

디지털 트윈 기반 스마트 양식 - 사례 연구

구자빈*, 이상연°, 박대현*, 조성균*

Digital Twin-Based Smart Aquafarm - Case Study

Jabin Goo*, Sang-yeon Lee°, Dae-heon Park*, Seng-kyoun Jo*

요약

지구온난화에 따른 기후변화와 환경오염, 노동력 감소에 대한 해결 방안과 수산물 수요의 증가에 대한 대응 방안으로써 수산업의 효율성 및 지속 가능성 개선의 필요성이 증대되고 있다. 이에 농업이나 축산업 뿐만 아니라 수산업 분야에도 규모화 및 친환경화, 생산성 향상, 유통 및 수출의 효율화를 도모하기 위해 디지털 트윈과 같은 ICT 기술의 적용이 시도되고 있다. 디지털 트윈 기술을 활용한 스마트 양식의 도입은 장기간 양질의 데이터를 수집하고, 축적한 데이터를 활용하여 디지털 및 지능화를 가능하게 함으로써 수산업의 경쟁력과 직결되어 더욱 중요해지고 있다. 본 논문에서는 농·축·수산 분야에서 경제성 향상 및 생육환경의 최적화 방안으로 떠오르고 있는 디지털 트윈 기술의 적용 사례에 대해 살펴본다. 특히 디지털 트윈을 양식 분야에 적용하여 스마트 양식을 제공하는 서비스 및 개발 단계에 대해 알아본다. 또한, 양식장으로의 디지털 트윈 기술 적용을 위해 시뮬레이션을 활용하여 가상의 순환여과식 육상양식장 에너지 모델을 개발하고, 에너지 최적 관리 방안 도출을 목적으로 현실 양식장과의 데이터 연동을 통한 현장 운영 스케줄 도출 및 수온 제어 세분화 프로세스에 따른 현장 재현율 향상을 통해 모델 예측 성능을 개선한 연구 사례에 대하여 기술한다.

키워드 : 디지털 트윈, 스마트팜, 스마트 양식, 순환 여과 양식시스템, 에너지 분석

Key Words : Digital twin, Smart farm, Smart aquafarm, RAS(Recirculating aquaculture system), energy analysis

ABSTRACT

The increasing need to improve the efficiency and sustainability of the fisheries industry in response to climate change, environmental pollution, and the decline of the labor force has led to efforts in implementing ICT technologies such as digital twins. This applies not only to agriculture and livestock but also to the fisheries sector, aiming for scalability and enhanced productivity. The adoption of smart aquafarming through the utilization of digital twins enables long-term data collection and leverages accumulated data to enable digitization and intelligence, thereby directly impacting the competitiveness of the fisheries industry. This paper examines case studies of the application of digital twins, an emerging technology that offers economic improvements and optimal growth environments in the fields of agriculture, livestock, and fisheries. It specifically focuses on the use of digital twins in aquaculture, providing insights into the services and

* 본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2021-0-00225, 최적의 수산 양식 설계·운영을 위한 디지털 아쿠아 트윈 핵심 플랫폼 기술 개발).

• First Author : Institution of Urban Science, University of Seoul, Seoul, jabin@uos.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : Agriculture, Animal & Aquaculture Intelligence Research Center, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, sylee2023@etri.re.kr, 정희원

* Agriculture, Animal & Aquaculture Intelligence Research Center, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon
 논문번호 : 202307-143, Received June 29, 2023; Revised August 24, 2023; Accepted August 24, 2023

development stages of smart aquafarming by applying digital twins to aquaculture. Furthermore, this paper describes a case that enhances predictive performance to derive energy optimal management plan by improving the replication accuracy of real-world operational schedules and temperature control subdivision processes through the development of a virtual energy model using simulations and data integration with on-site aquafarm.

I. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화에 따른 수산자원 감소, 환경오염(해양쓰레기, 방사능 오염수 등), 어촌의 고령화로 인한 노동력 감소, 에너지비용 증가에 따른 어가의 경영난에 따른 지속 가능성 위협은 세계적으로 관심사가 되고 있다. 이에 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷(IoT: Internet of Things) 등과 같은 정보통신기술을(ICT: Information and Communications Technology) 활용하여 수산업계의 문제들을 극복하고자 하는 스마트 양식에 관한 관심이 세계적으로 증가하고 있으며, 스마트 양식 시장은 지속해서 성장할 전망이다. Vantage Market Research(2023)는 세계 스마트 양식 시장의 가치를 2022년 2,896억 달러에서 2030년까지 5.5%의 CAGR(Compound Annual Growth Rate)으로 4,212억 달러에 도달할 것으로 예상하고 있다¹⁾. 이러한 원동력으로는 세계 수산물의 수요 증가와 수산업에서의 기술 고도화를 꼽을 수 있으며, 이를 기반으로 수산업의 효율성과 지속 가능성을 개선하고 있다.

