

# 해수 열원 히트펌프와 태양광 발전을 이용한 순환여과식 양식장의 에너지 절감 효과 분석

류종혁 · 정현석 · 정석권<sup>1\*</sup>

국립부경대학교 대학원 냉동공조공학과 대학원생, <sup>1</sup>국립부경대학교 냉동공조공학과 교수

## Analysis of energy-saving effects of recirculation aquaculture system using seawater source heat pumps and solar power generation

Jong-Hyeok RYU, Hyeon-Suk JEONG and Seok-Kwon JEONG<sup>1\*</sup>

*Student, Graduate School of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

*<sup>1</sup>Professor, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

This study focuses on analyzing the energy-saving effects of the recirculation aquaculture system using seawater source heat pumps and solar power generation. Based on the thermal load analysis conducted using the transient system simulation tool, the annual energy consumption of the recirculation aquaculture system was analyzed and the energy-saving effects of utilizing the photovoltaic system was evaluated. When analyzing the heat load, the sea areas where the fish farms are located, the type of breeding tank, and the circulation rate of breeding water were taken into consideration. In addition, a method for determining the appropriate capacity for each operation time was examined when applying the energy storage system instead of the existing diesel generator as an emergency power, which is required to maintain the water temperature of breeding water during power outage. The results suggest that, among the four seas considered, Jeju should be estimated to achieve the highest energy-saving performance using the solar power generation, with approximately 45% energy savings.

Keywords: Recirculation aquaculture system, Energy-saving effect, Seawater source heat pump, Solar power generation, Energy storage system

### 서론

2016년 기준 국내 양식 어업 생산량은 전체 어업 생산량의 절반에 가까운 비율을 차지하며, 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United

Nations; FAO)는 2030년 세계 양식 어업 생산량이 전체 어업 생산량의 약 55% 수준까지 증가할 것으로 예상하였다(Jeong et al., 2021). 최근에는 양식 산업 종사자의 고령화, 양식장의 노후화, 노무비와 사료비 증가 등으로

Received 31 January 2024; Revised 19 March 2024; Accepted 25 March 2024

\*Corresponding author: skjeong@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6181, Fax: +82-51-629-6174

Copyright © 2024 The Korean Society of Fisheries and Ocean Technology

인한 생산성 저하 문제를 해결하기 위해 정보통신기술 (Information and Communication Technologies; ICT)을 접목한 스마트 양식장으로의 전환이 시도되고 있다 (Jeong et al., 2021). 그러나 육상 양식장 경영비의 13~30%를 차지하는 광열비 절약 대책과 궁극적으로 양식장의 제로 에너지를 실현하려는 접근은 거의 이루어지지 않고 있다 (Yoon et al., 2023). 이는 국내 양식업의 경쟁력뿐만 아니라 국가 차원의 에너지 수급 문제와 글로벌 탄소 중립 실현과도 연관된 중요한 문제이다. 양식장의 에너지 절감을 위해서는 우선 양식장의 열부하 분석을 통해 에너지 수요량을 정확히 파악하고, 고효율 에너지 장치와 신재생 에너지 도입에 따른 에너지 절감 효과를 분석해야 한다.

육상 수조식 양식장의 에너지 절약을 위한 고효율 해수 열원 히트펌프(Heat Pump; HP)는 꾸준히 연구·검토되어 왔다. 국내에서는 해수 열원 HP의 성능계수 (Coefficient Of Performance; COP) 분석이 운전 조건에 따라 진행되었고 (Choi et al., 2003), 국외에서는 일본 나고야항 수족관의 수온 조절을 위해 해수 열원 HP가 적용되었다 (Kwon and Seol, 2013). 최근 연구로는 RAS 양식장의 열부하 분석 및 열원 기기 비교를 통해 지열 HP, 천연가스 보일러, 나무 펠릿 보일러의 경제성이 평가되었다 (Ion et al., 2022). 그러나 이 논문은 가열 부하만을 다루고 있어 냉각 부하가 발생하는 하계의 경제성 분석은 고려되지 않았으며, 열원 기기와 함께 적용할 대체 에너지원 적용에 대한 고찰도 부족하였다. 또한, 디지털 트윈 기반 스마트 양식 연구 (Goo et al., 2023)에서 양식장의 에너지 최적 관리 방안이 제시되었다. 그러나 이 논문은 특정 한 지역의 지하수 유입형 수조를 대상으로 HP와 전기보일러의 사용을 전제로 하였고, 신재생 에너지 사용 등에 의한 에너지 절약 방안 또한 전혀 검토되지 않았다. 수조식 양식장의 태양광 발전에 의한 에너지 절감 효과를 분석한 연구 (Choi et al., 2021)에서는 부산 소재의 특정 양식장을 대상으로 실증 시스템을 구축하고, 태양광 발전 시뮬레이션을 통해 연간 19.9%의 에너지 절감 효과를 추정하였다. 그러나 이 연구에서는 양식장의 소재 해역, 규모, 사육수 순환율 등의 다양한 양식장 조건에 따른 열부하 분석이 부족하였다. 한편, 육상 수조식 양식장의 사육수 온도 제어를 위한 최대 열부하 계산과 이에 기반한 해수 열원 HP의 최적 용량

을 결정하는 방법이 제안되었다 (Yoon et al., 2023). 이 연구에서는 양식장의 대표적 수처리 방식인 유수식 (Flow-through Aquaculture System; FAS)과 순환여과식 (Recirculation Aquaculture System; RAS)을 대상으로 순환율, 사육조 체적, 하계 및 동계 시의 해역별 최대 열부하를 각각 분석하였다. 하지만 HP 시스템의 도입만으로는 큰 에너지 절감과 탄소 중립 실현이 어려우며, 에너지원 차원의 접근이 필요하다 (Wu et al., 2022). 따라서 양식장의 에너지 절감을 위해 태양광(Photovoltaic; PV) 발전과 같은 신재생 에너지를 도입하고, 탈 탄소화를 위해 디젤 비상 발전기를 에너지 저장 장치(Energy Storage System; ESS)로 교체하는 등의 다각적인 방안들이 함께 검토되어야 한다. 특히, 태양광 발전은 화석 연료를 사용하지 않아 환경친화적이며, 양식장 지붕과 같은 유휴 공간을 이용해 에너지를 무한정 공급받을 수 있는 장점이 있다. 이러한 이유로 건물 일체형 태양광 발전 시스템은 지속적으로 연구, 적용되고 있다 (Kim et al., 2023).

양식장에서는 사육수 수온을 24시간 일정하게 유지해야 하며, 이로 인해 태양광 발전이 불가능한 여름철 우기와 에너지 수요가 높은 동계 야간 시간대에 대비한 전력 공급 대책과 정전을 대비한 비상 발전 대책이 필요하다. ESS는 태양광 발전 시스템에서 생산된 직류 전기 에너지를 축전지에 저장하고, 필요할 때 저비용, 저손실의 전력 변환을 통해 교류 전원으로 사용함으로써 피크 부하에 대응할 수 있으며, 비상 발전용 전원으로도 활용할 수 있다. 이러한 태양광과 ESS 연계 시스템의 장점과 높은 미래 활용 가능성에도 불구하고 이들을 양식장에 적용할 경우의 에너지 절감 효과에 관한 분석과 양식장의 단시간 정전에 대비한 ESS 축전지의 적정 용량(이하 ESS 용량)을 산정하는 방법에 대한 고찰 등은 부족한 실정이다. 그 이유로는 육상 양식장의 소재지와 규모가 각기 다르고 다양한 형태와 다종의 건축 재료로 구성되어 있기 때문이다. 이러한 양식장의 복합적인 요소들을 모두 고려한 열부하는 정적인 방법으로 계산하기 복잡하므로 에너지 수요 분석과 이에 기반한 에너지 절약 대책을 수립하기가 어렵다 (Jeong et al., 2024). 따라서 본 논문에서는 순환여과식 육상 양식장의 소재지, 규모, 사육수 순환율을 다양한 경우로 가정하고, 국내 기후 조건에 따른 양식장의 소비 전력량 및 태양광 발전량을

