

순환여과식 양식장의 에너지 사용량 저감을 위한 EHP의 최적 운영

홍장호¹ · 김내경¹ · 구자빈² · 김용목³ · 독고세준⁴ · 조성균⁵ · 곽영훈⁶ · 문선헌^{7†}

¹서울시립대학교 건축공학과, 석사과정

²서울시립대학교 건축공학과, 박사과정

³BD. Inc, 전무이사

⁴BD. Inc, 대표이사

⁵한국전자통신연구원 농축해양수산지능연구센터, 센터장

⁶서울시립대학교 건축학부, 연구교수

⁷서울시립대학교 건축학부, 조교수

Optimal Operation of EHP for Reducing Energy Consumption in Recirculating Aquaculture Systems

Hong Jangho¹ · Kim Naekyung¹ · Goo Jabin² · Kim Yongmok³ · Dokko Sehjoon⁴ · Jo Seng- Kyoun⁵ · Kwak Younghoon⁶ · Mun Sunhye^{7†}

¹Master's Student, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

²Ph.D. Student, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

³Executive Director, BD. Inc.

⁴CEO, BD. Inc.

⁵Director, Agriculture, Animal, Aquaculture & Ocean Intelligence Research Center, Electronic and Telecommunication Research Institute (ETRI)

⁶Research Professor, School of Architecture and Architectural Engineering, University of Seoul

⁷Professor, School of Architecture and Architectural Engineering, University of Seoul

[†]Corresponding author: msh@uos.ac.kr



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.46, No.1, pp.15-24, February 2026
<https://doi.org/10.7836/kjes.2026.46.1.015>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 1 November 2025

Revised: 31 December 2025

Accepted: 4 January 2026

Copyright © 2026 Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

Recirculating aquaculture systems (RAS) have high energy consumption because of the operation of various types of equipment. In particular, in facilities that cultivate warm-water species, boiler loads increase significantly during winter to maintain appropriate water temperatures under low outdoor air conditions. This load can be partially mitigated by heating indoor air through HVAC operations; however, reducing relative humidity increases water evaporation from tanks, and the inflow of replenished groundwater subsequently lowers water temperature, resulting in additional heating demand. Therefore, the energy consumption of aquaculture facilities must be comprehensively analyzed, accounting for both water temperature and indoor air conditions. This study investigates the application and operation of an electric heat pump (EHP) as an energy-saving strategy during winter in a recirculating aquaculture facility. For validation, measurements and verification were conducted by collecting field data on indoor air temperature and humidity, water temperature, dissolved oxygen, and electrical consumption. The calibrated model achieved an MBE accuracy level of -0.37% and a Cv(RMSE) of 11.9% . Based on this validated baseline model, an EHP system was integrated, and optimal operation strategies were derived based on indoor air temperature. This study demonstrated the potential to reduce energy consumption through HVAC applications in indoor aquaculture facilities, which are classified as energy-intensive buildings.

Keywords: 순환여과식 양식장(Recirculating aquaculture systems), 건물 성능 시뮬레이션(Building performance simulation), 전기히트펌프(Electric heat pumps), 최적 제어(Optimal control), 에너지 사용량(Energy consumption)

1. 서론

1.1 연구 배경

최근 육상 양식장 운영 방식 중 순환여과식 방식이 주로 선택되어 운영되고 있다. 이러한 이유는 물을 재사용하지 않는 유수식 방식과 다르게 물을 재사용하는 방식으로, 다른 운영 방식보다 수질 관리에 유리하며 밀집 사육이 가능하기 때문이다. 순환여과식 운영 방식은 국내 양식장 뿐만 아니라 전 세계적으로 많이 확대되고 있으며, The Insight Partners (2025)¹⁾에 따르면 글로벌 순환여과식 양식장의 규모는 2023년 약 51.95달러에서 2031년 90.45억 달러로 성장할 것으로 전망된다. 하지만 수처리를 통해 물을 재사용하기 때문에 양식 어종에 맞는 수질 관리에 많은 설비 기기(여과기, 산소 용해기, 순환펌프, 보일러 등)가 지속적으로 운영되고 있어 에너지를 많이 소비한다는 단점²⁾이 있다. 특히 수온을 유지하기 위한 여러 기기 중 보일러와 같은 설비는 양식장의 전체 에너지 사용량에서 비중을 많이 차지하고 있다. 이러한 많은 에너지 사용량을 절감하기 위해 온실가스 배출량 저감, 에너지 효율화 등과 같은 탄소중립 정책과 환경에 따른 순환여과식의 에너지 효율을 높이는 다양한 연구가 진행되고 있다.

