 2

Evaluation metrics	Value
MAE(mg/L)	0.249
RMSE(mg/L)	0.416
MAPE(%)	2.245
Mean_Real_DO(mg/L)	11.18
Mean_Sim_DO(mg/L)	10.98
Data_Points	24267

는 지표로 사용된다. 최종적으로 DO의 공급 및 소비 정도와 수조 내에서 DO가 교환되는 정도를 계산하여 결과를 시계열로 저장해 그래프화 하였다.

시뮬레이션을 통해 나온 DO와 실제 DO를 비교한 결과, 분석 기간 전체에 걸쳐 설정값 10 mg/L 주변의 변동 패턴을 전반적으로 잘 재현하였다(Fig. 3, Fig. 4) 평상시 운전 구간에서 두 곡선의 차이는 대부분 0.3 mg/L 이내였으며, 급격한 유량 변화 및 급이 직후 일부 구간에서 상대적으로 큰 오차가 관찰되었다. Fig. 3은 수조 1번 데이터를 기반으로 한 시뮬레이션 결과이다. 전체 기간에 대한 평균 절대 오차(MAE)는 약 0.099 mg/L, 평균 제곱근 오차(RMSE)는 0.132 mg/L, 평균 상대오차(MAPE)는 약 0.992% 수준이었다. Fig. 4는 수조 2번 데이터를 기반으로 한 시뮬레이션 결과이다. 전체 기간에 대한 평균 절대 오차(MAE)는 약 0.249 mg/L, 평균 제곱근 오차(RMSE)는

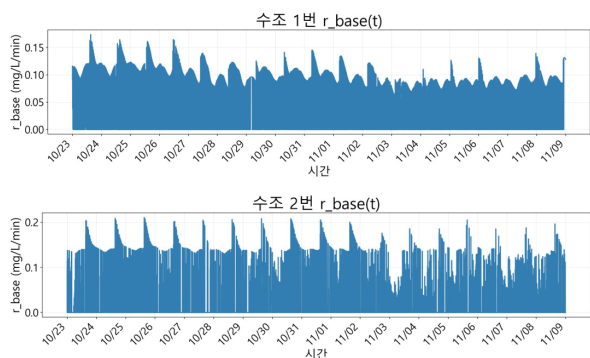


Fig. 5. $r_{base}(t)$ of Experimental Tank

0.416 mg/L, 평균 절대 백분율 오차(MAPE)는 약 2.245% 수준이었다.

Fig. 5는 수조 1번과 2번에서의 어류의 $r_{base}(t)$ 를 나타낸 결과다. 그 결과 급이 직후 1~3시간 동안 산소 소비량이 뚜렷하게 증가한 뒤 점진적으로 감소하였다. 이는 급이 후 활동성 및 대사량 증가가 수조 내 DO 수요에 반영된 결과로 해석된다. 또한 특정 일에서 유량 조정 및 급이 패턴에 변화가 있었던 구간은 $r_{base}(t)$ 의 평균 수준이나 변동성이 눈에 띄게 달라졌으며, 이는 유효 소비율이 생체량뿐 아니라 운영 상태의 영향을 함께 반영하고 있음을 알 수 있다. 그리고 야간 시간대에는 유량 변동이 상대적으로 적음에도 불구하고 r_{base} 가 일정 수준 이상 유지되는 경향이 관찰되었는데, 이는 저온·정온 조건에서도 기본적인 유지 대사가 지속된다는 생리학적 사실과 일치한다. 이러한 결과는 $r_{base}(t)$ 가 단순한 피팅 파라미터가 아니라, 실제 시스템의 대사 패턴을 반영하는 유용한 관찰량으로 사용될 수 있음을 시사한다. 그리고 역산과정에서 공급 및 교환 항에 필터링을 거쳐 노이즈를 최소화하고 $O_{con}(t)$ 에 하한과 상한을 적용하였는데 이는 오버피팅(overfitting)을 위한 것이 아닌 측정 데이터와 모델 구조가 허용하는 범위 내에서 최대한 안정적인 $r_{base}(t)$ 을 얻기 위한 장치였다.

이렇게 얻은 $r_{base}(t)$ 는 추후 데이터 기반 소비율 예측 모델의 학습 타깃으로 활용될 수 있다. 예를 들어 입력 변수로 수온, 염도, 생체량, 사료 급이량, 유량, 제어 상태 등을 사용하고 출력으로 $r_{base}(t)$ 를 예측하는 회귀 모델을 학습한다면 실제 DO를 사용하지 않고도 상태 변수를 통해 소비율을 실시간으로 추정하는 모델을 구축할 수 있다.