동적 에너지 시뮬레이션(Transient System Simulation; TRNSYS)을 통해 계산한다. 또한, 이 계산 결과에 따른 에너지 절감률을 분석한다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통해 단기적으로는 에너지 절약 양식 시스템, 장기적으로는 탄소 중립과 제로 에너지 실현이 가능한 육상 양식장 모델 구축에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

### 재료 및 방법

#### 연구 개요 및 방법

본 연구의 목적은 순환여과식 육상 양식장에 해수 열원 HP 시스템, PV 발전 시스템 및 ESS를 적용하여 에너지 절감률을 분석하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 RAS 양식장의 소재지와 규모, 순환율의 경우를 미리 가정한다. 이후 에너지 절약 성능이 뛰어난 해수 열원 HP와 대체 에너지원으로 ESS 연계 PV 발전 시스템을 적용하여 발전량 시뮬레이션을 진행하고, 이 결과를 통해 에너지 절감 효과를 분석한다. 이때 양식장의 소비 전력은 실내의 조명 부하 등을 제외한 사육수의 온도 제어용 HP와 사육수 순환 펌프, 취수 펌프(이하 HP 시스템)의 소비 전력에 초점을 맞춘다. 다만 태양광 발전 에너지의 저장과 전력 변환을 담당하는 ESS의 에너지 손실은 극히 미미하므로 고려하지 않는다. 마지막으로 기존 양식장에서 사용하는 유류 비상 발전기를 대체하기

위한 ESS 설비의 적정 용량을 검토한다. 특히, 본 연구에서는 TRNSYS를 이용하여 실시간으로 변동하는 기상 조건을 반영한 HP 시스템의 에너지 절감률을 양식장 소재지, 규모, 사육수 순환율에 따라 정밀하게 분석한다.

#### 해수 열원 HP 시스템을 적용한 순환여과식(RAS) 양식장 모델

Table 1은 본 연구의 대상인 RAS 양식장 모델의 규모와 사육조 형태를 나타낸다. 양식장 모델의 규모는 사육조(breeding tank) 체적을 기준으로 A, B, C의 세 유형을 가정하였으며, 사육조의 형태는 A와 C는 사각형, B는 원형을 적용하였다(Yoon et al., 2023).

Fig. 1은 RAS 양식장의 사육수를 HP 시스템으로 냉각 및 가열하는 과정을 나타낸 개략도이며, (a)는 냉각, (b)는 가열 과정을 나타낸다(Yoon et al., 2023). 이 냉각-가열 과정은 HP에 내장된 사방밸브(4-way valve)를 통해 자동으로 전환된다. Fig. 1에서 ㉠과 ㉡는 각각 HP

Table 1. Specifications of tank culture system model

| Type | Shape     | Dimension (m) | Volume (m <sup>3</sup> ) | Number of tank (EA) |
|------|-----------|---------------|--------------------------|---------------------|
| A    | rectangle | 6×5×1         | 30                       | 32                  |
| B    | circle    | D=8, H=1.2    | 60                       | 24                  |
| C    | rectangle | 10×10×1       | 100                      | 20                  |

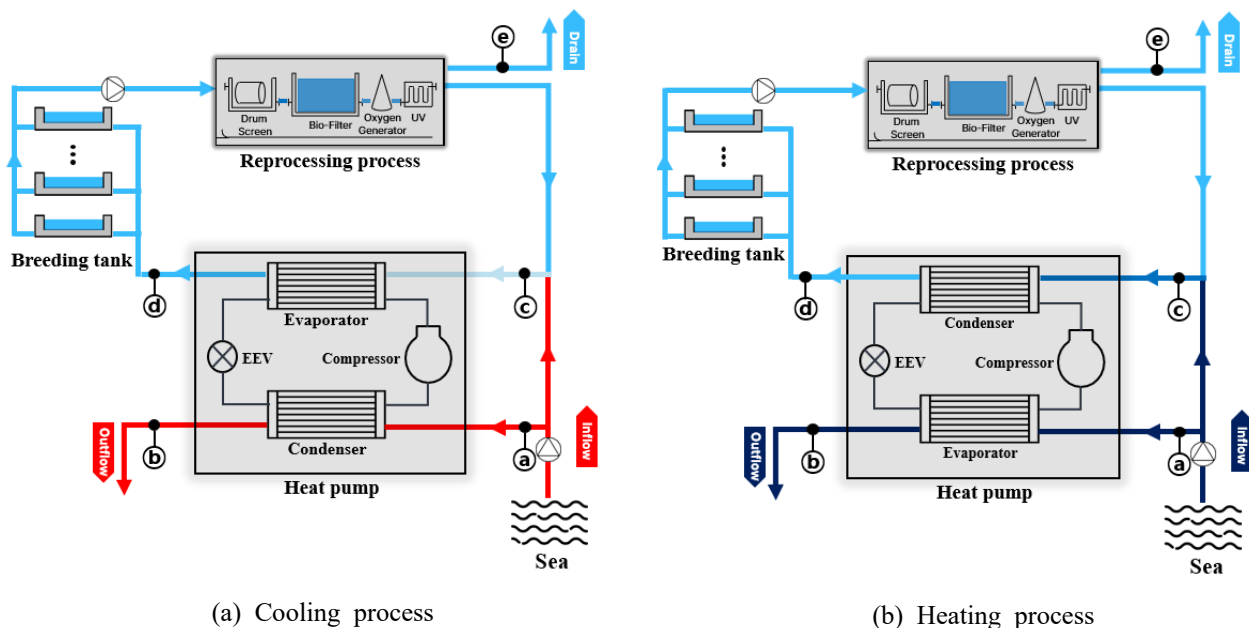


Fig. 1. Cooling and heating process of RAS.

열원 측의 입·출구, ㉔와 ㉕는 HP 부하 측의 입·출구이며, ㉔는 재처리 장치에서 걸러진 오염된 배수이다. RAS 양식장은 양식장 밖의 취수원에서 사육수를 취득하고, 사육수는 재처리 장치를 순환하면서 재사용되며 오염된 일부 사육수 ㉔만을 배출한다. 이때 배출한 만큼의 사육수를 취수원에서 다시 공급받고, 재처리 장치를 거친 사육수와 혼합되어 HP의 ㉔를 지나게 되며 이 HP에서 사육에 필요한 적정 온도로 가열 또는 냉각되어 사육조에 유입된다.