순환여과식 양식장과 관련한 기존 연구에서는 에너지 효율을 높이기 위해 보일러와 수처리 기기의 방식을 바꾸거나 효율을 높이고, 신재생 에너지를 결합하는 등의 에너지 사용량 저감 방식이 많이 연구되었다. Ayuso-Virgili et al. (2023)³⁾은 연어 양식장을 모델링하여 에너지 항목별 세부 비중을 파악하고, 재순환 유량을 최적화하여 약 8%의 에너지 절감량을 확인했다. Zhang et al. (2024)⁴⁾은 순환여과식 양식장에 부합한 에너지 시스템(재생에너지 통합, 하이브리드 에너지 시스템)의 설계 및 운전 최적화를 제안했다. 설계 시나리오(재생에너지 용량, 저장시스템 용량 등) 및 운영 전략(부하 시프트, 재생에너지 활용 시점 등)을 변수로 두고 최적화를 진행한 모델을 적용하여 약 7%의 에너지 비용 절감을 달성했다. Goo et al. (2023)⁵⁾은 육상 양식장 시스템의 에너지 소비 현황을 파악하고 소비 패턴을 분석하여 에너지 수요를 줄이는 것이 중요하다고 강조했다. 또한 기존 연구는 수학적 모델링으로 정적 분석에 중점을 두어 동적 분석이 불가능하였기에, 동적 분석을 수행할 수 있는 건물 시뮬레이션 도구(EnergyPlus)를 활용하여 실내 양식장의 열 모델을 개발하였다.

위와 같은 순환여과식 시스템 자체의 장비 효율 향상, 양식장의 단열 성능 효과 향상 등의 방법은 이미 구축된 양식장에 적용이 쉽지 않다는 한계가 존재한다. 그렇기에 순환여과식의 설비 기기의 효율과 단열 성능을 높이는 방법을 넘어 양식장의 새로운 에너지 저감 방안이 요구되고 있다.

양식장의 새로운 에너지 저감 방안은 순환여과식 양식장과 가장 비슷한 용도인 수영장에서 찾아 볼 수 있다. Ribeiro et al. (2010)⁶⁾, Ribeiro et al. (2014)⁷⁾에 따르면, 수영장에서의 증발이 에너지 손실의 주된 원인이며, 증발 과정에서 수영장 물에 의한 열 흡수가 일어나 물의 온도가 낮아지므로 더 많은 가열이 필요하다고 분석했다.

이와 같은 에너지 손실을 막기 위해 HVAC 제어 방안을 도출하였으며, 기존 대비 약 7%의 에너지 효율이 증가한 것을 확인할 수 있다. 이 사례와 같이 HVAC 최적 제어를 통한 에너지 저감 방안을 본 연구의 대상 양식장에 적용하여 새로운 에너지 저감 방안으로써의 가능성을 검토하고자 한다.

순환여과식 양식장의 새로운 에너지 저감 방안으로써 기존 설비의 최적 운영은 일반적인 건축물과 달리 다양한 조건들을 고려하여 제시되어야 한다. 예를 들어 겨울철 공조를 할 경우, 물의 증발 에너지 손실량이 줄어들어 수온이 안정화됨에 따라 보일러의 급가동을 억제할 수 있고, 이에 따라 보일러의 피크 부하 감소 등 운영 효율의 개선을 기대할 수 있다. 반면에, 높은 실내 공기 온도에 의해 상대습도가 감소하게 되어, 수조의 증발량도 함께 증가하게 된다. 이와 같은 증발량의 증가는 수조의 수위가 낮아지게 만들고, 이에 따른 수위 보전을 위해 지하수가 보충되게 된다. 지하수의 온도는 수조의 온도보다 낮으므로, 수조의 온도를 높이기 위해 보일러가 운영되며 양식장 전체 에너지 사용량이 증가할 수 있다. 즉 양식장의 공조시스템 최적 운영은 실내 환경조건과 수조의 상황을 고려하여 에너지 검토가 선행되어야 한다.

1.2 연구 목표 및 방법

본 연구에서는 순환여과식 양식장에 공조용 EHP 최적 운영을 검토하였으며, 공조기기의 설정 온도에 따른 에너지 사용량과 이 때의 수온 제어용 설비의 에너지 사용량 변화를 함께 고려하여 EHP 최적 운영 방안을 도출하였다. 이를 위해 대상 양식장의 설비 기기들을 파악하고, EnergyPlus를 이용하여 에너지 사용량 예측 모델을 개발하였으며, 실측 데이터로 검증을 진행하였다. 최종적으로 최적화 프로그램인 GenOpt를 활용하여 양식장의 에너지 절감을 위한 설비 운영 최적화 방안을 도출하였다.