$r_{base}(t)$ 는 향후 PID 제어기 설계에 직접적인 시사점을 제공한다. 예를 들어, 특정 시간대 또는 운영 조건에서 r_{base} 가 평상시 대비 일관되게 높은 수준을 보이는 경우, 이는 해당 구간이 구조적으로 DO 부족에 취약한 구간임을 의미하며, 이때 PID 제어기의 이득을 국소적으로 증대시키거나, feed-forward 제어 항을 추가하는 것이 필요할 수 있다. 반대로 r_{base} 의 변동성이 매우 큰 구간은 제어기 입장에서 “예측이 어려운 고변동 부하”에 해당하므로, 이 구간에서는 P·D 이득을 과도하게 키우는 것이 오히려 DO 진동을 키울 위험이 있다.

실제 PID 튜닝 과정에서, 본 연구의 DO 시뮬레이터를 가상 플랜트로 두고, $r_{base}(t)$ 의 통계적 특성이 잘 반영된 여러 시나리오를 선택한 뒤, 각 시나리오에서 overshooting, 제어 신호 변동성 등 페루프 응답들을 평가하는 접근이 가능하다. 즉, $r_{base}(t)$ 는 단지 모델 보정을 위한 값이 아니라, PID 제어기의 성능을 검증해야 할 대표 부하 케이스를 정의하는 데 필요한 기준 정보로 활용될 수 있다.

또한 $r_{base}(t)$ 는 수온, 생체량, 급이량 등 다양한 상태 변수의 함수로 볼 수 있는 실질적 산소 소비율 시계열이므로, $r_{base}(t)$ 를 외란(disturbance)이나 부하(load)로 해석 시 향후

MPC 제어 설계 시에 매우 중요한 역할을 할 수 있다. DO 동역학 모델을 이산 시간 모형으로 정리 후, $r_{base}(t)$ 를 다른 변수들로부터 예측하는 보조 모델과 결합 시, MPC를 통해 일정 시간 구간에 대한 DO 변화를 예측하면서 더 적은 양을 효율적으로 사용하여 설정값을 유지할 수 있는 최적 제어 입력을 계산할 수 있다.

4. 연구 한계 및 향후 연구

본 연구에서 사용된 제어 방법은 on/off 제어방법으로, 이 방법 만으로도 설정 DO 농도 자체를 유지하는 데에는 큰 무리가 없었으며, 수온 변동과 공급 유량 변화에 따라 DO가 목표치로 복귀하는 속도, 제어가 반복되는 주기, 안정적으로 유지되는 DO 범위 등이 실제 양식 시스템의 제어 전략을 설계할 때 중요한 설계 변수로 작용함을 확인하였다.

그러나 $r_{base}(t)$ 를 역산하여 시뮬레이션을 진행한 본 연구의 경우 실제 데이터가 없으면 $r_{base}(t)$ 데이터 수집이 불가능하다는 단점이 있다. 다음 시점의 실측 DO에 의해 결정되는 후향적 추정치로서, 실측 데이터가 존재하지 않는 구간이나 신규 시스템에 대해서는 활용되기 어렵다. 따라서 본 연구는 현장 데이터가 존재하는 기간의 재현 및 외란 구조 분석에는 유효하나, 향후 PID 및 최적 제어 적용을 위해서는 더 긴 기간동안 얻은 데이터를 기반으로 전향적 연구로의 확장이 필요하다.

또한 on/off 제어는 구조적으로 이산적인 동작 특성을 가지기 때문에 기준값 주변에서 스위칭이 과도하게 빈번하게 일어나는 경향이 있고, 어류의 활동 수준이나 외부 유입수 수질이 변할 경우 응답이 불규칙해지는 한계를 보였다. 특정 구간에서는 짧은 시간 안에 과도한 on/off 동작이 집중되면서 밸브 및 블로워 등 제어 장치에 불필요한 부하를 주고, 장비 수명 저하를 초래할 가능성도 있다. 아울러 일부 기간에는 DO가 지속적으로 과다 공급되어 실제 어류가 요구하는 수준을 크게 상회함으로써, 산소 사용량과 운영비 측면에서 비효율을 유발하는 문제도 존재한다.

추후 연구에서는 본 시뮬레이션 모델을 확장하여, PID 제어와 MPC 제어를 적용한 고급 제어기법을 적용할 예정이다. 이를 통해 외란에 대한 적응적 제어, DO 목표치 추종성 향상, 제어 효율 최적화 등의 성능 개선을 목표로 한다. 또한, 실시간 센서 데이터와 연동한 피드백 제어 실험을 수행함으로써, 시뮬레이션 기반 모델의 실제 적용 가능성을 검증할 계획이다. 이러한 연구는 데이터 기반 지능형 제어가 가능한 스마트 양식 시스템 구현의 토대를 마련할 것으로 보인다.