RAS 양식장의 열부하  $Q_r$  (kJ/day)은 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다(Yoon et al., 2023).

$$Q_r = S_r \times N_r \times V_t \times \rho_{sw} \times c_p \times \Delta T \quad (1)$$

여기서  $S_r$ 은 사육수 1회 순환 시의 보충수 비율 ( $0 < S_r < 1$ )을 의미하며 본 논문에서는 사육수의 재사용율을 0.9로 가정하였기 때문에 이 값은 0.1로 정하였다.  $N_r$ 은 순환율(cycle/day)로서 해수가 사육조를 순환하는 일간 횟수를 의미한다. 이 순환율은 10 cycle/day, 20 cycle/day, 30 cycle/day의 3가지 경우로 선정하였다.  $V_t$ 는 사육조 총 용적으로 사육조 유형별 개당 체적과 사육조 개수의 곱으로 나타내며, Table 1과 같이 세 가지 경우로 선정하였다. 또한  $\rho_{sw}$ 는 해수의 밀도로 1,026 kg/m<sup>3</sup>,  $c_p$ 는 해수의 비열로 3.9 kJ/kg·K으로 가정하였다(Yoon et al., 2023). 취수와 사육수의 온도차  $\Delta T$  ( $= T_i - T_o$ )에서  $T_i$ 는 Fig. 1의 HP의 해수 열원 입구 측 ㉔와 동일한 온도,  $T_o$ 는 HP를 통과해 사육조로 유입되는 ㉕의 온도에 해당한다.  $\Delta T$ 는 (a)의 경우 양수, (b)의 경우 음수로 나타나는데, 이는 각각 냉각 부하, 가열 부하임을 의미한다. 결국, 이 식에서 다른 파라미터들은

상수값으로 특정되지만  $\Delta T$ 는 해수 온도에 의해 실시간으로 변동하는 값들이다. 또한, 이 식은 양식장을 구성하는 건축물 벽체 정보를 포함하고 있지 않으며, 외기 온·습도 및 일사량이 변동함에 따라 매시간 변하는 실내 온도를 반영하지 못한다. 따라서 양식장의 정확한 열부하 계산은 식 (1)과 같은 정적인 계산 방법으로는 분석하기 어렵다(Jeong et al., 2024). 아울러 이 식은 HP의 성능 계수를 반영하고 있지 않기 때문에 열부하 분석 결과에 따른 HP의 소비 동력을 파악하기에는 더욱 한계가 있다. 따라서 정확한 열부하 및 소비 전력량 분석을 위해서는 동적 시뮬레이션이 필요하다. Fig. 2는 HP 시스템의 소비 전력량을 분석하기 위한 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램 구성도를 나타내며, Table 2는 이때 사용된 각 TRNSYS 라이브러리의 명칭과 그 기능을 나타낸다.

시뮬레이션에서 사용한 양식장 소재 해역은 남해(완도), 제주(서귀포), 서해(인천), 동해(포항)이며, 입력 데이터로는 외기 온·습도, 일사량, 해수 온도가 사용되었다. 이들 데이터 중 외기 온·습도와 일사량은 EPW (Energy Plus Weather) 표준 기상 데이터(Climata data from Passive House Institute Korea, 2021), 해수 온도는

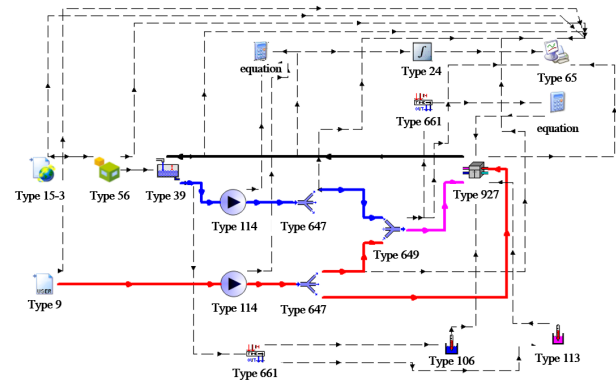


Fig. 2. TRNSYS model for analyzing thermal load of RAS.

Table 2. Components for RAS TRNSYS model

| No. | Component | Description                         | No. | Component | Description              |
|-----|-----------|-------------------------------------|-----|-----------|--------------------------|
| 1   | Type 9    | Seawater data for target space area | 8   | Type 113  | Heating mode             |
| 2   | Type 15-3 | Weather data for target space area  | 9   | Type 114  | Single speed pump        |
| 3   | Type 24   | Integrator                          | 10  | Type 647  | Diverting pipe           |
| 4   | Type 39   | Water tank                          | 11  | Type 649  | Mixing pipe              |
| 5   | Type 56   | Passive house                       | 12  | Type 661  | Delayed output           |
| 6   | Type 65   | Monitoring and storing              | 13  | Type 927  | Water to water heat pump |
| 7   | Type 106  | Cooling mode                        |     |           |                          |

기상청 해양 기상 부이 데이터(Open met data portal, 2022)를 각각 이용하였다. 양식장 내부 환경은 향후 개발될 스마트 양식장의 높은 단열성과 기밀성을 고려하여 패시브 하우스(Type 56) 형태로 구성하였고, 창문 면적은 수직 벽체 면적의 30%로 가정하였다. 창문의 열관류율 U-value는 0.7 (W/m<sup>2</sup>·K), 태양열 취득 계수(Solar Heat Gain Coefficient)는 0.3인 내장 라이브러리(SHA3\_AR\_1)를 사용하였다. 이 건물의 상세한 조건은 Table 3에 나타내었다(Park, 2020).

양식 어종은 생산량이 가장 많고 수질 및 수온에 민감한 넙치를 가정하였으며 이 어종의 성장 적절 수온은 21~24°C이다(Oak, 2007). 사육수 온도를 21~24°C로 유지하기 위한 HP의 가열 및 냉각 시 목표 설정 온도(set point)는 각각 22.5°C와 23°C로 정하였다. 냉각과 가열 시의 설정 온도를 각기 달리한 이유는 HP에 내장된 사방밸브가 냉각과 가열 모드로 빈번하게 전환되는 것을 방지하기 위함이다.

사육수 온도를 설정 온도로 유지하기 위한 HP의 총 운전 대수  $N_{hp,t}$ 는 동계의 최대 가열 부하에 대응할 수 있도록 식 (2)를 만족하는 가장 작은 정수로 선정하였다.

$$N_{hp,t} \geq \frac{|Q_{r,m}| \times c \times 1000}{Q_{hp} \times 24 \times 3600} \quad (2)$$

여기서  $Q_{r,m}$  (kJ/day)은 식 (1)에서 동계 가열 부하 중  $\Delta T$ 가 가장 클 때의 열부하이며,  $Q_{hp}$  (W)는 HP 1대 당의 정격 가열 용량이다.  $c$ 는 여유(안전)율로, 본 논문

에서는 10%를 가정하였다.

HP에 의한 사육수 온도 제어는 현장에서 널리 사용되고 있는 대수 제어를 적용하였으며, 사육조의 입구 측 온도가 설정값이 되도록 제어하였다(Ma et al., 2023). 부분 부하 시의 HP의 운전 대수  $N_{hp,p}$ 는 식 (3)을 만족하는 가장 작은 정수로 선정하였다.

$$N_{hp,p} \geq \frac{N_r \times V_t \times \rho_{sw} \times c_p \times |T_{set} - T_{mix}| \times 1000}{Q_{hp} \times 24 \times 3600} \quad (3)$$

이때  $T_{set}$  (°C)은 설정 온도,  $T_{mix}$  (°C)는 Fig. 1에서 ㉔의 온도이다. 식 (3)으로 결정되는  $N_{hp,p}$ 는 HP의 부하 측 출구(Fig. 1의 ㉔) 온도가 설정값이 되도록 사육조의 열부하를 처리할 수 있는 HP의 운전 대수를 의미한다.