2. 에너지 사용량 예측 모델 구축

2.1 대상 건물

본 연구의 대상 양식장은 온수 어종인 뱀장어 양식장으로 26 ~ 28℃의 수온을 일정하게 유지하도록 운영된다. 전체 시설은 Fig. 1과 같이 수처리 기기실, 사무실, 양식장으로 구분되며, 본 연구에서 분석하고자 하는 공간은 양식장이다. 해당 양식장은 50 m × 50 m × 3.5 ~ 5.5 m (W × L × H)의 크기로, 150 mm의 샌드위치 패널과 폴리에스테르 천막으로 이루어진 지붕과 100 mm의 샌드위치 패널인 외벽 200 mm의 콘크리트 바닥 구조이다. 양식장 내부에는 사육을 위한 폴리프로필렌 재질의 원형 수조가 설치되어 있다. 해당 수조는 깊이 1.2 m, 수조 지름 5.2 m, 수조 물량 20톤 규모이며 총 64개가 설치되어 있다.

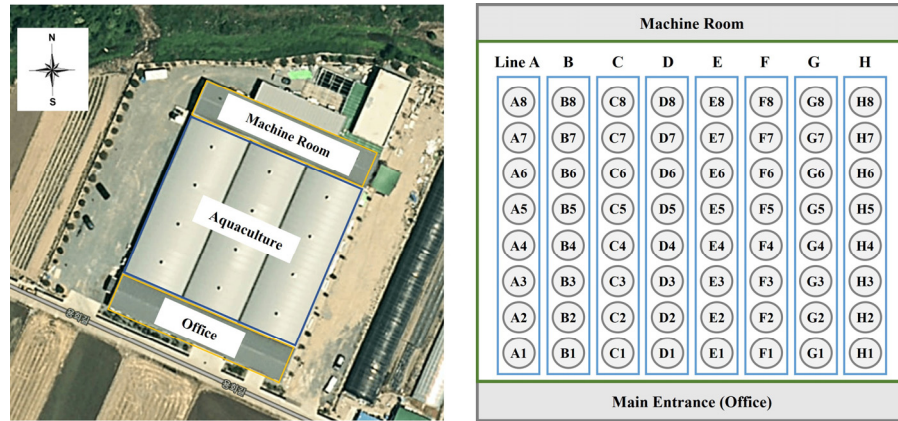


Fig. 1 Floor-Plan-Target Aquaculture Facility

64개의 수조는 8개씩 그룹화되어 총 8개의 Line으로 구성되며, Line 별로 수처리가 진행된다. 대상 양식장은 순환여과식으로 물을 재사용하기 위해 다양한 수처리 설비가 설치되어 있다. 수처리 설비의 주요 설비는 ① 드럼 필터, ②,③ 생물학적 여과조 2개, ④ 가열조로 구성된 정화조이다(Fig. 2). 정화조에서 양식 어종에 맞는 수질을 맞추어 각 Line의 수조로 공급되며, 정화조에서 처리된 물이 각 Line 전체에 동일하게 공급된다. 수온 조절을 위한 설비는 전기 보일러 1대(600 kW, 열 효율 99%)와 수온 제어용 수열원 히트펌프 3대(253 kW × 3대, COP 4)로 구성되어 있으며, 이를 활용하여 뱀장어 양육 환경에 맞는 26 ~ 28℃의 수온을 유지하고 있다.