그러기 위해 첫 번째로 $r_{base}(t)$ 를 타깃으로 하는 데이터 기반 소비율 예측 모델을 구축할 예정이다. 입력 변수로 수온, 생체량, 급이량, 산소 유량 등을 사용하여 소비율을 예측하는 모델을 개발함으로써 향후 운영 조건에 따른 산소 수요를 실

시간으로 추정할 수 있을 것이다.

두 번째로 PID 제어 및 MPC 제어 등 좀 더 발전된 제어 모델을 설계할 예정이다. PID의 경우, 수조 모델을 가상 플랜트(virtual plant)로 사용하여 다양한 조합에 대해 DO 안정성, 과도응답, 산소 사용량을 시뮬레이션 상에서 평가함으로써, 현장에 적용 가능한 안전한 튜닝 범위를 제시할 수 있다. MPC는 이보다 더 발전된 제어방법으로서, 예측 지평 동안 DO 궤적과 제어입력을 동시에 최적화하는 제어 전략을 설계할 수 있다. 특히 사료 급이 시각 및 급이량을 사전에 알고 있다는 점을 활용하면, 사료 급이 이후 DO 감소를 사전에 미리 대비하여 공급하는 feedforward-MPC 전략도 가능하다.

본 연구의 최종적인 목표는 DO 동역학을 정량적으로 이해하는 것을 넘어, 이를 기반으로 PID 제어 및 나아가 MPC 기반의 DO 제어 전략을 설계하는 데 있다. 현재 단계에서 구축한 시뮬레이터는 시스템의 DO 응답 특성을 비교적 잘 재현하는 가상 플랜트로 기능하며, 이를 이용하면 실제 양식장에 직접 적용하기 전에 다양한 PID 파라미터 조합을 시뮬레이션 상에서 검증 및 튜닝할 수 있다. 예를 들어, REG_DO를 제어 입력으로 하고 Tank_DO를 피드백 변수로 하는 페루프 구조를 가정할 때, 본 모델은 PID 제어에 따른 과도응답, 안정성, DO 변동성을 사전에 평가하는 실험환경을 제공한다.

즉 본 연구에서 제시한 DO 시뮬레이터와 소비 모듈은 단순한 사후 재현 모델이 아니라, PID 제어 설계와 시나리오 검증 등을 위한 테스트베드, 그리고 MPC용 모델 학습을 위한 데이터 생성기라는 이중적인 역할을 수행한다. 향후 연구에서는 본 모델을 기반으로 실제 제어 루프를 모사하는 페루프 시뮬레이션을 구축하고, 산소 사용량, DO 안정성, 제어 신호 변동성 등 다양한 PID 및 MPC 제어 간의 성능을 비교 평가함으로써, 실제 양식장 운영시에 적용 가능한 구체적인 제어 가이드를 제시할 계획이다.

5. 결 론

본 연구에서는 유수식 양식 시스템 내에서 실제 데이터를 활용하여 DO 질량수지식 (2)과 산소 소비 방정식 (3)를 기반으로 실측 DO 시계열로부터 유효 산소 소비량 $O_{con}(t)$ 와 유효 기준 소비율 $r_{base}(t)$ 를 역산하였다. 그리고 그 결과를 바탕으로 하여 on/off 제어 알고리즘을 적용한 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 확인 및 비교하였다.

본 연구에서 재구성된 DO의 MAPE는 각각 0.992%, 2.245%로 나타났으며, 이는 분 단위 시간 해상도에서 수행된 기존 수치 해석 및 센서 기반 연구에서 보고된 오차 범위 이내의 수준이다[9]. 따라서 본 연구에서 제시한 DO 재구성 정확도는 실무적 분석에 적용 가능한 수준으로 판단된다. 이는 제안된 질량수지 구조가 수조 내 DO 동역학을 합리적으로 설명함을 보여준다. 역산된 $r_{base}(t)$ 는 급이 직후 증가, 야간 안

정 구간, 운영 조건 변화 등 시스템 상태에 따른 뚜렷한 패턴을 보였으며, 이를 통해 수조 수준의 산소 수요가 시간에 따라 어떻게 달라지는지 정량적으로 파악할 수 있었다. $r_{base}(t)$ 는 순수 생리학적 대사율뿐 아니라 미생물, 혼합, 계측 오차 등을 포함하는 시스템 수준의 유효 소비율이지만, 적절한 필터링과 물리적 제약을 통해 신뢰할 수 있는 패턴을 확보하였다. 이로써 본 연구는 DO 제어 및 에너지 효율화 전략 수립을 위한 기초 데이터 생성 단계를 수행한 것으로 볼 수 있다.