해수 펌프는 사육수 순환 펌프와 취수 펌프로 구성되어 있으며, 두 펌프는 모두 같은 제품을 사용하였다. 사육수 순환 펌프의 운전 대수  $N_{p,br}$ 은 사육조에서 1일 순환되는 총 해수 유량을 펌프가 최대 효율로 운전 가능한 유량으로 나누어 식 (4)를 만족하는 가장 작은 정수로 정하였다.

$$N_{p,br} \geq \frac{N_r \times V_t \times 1000}{Q \times 24 \times 60} \quad (4)$$

이때  $Q$  (LPM)는 이 펌프가 최대 효율로 운전 가능한 최대 유량이다. 마지막으로 취수 펌프의 운전 대수는 HP 시스템의 전체 소비 전력량이 최소화되도록 선정하

Table 3. Specifications of external wall, roof and floor of RAS

| Layer                | Material                        | Thermal resistance (h·m <sup>2</sup> ·K/kJ) | Thickness (m) | Conductivity (kJ/h·m·K) | Capacity (kJ/kg·K) | Density (kJ/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---------------------------------|---|---------------|-------------------------|--------------------|------------------------------|
| External wall & roof | Air layer                       | 0.0239                                      |               |                         |                    |                              |
|                      | Terracotta panel                |   | 0.019         | 1.20                    | 0.84               | 2000                         |
|                      | Insulation                      |   | 0.150         | 0.14                    | 0.80               | 20                           |
|                      | Concrete                        |   | 0.150         | 5.96                    | 0.95               | 2200                         |
| Floor                | Cement mortar                   |   | 0.011         | 5.04                    | 1.13               | 2000                         |
|                      | Vinyl sheet                     |   | 0.002         | 0.83                    | 1.00               | 1500                         |
|                      | Cement mortar                   |   | 0.038         | 5.04                    | 1.13               | 2000                         |
|                      | Insulation                      |   | 0.060         | 0.09                    | 1.40               | 35                           |
|                      | Concrete                        |   | 0.150         | 5.96                    | 0.95               | 2200                         |
|                      | Autoclaved lightweight concrete |   | 0.040         | 0.58                    | 1.00               | 500                          |

**Table 4. Specifications of seawater source HP**

| Model                       | IWS-13A-71 |         |
|-----------------------------|------------|---------|
| Capacity (W)                | Heating    | 249,564 |
|                             | Cooling    | 229,165 |
| Power consumption (kW)      | Heating    | 41.85   |
|                             | Cooling    | 50.03   |
| COP                         | Heating    | 5.96    |
|                             | Cooling    | 4.58    |
| Circulating flow rate (LPM) | Load       | 1,250   |
|                             | Source     | 1,250   |

**Table 5. Specifications of circulation pump**

| Model                              | SEQ/WEQ750T |
|------------------------------------|-------------|
| Power consumption (HP)             | 7.5         |
| Maximum flow rate (LPM)            | 2,000       |
| Maximum head (m)                   | 17.5        |
| Maximum efficiency flow rate (LPM) | 8.5 ~ 1,667 |

였다. 단, 겨울철 HP의 열원 측에서 동파가 발생하지 않도록 HP 열원 출구 측 온도가 해수의 빙점(영하 2℃) 이상으로 유지되는 대수로 정하였다. 이때 HP는 I사의 제품을, 해수 펌프는 K사의 제품을 각각 참고하였으며 이들의 주요 사양은 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다.

**태양광 발전 용량 시뮬레이션 모델**

Fig. 3은 태양광 발전 용량 분석에 사용된 RAS 양식장(C-type)의 규모와 건물의 지붕 형상을 나타낸 3D 모델이다. Fig. 4(a)는 태양광 발전 시스템의 발전량을 분석하기 위한 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램의 구성, Fig. 4(b)는 태양광 패널의 3D 모델을 각각 나타낸다.

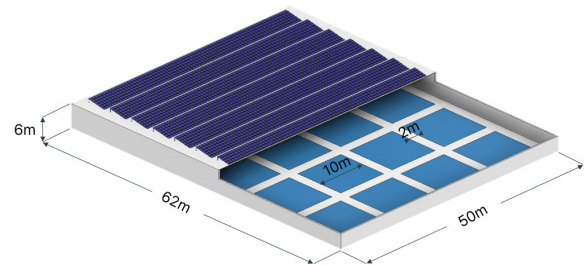
이 패널은 TRNSYS 라이브러리 Type 190을 통해 구

현되었으며, 특성값은 L사 450 W 용량의 고정형 태양광 패널을 참고하였다. 라이브러리 Type 24는 매시간 발전되는 전력을 적분함으로써 전력량을 계산하며, Type 65는 시뮬레이션의 결과를 파일로 저장하는 역할을 한다. 이 시뮬레이션의 입력 데이터로는 EPW 표준 기상 데이터인 일사량, 태양 고도, 일사 각도, 기온, 풍속이 사용되었다. 태양광 패널의 주요 사양은 Table 6과 같다.

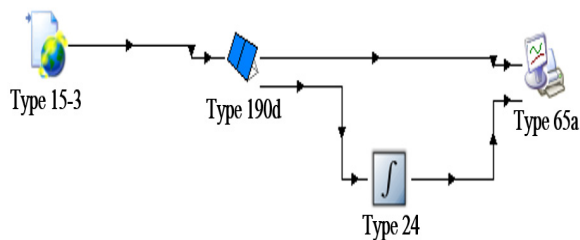
Fig. 4(b)에서 패널의 경사각  $\theta$ 가  $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ 일 경우, 발전량의 차이는 크지 않다(Choi et al., 2021). 본 연구에서는 태양광 패널의 경사각  $\theta$ 를  $20^\circ$ , 방위각을  $0^\circ$ (정남)로 가정하였다. 태양광 패널의 설치 개수는 Table 1의 사육조 유형별 양식장의 지붕 면적과 식 (5)와 같이 구해지는 패널 간 이격거리  $L$  (m)에 근거하여 산정하였다(Lee et al., 2019).

$$L = A \times \sin\theta \times \tan(\delta + 23.5^\circ) \tag{5}$$

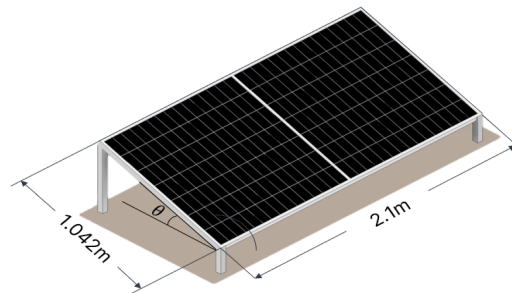
식 (5)의  $23.5^\circ$ 는 그림자가 가장 많이 발생하는 겨울철 태양의 적위를 고려한 값이다.  $A$ 는 태양광 패널의 세로 길이 1.042 m,  $\delta$ 는 패널이 설치된 장소의 위도  $35^\circ$ ,  $\theta$ 는



**Fig. 3. 3D model of RAS with C-type.**



(a) TRNSYS model of photovoltaic system



(b) 3D model of PV panel

**Fig. 4. Photovoltaic system and panel for PV generation simulation.**

**Table 6. Specifications of PV panel**

|                           |           |                          |                |
|---------------------------|-----------|--------------------------|----------------|
| Model                     | LG450W-U6 | Output (W)               | 450            |
| Short circuit current (A) | 11.43     | $I_{sc}$ (%/°C)          | 0.04           |
| Open circuit voltage (V)  | 50.27     | $V_{oc}$ (%/°C)          | -0.27          |
| Voltage at MPP (V)        | 40.91     | Ambient temperature (°C) | 20             |
| Current at MPP (A)        | 11.01     | Module temperature (°C)  | 42             |
| Cell (EA)                 | 144       | Size (mm)                | 2,110×1,042×40 |

※ MPP: Maximum Power Point.