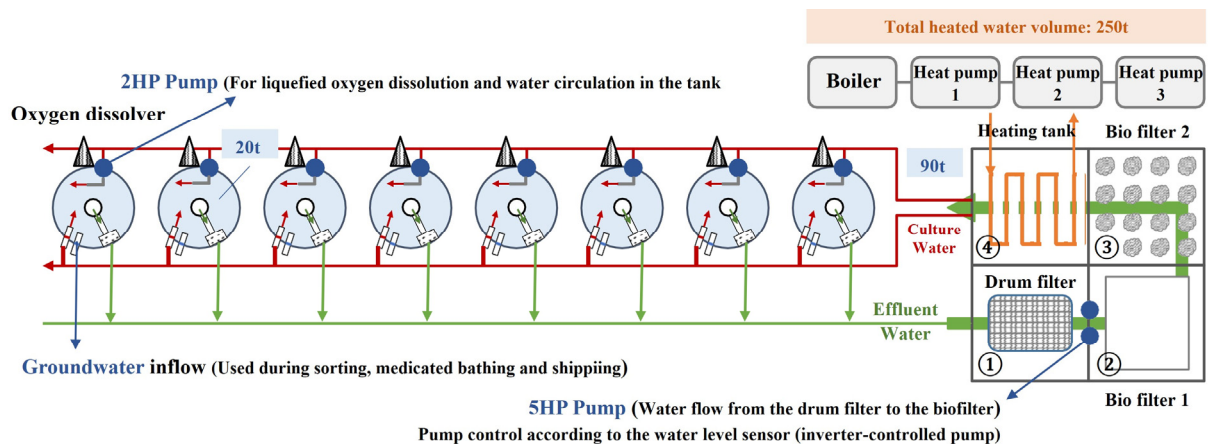


Fig. 2 Water circulation diagram by line

대상 양식장 내부에는 외기 도입을 하지 않는 공조용 EHP (난방 정격능력 33 kW × 4대, COP 2.64)가 설치되어 있지만, 현재 운영되지 않고 있다. 온수 어종을 양식하기 때문에, 외기 온도가 낮은 겨울철에는 수온 유지를 위한 설비의 에너지 사용량이 증가하게 된다. 본 연구에서는 양식장에 사용하지 않고 있는 실내 공조용 EHP를 최적 운영하여 에너지 사용량이 많은 겨울철(12 ~ 2월) 양식장의 전체 에너지 사용량을 절감해 보고자 한다.

2.2 에너지 사용량 예측 모델링

본 연구에서 사용된 EnergyPlus 24.2에는 양식장 모델이 없기에 가장 유사한 'SwimmingPool:Indoor'를 활용하여 구현되었다. 이 때 대상 양식장의 운영 스케줄은 그리고 대상 양식장의 운영과 관련된 모델링은 12월부터 2월까지 현장으로부터 수집된 데이터 이를 활용하여 모델링 되었다. 이 때 사용되지 않고 있는 공조용 EHP의 모델링은 제외되었다. 모델링의 마지막 단계로써 작성된 최종 모델에 대하여 예측 정확도 검증을 위한 M&V (Measurement and Verification) 절차를 수행하였다.

본 연구에서 측정 및 수집된 항목은 크게 3가지로, Fig. 3과 같이 각 수조 내부에 설치된 Dissolved Oxygen(DO) 센서를 활용한 수온과 용존 산소량, 온습도 데이터 로거를 활용한 양식장 내부 온습도와 Fig. 4와 같이 각 설비 기기의 판넬에 전력 측정기를 설치하여 데이터 무선 수신을 통해 사무실에 있는 PC에 저장되는 전력사용량이 있다. 이 외에 건물의 에너지 해석을 위한 기상 데이터는 기상청의 시간별 기상 데이터가 활용되었다.

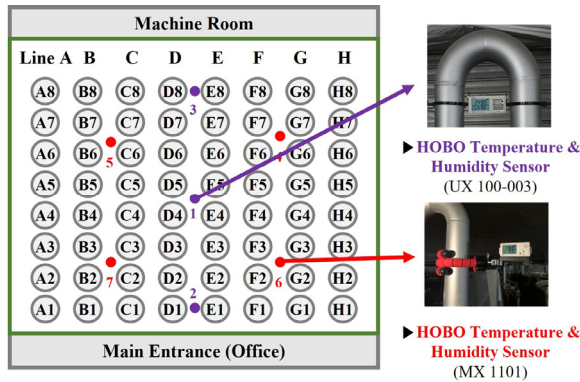


Fig. 3 Installation locations of temperature and humidity sensors

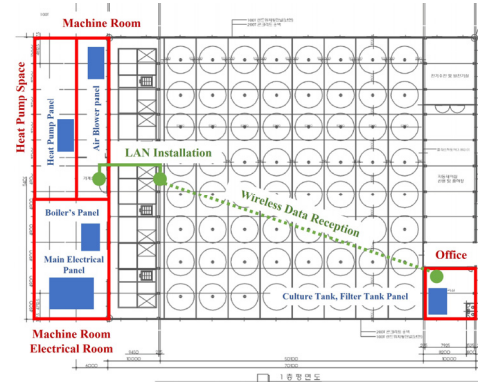


Fig. 4 Measurement locations of electricity meters

운영 스케줄은 에너지 모델링의 주요한 입력 변수임에도 불구하고, 대상 양식장의 경우 근무자의 경험에 의해 운영되고 있어, 정확한 스케줄 확인이 불가한 상황이다. 이러한 운영 스케줄의 불확실성을 해결하기 위해 데이터 기반 수조 운영 시나리오 도출 프로세스를 구축하였다(Table 1). 해당 프로세스는 수조 전체의 수온, DO, 마리 수 분포에 따라 Controlled(1) / Uncontrolled(0), Occupied(1) / Unoccupied(0)를 기준으로 총 0 ~ 5단계의 운영 스케줄을 도출하였으며, Plant on / off 스케줄로 단순화하였다.