References

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), "The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in Action," *Rome: FAO*, 2024.
- [2] K. Pichavant, J. Person-Le-Ruyet, N. Le Bayon, A. Severe, A. Le Roux, and G. Boeuf, "Comparative effects of long-term hypoxia on growth, feeding and oxygen consumption in juvenile turbot and European sea bass," *Journal of Fish Biology*, Vol.59 No.4, pp.875-883, 2001.
- [3] I. M. A. Nugraha and I. G. M. N. Desnanjaya, "Energy efficiency in aeration systems for aquaculture ponds: A comprehensive review," *Jurnal Riset Akuakultur*, Vol.20, No.1, 2025.
- [4] T. T. E. Vo, H. Ko, J. H. Huh, and Y. Kim, "Overview of Smart Aquaculture System: Focusing on Applications of Machine Learning and Computer Vision," *Electronics*, Vol.10, No.22, 2882, 2021.
- [5] X. Zhou, J. Wang, L. Huang, D. Li, and Q. Duan, "Modelling and controlling dissolved oxygen in recirculating aquaculture systems based on mechanism analysis and an adaptive PID controller," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.192, pp.106583, 2022.
- [6] F. Chai, Q. Ge, Y. Yin, D. Li, and Y. Wang, "Modeling and control of dissolved oxygen in recirculating aquaculture systems: A circadian rhythm analysis approach and GSMPC controller," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.227, pp.109515, 2024.
- [7] F. H. Galezan, M. R. Bayati, O. Safari, and A. Rohani, "Modeling oxygen and organic matter concentration in the intensive rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) rearing system," *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.192, article 223, 2020.
- [8] X. Li et al., "Effects of water temperature on growth performance, digestive enzymes activities, and serum indices of juvenile *Coreius guichenoti*," *Journal of Thermal Biology*, Vol.115, pp.103595, 2023.
- [9] G. Yu, S. Zhang, X. Chen, D. Li, W. Li, and Y. Wang,

"Numerical investigations on dissolved oxygen field performance of octagonal culture tank based on computational fluid dynamics," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.218, pp.108189, 2024.



박 건 우

<https://orcid.org/0009-0000-9182-0407>
 e-mail : geonwoo0992@etri.re.kr
 2022년 국립부경대학교 이학사
 2024년 국립부경대학교 수산학석사
 2024년 9월~ 현재 한국전자통신연구원
 위촉연구원

관심분야 : 농축수산, 디지털 트윈, 모델링



이 상 연

<https://orcid.org/0000-0002-2622-8068>
 e-mail : sylee2023@etri.re.kr
 2014년 2월 서울대학교 공학사
 2016년 2월 서울대학교 공학석사
 2021년 8월 서울대학교 공학박사
 2021년 9월~2022년 12월 서울대학교

연구조교수

2023년 1월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 관심분야 : 농축수산 ICT, AI, 스마트팜, 시설환경공학



정 재 영

<https://orcid.org/0000-0002-8266-4972>
 e-mail : jjy72@etri.re.kr
 1999년 경북대학교 전자공학과 학사
 2001년 경북대학교 전자공학과 석사
 2012년 충남대학교 전자공학과 박사
 2001년~ 현재 한국전자통신연구원

책임연구원

관심분야 : 머신러닝, 사물인터넷, 엣지컴퓨팅



조 성 군

<https://orcid.org/0000-0003-2621-419X>
 e-mail : skjo@etri.re.kr
 2004년 2월 한국항공대학교 공학사
 2006년 2월 한국과학기술원 공학석사
 2021년 4월 독일 다름슈타트 공과대학
 공학박사

2006년 2월~현재 한국전자통신연구원

농축해양수산지능연구센터장

관심분야 : ICT 융합, 디지털 트윈, 스마트 팜 등



김 운 중

<https://orcid.org/0000-0003-1787-8939>

e-mail : wjkim@hnu.kr

1999년 2월 한남대학교 이학사

2001년 2월 한남대학교 이학석사

2014년 8월 한남대학교 이학박사

2000년 12월~2015년 3월 동아연필

부설연구소 선임연구원

2015년 4월~현재 한남대학교 화학과 교수

관심분야: 반도체 CMP 소재, 기능성 탄소복합소재, 환경분석,
천연식품 및 화장품 소재



신 학 중

<https://orcid.org/0009-0003-0957-6030>

e-mail : hakjong@etri.re.kr

2018년 2월 서울시립대학교 공학사

2020년 2월 서울시립대학교 공학석사

2023년 8월 서울시립대학교 공학박사

2023년 8월~2025년 7월 한국전자통신

연구원 박사후연구원

2025년 7월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원

관심분야: 건물 에너지, 실내 환경 모델링, 스마트팜, 딥러닝