**Table 7. Number of solar panels**

| Type | Install area (m <sup>2</sup> ) | Number of PV (EA) |
|------|--------------------------------|-------------------|
| A    | 1972 (34×58)                   | 546               |
| B    | 2604 (42×62)                   | 754               |
| C    | 3100 (50×62)                   | 899               |

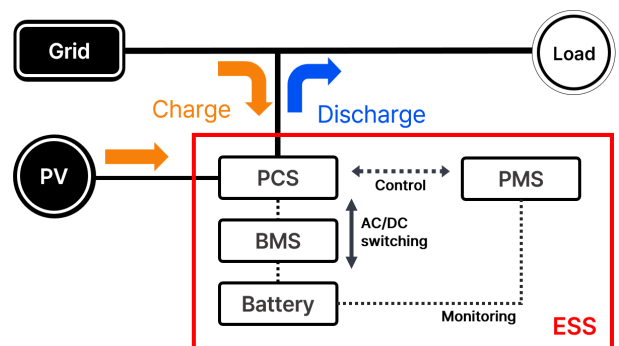
경사각 20°를 대입하여 식 (5)로부터 산정된 태양광 패널의 이격거리  $L$ 은 0.6 m였다. 양식장의 사육조 유형별 태양광 패널의 최대 설치 대수는 건물의 가로 길이를 태양광 패널의 가로 길이(2.110 m)로 나눈 값과 건물의 세로 길이를 태양광 패널 설치에 필요한 세로 길이(1.58 m)로 나눈 값을 서로 곱해 구하였다. 패널 설치에 필요한 세로 길이는 태양광 패널의 세로 길이, 경사각 20°, 이격거리 0.6 m를 고려하여  $1.042 \times \cos 20^\circ + 0.6 \cong 1.58$  m로 구하였다. 이 결과로 산출된 양식장의 사육조 유형별 설치 가능한 패널의 최대 개수를 Table 7에 나타내었다.

**태양광 발전 에너지 연계 및 비상 전력용 에너지 저장 장치**

ESS는 태양광(PV)으로 발전된 직류 형태의 전기 에너지를 내부 축전지에 저장하고, 전력 변환을 통해 부하측에서 사용 가능한 교류 전력으로 변환시키는 에너지 저장 장치이다. 이 장치는 양식장에서 정전 등의 비상시에 양식 어류의 폐사를 방지하기 위한 비상 전원 공급 장치로 사용할 수 있다. 기존 양식장은 이러한 비상상태를 대비하여 디젤 발전기 등을 구비한다. 그러나 경유와 같은 화석 연료를 사용하는 발전기는 열효율이 낮을 뿐만 아니라 연소 과정에서 CO<sub>2</sub> 등의 환경오염 물질을 발생시켜 환경에 악영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 태양광 발전 에너지의 효율적인 이용과 디젤 비상발전기의 대체 수단으로써 ESS 구축을 검토한다. ESS는 태양광 발전 에너지와 상용망 Grid를 통한 심야 전기 이용 등으로 양식장의 에너지 효율도 증대시킬 수 있다.

Fig. 5는 ESS의 개략도이다. ESS는 전력 변환 시스템 (Power Converting System; PCS), 전력 관리 시스템 (Power Management System; PMS), 축전지와 축전지 관리 시스템(Battery Management System; BMS)으로 구성된다. PCS는 교류와 직류를 상호 변환하는 전력 변환 장치이고, BMS는 축전지의 수명 예측 및 보호 기능을 담당한다. PMS는 ESS의 모든 동작을 제어하는 전력 관리 장치로서 BMS로부터 축전지의 상태 정보를 모니터링한다.

ESS를 비상 발전기로 사용하기 위해서는 정전 시간을 고려한 적정 용량에 대한 검토가 필요하다. ESS의 가동 시간이 길면 용량 증가로 장치 설치 면적과 비용이 증가하고, 짧으면 효율 가치가 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 가동 시간을 변수로 한 ESS 용량 산정법을 보인다. 비상 전력용 발전기의 용량 산정법으로는 PG법이 널리 사용되어왔다. PG법은 정상상태 부하 운용에 필요한 용량 PG1, 최대 부하 전동기 가동 시 허용 전압 강하를 고려한 용량 PG2, 최대 기동 값을 갖는 전동기의 마지막 시동 시 필요한 용량 PG3를 계산하고, 이 가운데 가장 큰 값을 선택하는 방법이다. Table 8은 PG1, PG2, PG3를 계산하는 방법, Table 9는 용량 계산 시 사용된



**Fig. 5. ESS linked PV for emergency power.**

**Table 8. Calculation formula of ESS capacity by PG method**

| Method | Calculation (kVA)  |
|--------|--|
| PG1    | $PG1 = \frac{\Sigma P_L}{\eta_L} \times \frac{1}{PFL} \times \alpha$   |
| PG2    | $PG2 = P_m \times \beta \times C \times X_d \times \alpha \times \frac{1 - \Delta V}{\Delta V}$                              |
| PG3    | $PG3 = \left[ \frac{\Sigma P_L - P_m}{\eta_L} + (P_m \times \beta \times C \times PFS) \right] \times \frac{1}{\cos \theta}$ |

**Table 9. Parameters for PG method**

| Parameter     | Meaning                                    | Value |
|---------------|--|-------|
| $\Sigma P_L$  | Total rated output of the loads            | -     |
| $PFL$         | Power factor of the load                   | 0.8   |
| $\eta_L$      | Efficiency of the load                     | 0.85  |
| $\alpha$      | Factor accounting for load and utilization | 1     |
| $\beta$       | Starting kVA per 1 kW of motor output      | 7.2   |
| $C$           | Starting coefficient                       | 0.67  |
| $X_d$         | Generator integer                          | 0.25  |
| $\Delta V$    | Allowable voltage drop ratio               | 0.25  |
| $PFS$         | Power factor of load starting              | 0.4   |
| $\cos \theta$ | Power factor of generator                  | 0.8   |
| $P_m$         | Motor output during maximum load           | -     |

각 파라미터의 정의와 계산된 값을 각각 나타낸다(Lee and Kim, 2018; Yoo, 2021).

**결과 및 고찰**

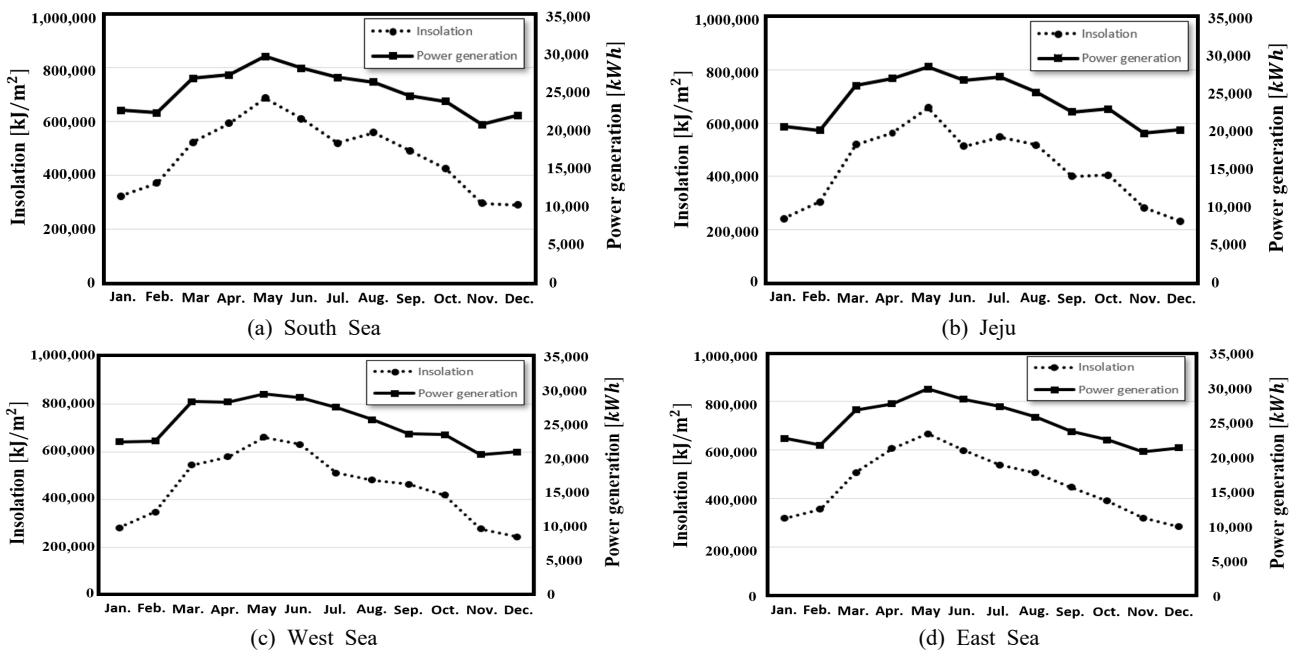
**TRNSYS에 의한 양식장 소비 전력량 및 태양광 발전량 분석**

Table 10은 Fig. 2의 TRNSYS를 이용한 동적 시뮬레이션의 한 결과로서 양식장 소재 해역은 남해(완도), 사육조 유형은 C-type, 순환율은 10 cycle/day를 가정해 산출한 HP 시스템의 연간 소비 전력량이다. 이때 사육수 온도 제어에 필요한 HP 총 대수는 식 (2)에 의해 11대, 사육수 순환 펌프는 식 (4)에 의해 9대, 취수 펌프는 4대로 각각 선정되었다.