도출된 운영 스케줄을 바탕으로 시뮬레이션 한 일별 에너지 사용량과 수온을 ASHRAE Guideline 14에 따른 M&V⁸⁾를 진행하였다. 이때, 양식 어종의 생육환경이 중요하기에 수온의 오차율을 고려하였다. 그 결과 에너지 사용량은 Table 2와 같이 평균 MBE -0.175%, Cv(RMSE) 18.725%로 기준에 부합하는 예측 성능을 확인하였으며, 수온 역시 Table 3과 같이 평균 MBE -0.115%, Cv(RMSE) 5.235%로 예측 성능을 확인하였다.

Table 1 Plant On/Off operation schedule

Setpoint		DO		Eel		Possible Schedule	Plant on/off	Control
27-28°C		10 mg/L		0				Feature
Controlled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled	Occupied	Unoccupied			
–	×	–	×	–	×	0	Off	Tank not in use
–	×	○	–	–	×	1	Off	Groundwater Inflow only
–	×	○	–	○	–	2	On	Shipping or Medicated bath (Mixed with Groundwater)
○	–	–	×	–	×	3	On	Water Retention and Disinfection
○	–	○	–	–	×	4	On	Water Retention
○	–	○	–	○	–	5	On	Normal Tank Operation

Table 2 Comparison of prediction performance of energy consumption by line before and after M&V

Category	Unit	Line AB		Line CD		Line EF		Line GH	
		Initial	Adjust	Initial	Adjust	Initial	Adjust	Initial	Adjust
MBE	%	-12.1	5.0	23.6	-1.7	21.6	0.6	-6.3	-4.6
RMSE	kW	156.5	119.6	233.1	150.1	192.7	139.4	137.9	119.9
Cv(RMSE)	%	23.4	17.7	30.8	19.8	28.3	20.5	19.5	16.9

Table 3 Comparison of prediction performance of water temperature by line before and after M&V

Category	Unit	Line A	Line B	Line C	Line D	Line E	Line F	Line G	Line H
MBE	%	4.05	0.51	-0.61	0.04	-0.5	-1.42	-1.18	-1.78
RMSE	°C	2.3	0.9	1.5	1.0	1.6	1.2	0.9	0.9
Cv(RMSE)	%	9.46	3.79	6.17	3.81	6.66	4.91	3.45	3.63

3. 공조용 EHP의 최적 운영 방안 도출

3.1 최적 운영 방안 도출 프로세스

앞서 개발된 에너지 사용량 예측 모델에 EHP를 추가적으로 모델링 한 후, GenOpt를 활용하여 최적 운영 방안으로써 공조용 EHP와 보일러의 설정 온도를 도출하였다. Fig. 5는 그 과정을 도식화한 것이다. 이때, 대상 양식장의 수온 제어용 설비 기기 중 보일러의 에너지 사용량이 평균 90% 이상을 차지하기에 보일러의 설정 온도만을 변수로 설정하였다. 공조용 EHP가 추가된 예측 모델(template file)을 생성한 뒤, 최적화를 진행하기 위한 초기 설정과 변수 설정을 진행하였다. 그 후 목적 함수를 수온 제어용 설비(보일러, 히트펌프)와 공조용 EHP의 에너지 사용량 총합으로 지정하였고, GenOpt의 GPSPSOCCHJ 알고리즘을 기반으로 공조용 EHP와 보일러의 설정 온도의 최적 제어 방안을 도출하였다. 도출된 최적화 결과를 기반으로 운영 스케줄을 작성하고, 에너지 사용량 예측 모델의 적용하여 12 ~ 2월 동안의 일평균 에너지 저감량을 확인하였다.