Table 11은 남해(완도) 해역의 연간 태양광 발전량을 Fig. 4(a)의 TRNSYS로 시뮬레이션한 결과이다. 본 논문에서는 양식장 소재 해역, 사육조 형태, 순환율별로 HP와 사육수 순환 펌프, 취수 펌프의 대수를 계산하여 양식장의 월별 소비 전력량과 태양광 발전량을 각각 시뮬레이션으로 구하였다.

Fig. 6의 (a)는 남해, (b)는 제주, (c)는 서해, (d)는 동해의 A-type 수조에 대한 월별 태양광 발전량과 일사량을 나타낸다.

발전량은 4개 해역 모두 일사량이 가장 많은 5월에



**Fig. 6. Correlation between power generation and insolation.**



**Table 10. Power consumption of RAS at South sea**

| Month | Power consumption (kWh) |         |           |
|-------|-------------------------|---------|-----------|
|       | Pump                    | HP      | Sum       |
| Jan.  | 54,119                  | 146,359 | 200,478   |
| Feb.  | 48,881                  | 142,458 | 191,339   |
| Mar.  | 54,119                  | 136,247 | 190,365   |
| Apr.  | 52,373                  | 94,112  | 146,484   |
| May   | 54,119                  | 61,410  | 115,528   |
| Jun.  | 52,373                  | 28,554  | 80,927    |
| Jul.  | 54,119                  | 10,205  | 64,324    |
| Aug.  | 54,119                  | 7,849   | 61,967    |
| Sep.  | 52,373                  | 12,636  | 65,009    |
| Oct.  | 54,119                  | 25,856  | 79,974    |
| Nov.  | 52,373                  | 63,803  | 116,176   |
| Dec.  | 54,119                  | 123,837 | 177,955   |
| Total | 637,202                 | 853,325 | 1,490,527 |

가장 많았고, 일사량이 가장 적은 12월에 가장 적었다. 이는 태양광 발전량이 시뮬레이션에 사용된 5개의 입력 데이터 가운데 일사량과 가장 큰 상관성이 있음을 나타낸다. 연간 발전량의 총합은 서해, 남해, 동해, 제주의 순으로 높게 나타났다.

**태양광 발전에 의한 에너지 절감량 분석**

Table 12~Table 14는 양식장 소재 해역별, 수조 형태

**Table 11. Power generation from PV at South sea**

| Month | PV generation (kWh) |         |         |
|-------|---------------------|---------|---------|
|       | A-type              | B-type  | C-type  |
| Jan.  | 22,457              | 31,012  | 36,976  |
| Feb.  | 22,176              | 30,625  | 36,514  |
| Mar.  | 26,656              | 36,811  | 43,890  |
| Apr.  | 27,076              | 37,390  | 44,580  |
| May   | 29,496              | 40,733  | 48,566  |
| Jun.  | 27,954              | 38,603  | 46,027  |
| Jul.  | 26,749              | 36,939  | 44,043  |
| Aug.  | 26,167              | 36,135  | 43,084  |
| Sep.  | 24,355              | 33,634  | 40,102  |
| Oct.  | 23,630              | 32,633  | 38,908  |
| Nov.  | 20,608              | 28,459  | 33,931  |
| Dec.  | 21,820              | 30,133  | 35,928  |
| Total | 299,146             | 413,106 | 492,550 |

별, 순환율별 태양광 발전에 의한 에너지 절감률을 나타낸다. Table에서 ‘Power Cons.’는 소비 전력량, ‘PV Gen.’은 태양광 발전량을 각각 나타낸다. 에너지 절감률  $ES$  (%)는 태양광 발전량  $P_g$ 를 HP 시스템의 전체 소비 전력량  $P_c$ 로 나눈 식 (6)을 이용하였다.

$$ES = \frac{P_g}{P_c} \times 100 \tag{6}$$

**Table 12. Energy saving rate by sea area (tank type: C-type, circulation rate: 10 cycle/day)**

| Month | South sea         |               |                   | Jeju              |               |                   | West sea          |               |                   | East sea          |               |                   |
|-------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|
|       | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) |
| Jan.  | 200,478           | 36,976        | 18                | 105,825           | 33,800        | 32                | 289,320           | 36,969        | 13                | 176,770           | 37,293        | 21                |
| Feb.  | 191,339           | 36,514        | 19                | 109,093           | 33,050        | 30                | 265,363           | 37,232        | 14                | 103,149           | 35,622        | 35                |
| Mar.  | 190,365           | 43,890        | 23                | 118,166           | 42,713        | 36                | 257,500           | 46,696        | 18                | 97,234            | 44,042        | 45                |
| Apr.  | 146,484           | 44,580        | 30                | 94,492            | 44,285        | 47                | 186,061           | 46,640        | 25                | 61,243            | 45,475        | 74                |
| May   | 115,528           | 48,566        | 42                | 79,784            | 46,779        | 59                | 131,739           | 48,503        | 37                | 61,707            | 48,920        | 79                |
| Jun.  | 80,927            | 46,027        | 57                | 63,989            | 43,918        | 69                | 84,696            | 47,664        | 56                | 76,529            | 46,562        | 61                |
| Jul.  | 64,324            | 44,043        | 68                | 82,812            | 44,659        | 54                | 105,550           | 45,362        | 43                | 79,873            | 44,830        | 56                |
| Aug.  | 61,967            | 43,084        | 70                | 107,686           | 41,259        | 38                | 133,560           | 42,317        | 32                | 106,706           | 42,292        | 40                |
| Sep.  | 65,009            | 40,102        | 62                | 87,001            | 37,014        | 43                | 94,469            | 38,953        | 41                | 130,182           | 38,861        | 30                |
| Oct.  | 79,974            | 38,908        | 49                | 63,293            | 37,625        | 59                | 104,056           | 38,693        | 37                | 164,994           | 36,871        | 22                |
| Nov.  | 116,176           | 33,931        | 29                | 53,165            | 32,359        | 61                | 147,178           | 33,884        | 23                | 193,950           | 34,146        | 18                |
| Dec.  | 177,955           | 35,928        | 20                | 83,584            | 33,145        | 40                | 245,462           | 34,590        | 14                | 201,798           | 35,036        | 17                |
| Total | 1,490,527         | 492,550       | 33                | 1,048,889         | 470,606       | 45                | 2,044,954         | 497,502       | 24                | 1,454,135         | 489,950       | 34                |

Table 12에서 해역별 연간 에너지 절감률은 제주가 45%로 가장 높았고, 서해가 24%로 가장 낮았다. 또한, 동해와 남해는 34%와 33%로 거의 비슷한 절감률을 보였다. 이는 해수 온도가 소비 전력량에 큰 영향을 미친 반면 태양광 발전량은 각 해역에서 일사량의 유사성으로 인해 비슷하게 나타났기 때문이다.

Table 13에서 사육조 형태별 에너지 절감률은 A-type일 때 40%로 가장 높고, C-type일 때 33%로 가장 낮았다. 이는 태양광 패널 대수 증가에 따른 발전량 차이보다 사육조의 용적 증가에 따른 에너지 사용량의 증가 폭이

더 크기 때문이다.

Table 14에서 사육수 순환율에 따른 에너지 절감률은 10 cycle/day일 때가 33%로 가장 높았고, 순환율이 2배, 3배로 증가함에 따라 에너지 절감률은 1/2배, 1/3배로 감소하는 추세를 보였다. 이는 식 (1)에서 열부하가 순환율에 비례하므로 소비 전력량 증가로 인해 에너지 절감률은 반비례하게 됨을 의미한다. Fig. 7~Fig. 9는 양식장 소재 해역별, 사육조 형태별, 순환율별 태양광 발전에 의한 에너지 절감률을 그래프로 각각 나타내었다.

**Table 13. Energy saving rate by tank type (sea area: South sea, circulation rate: 10 cycle/day)**

| Month | A-type            |               |                   | B-type            |               |                   | C-type            |               |                   |
|-------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|
|       | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) |
| Jan.  | 97,372            | 22,457        | 23                | 145,299           | 31,012        | 21                | 200,478           | 36,976        | 18                |
| Feb.  | 94,829            | 22,176        | 23                | 138,908           | 30,625        | 22                | 191,339           | 36,514        | 19                |
| Mar.  | 92,430            | 26,656        | 29                | 139,429           | 36,811        | 26                | 190,365           | 43,890        | 23                |
| Apr.  | 73,071            | 27,076        | 37                | 107,441           | 37,390        | 35                | 146,484           | 44,580        | 30                |
| May   | 58,724            | 29,496        | 50                | 86,062            | 40,733        | 47                | 115,528           | 48,566        | 42                |
| Jun.  | 41,852            | 27,954        | 67                | 60,820            | 38,603        | 63                | 80,927            | 46,027        | 57                |
| Jul.  | 34,006            | 26,749        | 79                | 48,981            | 36,939        | 75                | 64,324            | 44,043        | 68                |
| Aug.  | 32,984            | 26,167        | 79                | 47,205            | 36,135        | 77                | 61,967            | 43,084        | 70                |
| Sep.  | 34,131            | 24,355        | 71                | 49,270            | 33,634        | 68                | 65,009            | 40,102        | 62                |
| Oct.  | 41,525            | 23,630        | 57                | 60,303            | 32,633        | 54                | 79,974            | 38,908        | 49                |
| Nov.  | 59,182            | 20,608        | 35                | 86,780            | 28,459        | 33                | 116,176           | 33,931        | 29                |
| Dec.  | 87,636            | 21,820        | 25                | 130,464           | 30,133        | 23                | 177,955           | 35,928        | 20                |
| Total | 747,743           | 299,146       | 40                | 1,100,960         | 413,106       | 38                | 1,490,527         | 492,550       | 33                |

**Table 14. Energy saving rate by circulation rate (sea area: South sea, tank type: C-type)**

| Month | 10 (cycle/day)    |               |                   | 20 (cycle/day)    |               |                   | 30 (cycle/day)    |               |                   |
|-------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|
|       | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) | Power Cons. (kWh) | PV Gen. (kWh) | Energy Saving (%) |
| Jan.  | 200,478           | 36,976        | 18                | 388,453           | 36,976        | 10                | 560,651           | 36,976        | 7                 |
| Feb.  | 191,339           | 36,514        | 19                | 375,092           | 36,514        | 10                | 542,438           | 36,514        | 7                 |
| Mar.  | 190,365           | 43,890        | 23                | 372,707           | 43,890        | 12                | 542,309           | 43,890        | 8                 |
| Apr.  | 146,484           | 44,580        | 30                | 286,848           | 44,580        | 16                | 421,861           | 44,580        | 11                |
| May   | 115,528           | 48,566        | 42                | 229,235           | 48,566        | 21                | 336,899           | 48,566        | 14                |
| Jun.  | 80,927            | 46,027        | 57                | 160,222           | 46,027        | 29                | 235,429           | 46,027        | 20                |
| Jul.  | 64,324            | 44,043        | 68                | 128,145           | 44,043        | 34                | 188,216           | 44,043        | 23                |
| Aug.  | 61,967            | 43,084        | 70                | 122,950           | 43,084        | 35                | 178,650           | 43,084        | 24                |
| Sep.  | 65,009            | 40,102        | 62                | 133,209           | 40,102        | 30                | 195,659           | 40,102        | 20                |
| Oct.  | 79,974            | 38,908        | 49                | 158,380           | 38,908        | 25                | 231,878           | 38,908        | 17                |
| Nov.  | 116,176           | 33,931        | 29                | 225,119           | 33,931        | 15                | 329,177           | 33,931        | 10                |
| Dec.  | 177,955           | 35,928        | 20                | 343,887           | 35,928        | 10                | 500,485           | 35,928        | 7                 |
| Total | 1,490,527         | 492,550       | 33                | 2,924,246         | 492,550       | 17                | 4,263,653         | 492,550       | 12                |

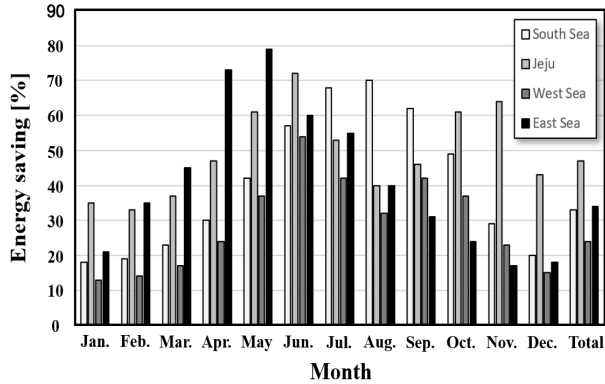


Fig. 7. Trend of energy saving by sea area.

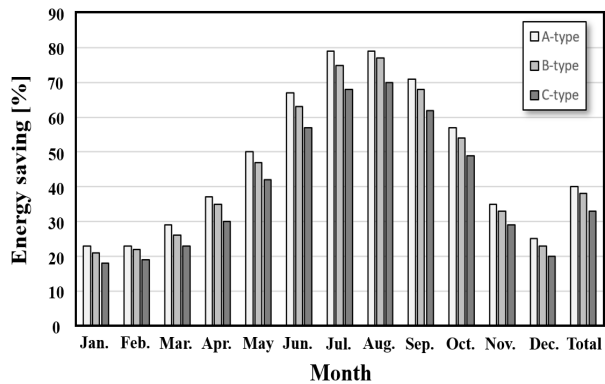


Fig. 8. Trend of energy saving by tank type.

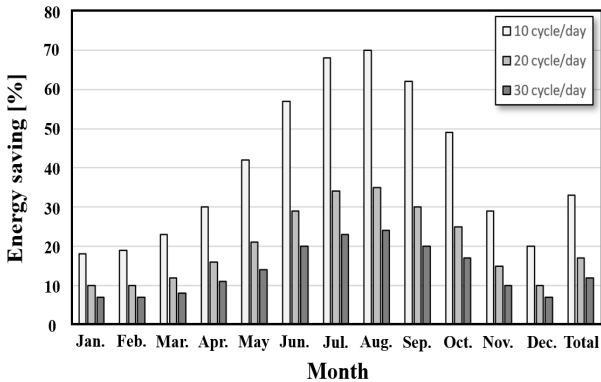


Fig. 9. Trend of energy saving by circulation rate.