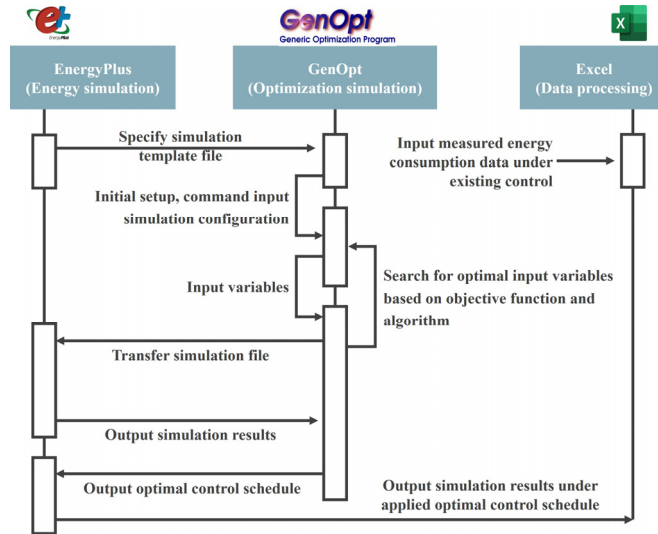


Fig. 5 Process for deriving the optimal operation strategies

3.2 최적화 조건

최적화를 진행하기 위한 변수는 보일러가 최대 온도로 운영되는 기간의 보일러와 공조용 EHP의 설정 온도를 최적 변수로 설정하였다. 보일러와 공조용 EHP의 설정 온도 구간은 보일러의 경우 Min = 50°C, Max = 70°C로 설정했으며, 최적화 시 interval은 1°C로 설정했다. 공조용 EHP의 경우 Min = 17°C, Max = 27°C로 설정했으며, 최적화 시 interval은 0.5°C로 설정했다.

EHP의 운영 최적화에 따른 에너지 사용량 비교를 위한 목적 함수(min J)는 아래 식 (2)와 같이 수온 제어 설비(보일러 1대, 히트펌프 3대)의 에너지 사용량과 공조 제어 설비(EHP 1대)의 에너지 사용량 총합으로 설정하였다.

$$\min J = S_HP1 + S_HP2 + S_HP3 + S_BO + S_EHP \quad (1)$$

이때, S_HP 1, 2, 3은 3대의 수온 제어용 히트펌프 에너지 사용량이며, S_BO는 보일러의 에너지 사용량, S_EHP는 공조용 EHP의 에너지 사용량을 의미한다.

4. 결과 및 토의

최적화를 통해 도출된 공조용 EHP와 보일러의 설정 온도 최적 제어 방안을 도출하였고, 이를 바탕으로 양식장 전체 에너지 사용량을 분석하였다. 공조용 EHP를 추가하여 저감된 에너지를 보다 명확히 하기 위해 비교군으로 공조용 EHP를 추가하지 않은 현재 양식장의 운영 정보를 기반의 에너지 사용량 예측 모델을 활용하여 보일러의 설정 온도만 최적화를 진행하여 에너지 사용량을 비교 분석하였다.

비교군인 보일러의 설정 온도를 최적화한 방안은 기존 양식장의 에너지 사용량 대비 약 9%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다(Fig. 6). 반면, 본 연구의 공조용 EHP와 보일러의 최적 제어 방안을 적용한 결과, 기존 양식장의 에너지 사용량 대비 약 11%의 절감 효과를 얻을 수 있다(Fig. 7).

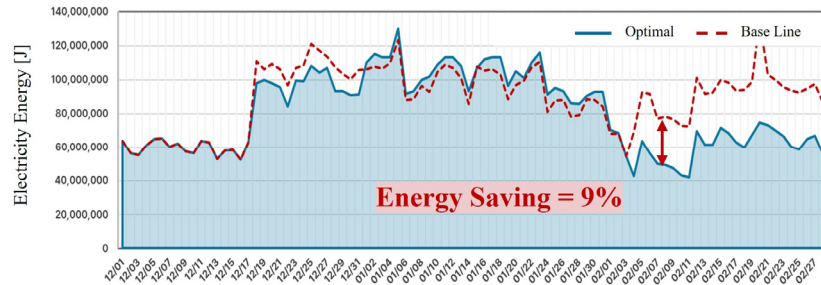


Fig. 6 Energy consumption under optimal control of Boiler

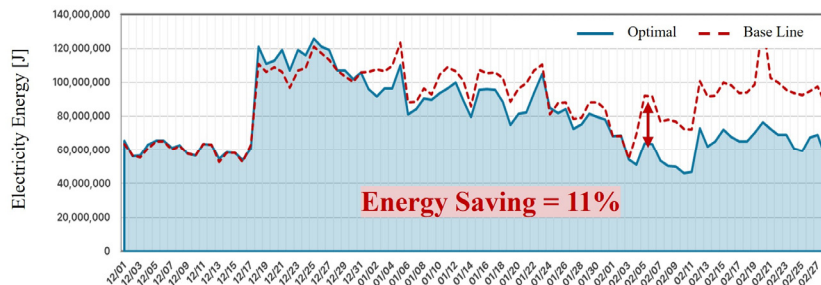


Fig. 7 Energy consumption under optimal control of EHP and Boiler

위와 같이 공조용 EHP를 추가하는 경우의 에너지 사용량 절감 효과는 보일러 운영 방식의 변화로 인한 여러 원인에 기인한다. 첫째로, 보일러가 담당하고 있는 수조의 난방 부하를 공조용 EHP가 나누어 담당하게 되어, 보일러의 에너지 사용량이 감소했다(Fig. 8). 둘째로, 도출된 최적 제어 스케줄은 보일러가 가장 최대 온도로 운영 될 때, 공조용 EHP가 운영되는 방식으로 보일러의 과부하 기간에 공조용 EHP로 줄임으로써 보일러와 공조용 EHP를 동시에 운영할 때의 비효율을 줄여 전체적인 에너지 사용량이 감소했다.

이때, 공조용 EHP를 추가한 경우, 보일러의 부하가 줄어들어 전체 에너지 사용량이 감소했지만(Fig. 8), 겨울철 낮은 실내 온도를 가열하기 위해 공조용 EHP가 많은 에너지를 사용하고 있으며, 낮은 외기 온도(평균 3.3°C, 최소 -5.6°C)로 인해 공조용 EHP의 에너지 효율이 평균 COP 2.24로 정격 용량 대비 평균 약 15% 감소하였다. 또한 대상 양식장의 높이가 3.5 ~ 5.5 m의 높은 공간을 가열하기 위해 공조용 EHP의 에너지 사용량이 높아져 전체 에너지 사용량 절감 효과가 줄어들었다(Fig. 9). 이러한 이유로 본 연구의 EHP와 보일러의 최적 제어 결과와 비교군인 EHP를 설치하지 않은 모델에서 보일러의 최적 제어 결과의 차이가 크지 않게 나타났다.

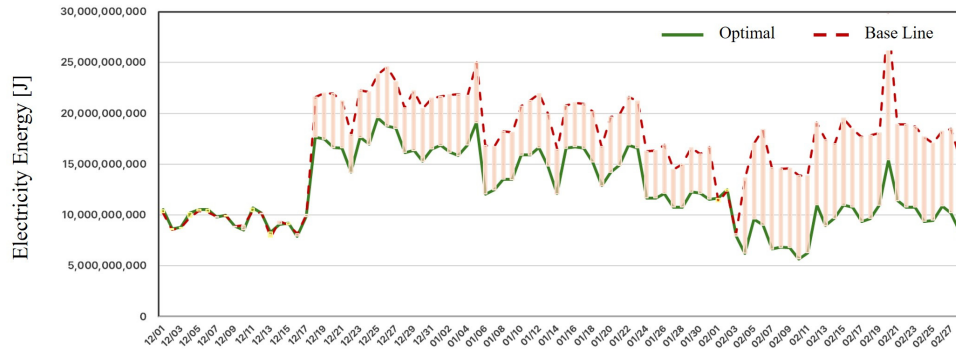


Fig. 8 Energy consumption of the Boiler

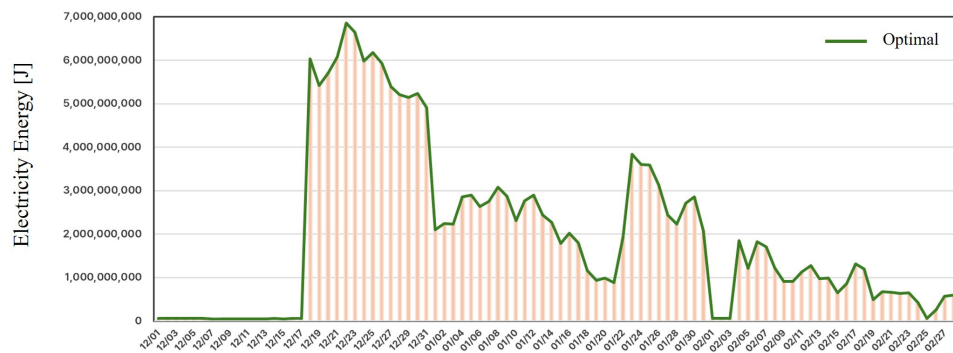


Fig. 9 Energy consumption of the EHP

5. 결론

본 연구는 EnergyPlus를 활용하여 순환 여과식 육상 양식장의 에너지 사용량 예측 모델을 개발하였으며, 현장 측정 데이터를 수집하여 모델 변수로 활용했다. 또한 대상 양식장의 불확실한 운영 정보를 도출하기 위해 수조 운영 시나리오 도출 프로세스를 구축하였으며, 도출된 운영 시나리오와 현장 측정 데이터 정보를 바탕으로 M&V를 진행하였으며, 평균 MBE -0.175% , Cv(RMSE) 18.725% 의 높은 정확도를 확인하였다.