**비상 발전기 대체용 ESS의 용량 산정**

Table 15는 남해, C-type 수조, 순환율 10 cycle/day를 가정한 RAS 양식장용 비상 발전기의 PG법 계산 결과이다. 산정 과정은 Table 7과 Table 8을 각각 참고하였다. 부하 정격 출력의 합  $\Sigma P_L$ 은 542.41 kW, 최대 부하 시 부하의 출력  $P_m$ 은 460.35 kW로 계산되었다. 이를 통해 가동 시간에 따른 ESS 용량은 PG1, PG2, PG3 중 계산

**Table 15. Result of PG method**

| PG1 | PG2   | PG3   | Selected method | Active power (kW) |
|-----|-------|-------|-----------------|-------------------|
| 784 | 1,666 | 1,217 | PG2             | 1,333             |

**Table 16. Capacity of ESS according to operation time**

| Operating hour (hour) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ESS Capacity (kWh)    | 1,333 | 2,666 | 3,999 | 5,332 | 6,665 |

결과가 가장 큰 PG2를 근거로 산정되었다. 이 PG2 값은 피상전력(kVA) 값이므로 발전기의 역률 0.8을 고려하면 ESS의 용량(kWh)은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)에서  $Y$  (kWh)는 ESS의 용량이며,  $x_h$ 는 ESS의 가동 시간(hour)이다. 이 식을 통해 가동 시간을 1시간부터 5시간까지 1시간 간격으로 구분하여 산정한 ESS의 용량을 Table 16에 나타내었다.

$$Y = 1,333 x_h \tag{7}$$

**결론**

본 연구에서는 육상 RAS 양식장의 에너지 절감을 위하여 해수 열원 HP 시스템과 ESS 연계 태양광 발전 시스템을 제안하고, 양식장 소재 해역별, 사육조 형태별, 순환율별 소비 전력량 및 태양광 발전량을 TRNSYS 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 또한, 이 분석 결과를 통해 태양광 발전에 의한 에너지 절감 효과를 분석하였다. 마지막으로 기존의 유류 디젤 비상 발전기를 ESS로 대체하기 위해 가동 시간에 따른 ESS의 용량을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 태양광 발전에 의한 해역별 에너지 절감률은 제주가 45%로 가장 높고, 서해가 24%로 가장 낮았다. 동해와 남해는 각각 34%, 33%로 거의 유사하게 나타났다. 이는 해수 온도가 소비 전력량에 큰 영향을 미친 반면 태양광 발전량은 각 해역에서 일사량의 유사성으로 인해 비슷하게 나타났기 때문이다.

(2) 사육조 형태별 에너지 절감률은 A-type, B-type, C-type 순으로 40%, 38%, 33%로 각각 나타났다. 이는 태양광 패널 대수 증가에 따른 발전량 차이는 미소한

반면 사육조의 용적 증가에 따른 에너지 사용량의 증가 폭이 더 크기 때문이다.

(3) 사육수 순환율 변동에 따른 에너지 절감률은 10 cycle/day일 때 33%로 가장 높았고, 순환율이 2배, 3배로 증가함에 따라 에너지 절감률은 1/2배, 1/3배로 각각 감소하였다. 이는 소비 전력량이 순환율에 비례하여 증가하기 때문이다.

(4) ESS의 사용 시간별 용량은 PG2 방법을 이용하여 남해 소재, C-type 수조, 순환율 10 cycle/day를 가정하여 산정되었으며, 5시간 가동 기준 약 6,700 kWh로 나타났다. ESS는 초기 설치비용이 많이 들어 기존의 유류 디젤 발전기를 단시간 내에 완전히 대체하기에는 어려움이 있다. 그러나 이 장치는 태양광 발전의 효율적 이용, 탈 탄소화 장점이 커 향후 기술 발전에 따른 가격 성능 향상과 더불어 사용이 보편화 될 것으로 기대된다.

본 논문의 연구 결과는 스마트 양식장의 에너지 절감 및 제로 에너지 실현을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 본 연구 결과는 양식장 소재 해역과 양식장 규모, 사육수 순환율을 다양한 경우의 수로 가정하여 얻은 것이므로 모든 양식장에 그대로 적용하기는 쉽지 않다. 사용자는 연구 결과의 경향성을 분석하여 대상 양식장에 적절히 적용함이 바람직할 것으로 기대된다. 또한, HP 시스템은 24시간 가동을 전제로 하였으며, 설계된 ESS의 용량은 HP 시스템의 소비 전력량만을 고려한 것임에 주의할 필요가 있다.

## 사 사

본 연구성과물은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2021R111A3049015).

## References

Choi HS, Na JH, Lee HY and Noh JY. 2021. The effect of remodeling replacement of photovoltaic power generation system in fish farm: analysis of energy saving effect through simulation. *Current Photovoltaic Research* 9, 11-16. <https://doi.org/10.21218/CPR.2021.9.1.011>.  
Climate data from Passive House Institute Korea. 2021. Retrieved from <http://climate.onebuilding.org/> on Aug 1, 2023.

Goo JB, Lee SY, Park DH and Jo SK. 2023. Digital twin-based smart aquafarm-case study. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences* 48, 1479-1490. <https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.11.1479>.  
Ion VI, Popescu F, Coman G and Fratița M. 2022. Heat requirement in an indoor recirculating aquaculture system. *Energy Reports* 8, 11707-11714. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.245>.  
Jeong H, Heo TW and Lee IW. 2021. Domestic smart Aqua-farming Technology, *ETRI Electronics and Telecommunication Trends* 36, 62-73. <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360507>.  
Jeong HS, Ryu JH and Jeong SK. 2024. Power consumption prediction model based on artificial neural networks for seawater source heat pump system in recirculating aquaculture system fish farm. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology* 60, 87-99. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2024.60.1.087>.  
Kim JW, Lee HM, Choi MJ, Kim DS and Yoon JH. 2023. Operational data based performance evaluation of building integrated photovoltaic system. *SAREK 2023 Summer Annual Conference*, 1127-1130.  
Kwon OK and Seol WS. 2013. Research and development of sea water heat pump. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering* 17, 7-13. <https://doi.org/10.12813/kieae.2017.17.5.069>.  
Lee JH, Kim JO. 2018. A study on the improvement of the arithmetic for emergency generator capacity. *KIEE* 67, 1517-1522. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.11.1517>.  
Lee KR, Lee YS, Lim JH. 2019. Evaluation on the photovoltaic module arrangement planning considering shading conditions in apartment buildings. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 35, 169-179. [https://doi.org/10.5659/JAIK\\_SC.2019.35.5.169](https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2019.35.5.169).  
Ma CM, Choi S, Yoon MG, Kim CH and Lee CR. 2022. A study on strategies for achieving carbon neutrality in the aquaculture industry -focusing on land-based fish aquaculture-. *Korean Maritime Institute*, 1-195.  
Oak YS. 2007. Analysis of the current state of flatfish aquaculture and its future development directions. *KMI Journal* 271, 44-60.  
Open met data portal. 2022. Retrieved from <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do> on Aug 1, 2023.

- Park SH. 2020. Effect of indoor radiant temperature and thermal comfort by building thermal performance on building energy consumption. Sungkyunkwan University, Korea, 1-149.
- Wu X, Tian Z and Guo J. 2022. A review of the theoretical research and practical progress of carbon neutrality. *Sustainable Operations and Computers* 3, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.10.001>.
- Yoo SJ. 2021. A study on the application of PCS and ESS for emergency power source in apartment. Soongsil University, Korea, 1-112.
- Yoon MG, Kim TH and Jeong SK. 2023. Thermal load analysis of tank culture system for applying seawater source heat pump. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology* 59, 155-163. <https://db.koreascholar.com/Article/Detail/422059>.