보정된 에너지 사용량 예측 모델을 기반으로 실내 공조기인 EHP를 추가하였고, 최적화 알고리즘을 활용하여 공조용 EHP와 보일러 설정 온도의 최적 제어 방안을 도출하였다. 최적 제어 방안의 명확한 에너지 저감량을 비교하기 위해 공조용 EHP를 추가하지 않은 현재 양식장의 운영 정보를 기반으로 보일러의 설정 온도만 최적화를 진행하여 비교 분석하였다. 보일러만 최적 제어할 경우 약 9%, 공조용 EHP와 보일러의 설정 온도를 동시에 최적 제어할 경우 약 11%의 에너지 저감 효과를 확인하였다.

두 경우의 저감 효과 차이가 크지 않지만, 공조용 EHP를 활용한 최적 제어는 보일러의 부하를 분산하여 운영의 안정성을 높이고, 부하 변동에 유연하게 대응할 수 있다는 장점을 제공한다. 하지만 본 연구 결과인 최적 제어 방안을 실제 양식장에 적용하기에는 어려움이 존재한다. 대상 양식장은 작업자의 경험과 직관에 기반하여 양식장을 운영하고 있기에 최적 제어 방안을 구현하기 위해서는 자동 제어 시스템, 실시간 제어 인프라 등의 기

반이 필요하며, 작업자의 경험을 기반한 운영 방식의 특성상 EHP와 보일러의 설정 온도 조절이 일정하게 이루어지지 않는 가능성으로 인해 본 연구 결과에 차이가 발생할 수 있다. 또한, 겨울철 외기 온도에 영향을 많이 받는 EHP의 특성으로 인해, 실제 적용 시 본 연구보다 낮은 에너지 저감 효과를 도출될 수 있다. 또한, 본 연구의 최적 제어는 공조와 관련된 습도 변수 등을 최적 제어 변수에 포함하지 못한 제한적인 상황이므로, 실제 적용성을 검토하기 위해 향후 상대습도와 절대습도를 기준으로 공조용 EHP의 설정 조건을 변경한 분석이 필요하다.

본 연구는 기존 연구의 에너지 저감 방식인 단열 성능 강화, 열원 설비 운영 최적화 방식에 더해 공조용 EHP - 보일러의 복합 운영 방식의 최적 제어 전략을 도출하였으며, 이를 바탕으로 육상 양식장의 에너지 저감을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받았으며(RS-2021-II210225), 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2025-07502971).

REFERENCES

1. The INSIGHT Partners, Recirculating Aquaculture Systems Market Size to Surpass USD 9.04 Billion by 2031, 2025. <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/05/12/3079228/0/en/Recirculating-Aquaculture-Systems-Market-Size-to-Surpass-USD-9-04-Billion-by-2031-The-Insight-Partners.html>. last accessed on the 22nd October 2025.
2. Martins, C., Eding, E., Verdegem, M., Heinsbroek, L., Schneider, O., Blancheton, J., Roque d'Orbecastel, E., and Verreth, J., New Developments in Recirculating Aquaculture Systems in Europe: A Perspective on Environmental Sustainability, *Aquacultural Engineering*, Vol. 43, No. 3, pp. 83-93, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.02.014>.
3. Ayuso-Virgili, G., Jafari, L., Lande-Sudall, D., and Lümmer, N., Linear Modelling of the Mass Balance and Energy Demand for a Recirculating Aquaculture System, *Aquacultural Engineering*, Vol. 101, No. 102330, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102330>.
4. Zhang, R., Chen, T., Wang, Y., and Short, M., An Optimisation Approach for the Design and Operation of Recirculating Aquaculture Systems Integrated with Sustainable Hybrid Energy Systems, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 477, No. 143860, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143860>.
5. Goo, J., Kwak, Y., Shin, H., Kim, J., Jo, S., and Huh, J., Feasibility Study of Dynamic Thermal-Modeling Development Using Measurement and Validation: Case Study of Indoor Fish Farm, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 228, No. 120512, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120512>.
6. Ribeiro, E., Jorge, H., and Quintela, D., HVAC System Energy Optimization in Indoor Swimming Pools, *BauSIM*, pp. 385-390, September 2010, Vienna, Austria, https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bausim2010_385.
7. Ribeiro, E., Jorge, H., and Quintela, D., An Approach to Optimised Control of HVAC Systems in Indoor Swimming Pools, *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 35, No. 4, pp. 378-395, 2014, <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.907293>.
8. ASHRAE, ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings, Atlanta, GA, USA, 2014.