국내의 경우, 1인당 연간 수산물 소비량은 58.4kg으로 주요국 중 가장 높은 소비 경향을 나타낸다²⁾. 이에 따라, 양식어업의 면적은 2018년 총 161,320ha로 2010년 141,015ha에 비해 14.4% 증가하였다. 그에 반해, 국내 양식어가 수는 2010년 17,386호에 비해 2018년 15,323호로 약 19% 감소하여 어가의 기업·대형화가 진행되고 있음을 나타내었다³⁾. 이와 관련하여 우리나라는 세계적인 시류에 맞추어 과거 노동집약적인 양식 방법을 기술집약적 양식 방법으로 개선함으로써 양식의 효율성 개선과 함께 환경적 영향으로부터 안전한 먹거리를 생산·관리하고 환경오염에 대한 문제를 해결하고자 많은 노력들이 수행되고 있다. 특히, 해양수산부는 4단계에 걸친 스마트 양식 기술 발전 계획을 공표함으로써, 2019년 기준 약 2.5%인 스마트 양식 보급률을 스마트 양식 활성화를 통해 2030년 약 50%까지 확대한다는 목표를 수립하고 있다⁴⁾.

스마트 양식은 양식 어류의 종자생산에서부터 양성 및 수확에 이르기까지 전 과정에 지능-ICT 기술을 접목하여 규모화 및 친환경화, 생산성 향상, 유통 및 수출의

효율화를 도모하는 양식 시스템을 의미한다. 스마트 양식을 위한 ICT 기술의 도입은 더불어 장기간 양질의 데이터를 수집하고, 축적한 데이터를 활용하여 디지털 및 지능화를 가능하게 함으로써 수산업의 경쟁력과 직결되어 더욱 중요해지고 있다.

수산 분야에 적용되는 ICT 기술은 머신러닝, 인공지능, IoT 센서, 빅데이터, 디지털 트윈 등이 있다. 디지털 트윈은 실제 공간에 존재하는 물리적 대상의 성질, 형상, 상태 등의 정보를 소프트웨어를 이용한 가상의 세계에 동일하게 구축하고, 다양한 시뮬레이션과 두 공간간의 상호연동을 통하여 의미 있는 가치를 창출할 수 있는 기술로 정의될 수 있다⁵⁾. 디지털 트윈은 다학제간 문제를 해결함으로써 의사결정 지원, 시뮬레이션을 통한 시스템 개발 및 검증, 시스템 전주기에 대한 정보 지속성의 보증, 다양한 기술의 통합 등의 기능을 가지고 있어 디지털 트윈 기술은 제조, 자동차, 에너지 등 산업 분야를 중심으로 발전하여 다양한 분야로 확대되고 있다⁶⁾.

디지털 트윈의 활용을 통해 물리적 시스템의 실시간 최적화가 가능하다는 장점에 따라 농·축·수산 분야에서도 디지털 트윈 기술의 적용이 시도되고 있다. 그러나, 농·축·수산은 살아있는 생물을 대상으로 하므로 생물이 지닌 다양한 조건들을 최적화시키기 어려워 디지털 트윈 기술의 활용은 초기 단계에 머물러있다. 특히, 어류는 농작물이나 가축보다 생육환경관리에 민감하며 질병, 양성, 에너지, 신선도 유지, 유통, 소비에 이르기까지 많은 변수가 존재한다. 따라서, 수산업으로의 디지털 트윈 적용은 다양한 변수에 대한 최적화를 통해 얻을 수 있는 경제적 효과가 클 것으로 기대된다. 수산업에서의 디지털 트윈 기술은 생산에서부터 가공, 유통, 소비, 서비스까지 스마트 양식 산업 전 과정에서 활용되는 다양한 기술 융합을 가능하게 하며, 시뮬레이션을 기반으로 환경 관리의 최적화와 양식 시스템의 요소 개발 및 검증에 활용될 수 있다. 예를 들어, 디지털 트윈 적용을 통해 사료효율과 에너지효율을 향상함으로써 어류 농가 운영비용의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 사료비와 에너지비용의 절감이 가능하다. 또한 성장 예측을 통한 출하 시기 조절, 생산량 조절을 통한 어가의 소득 증가

에 직접적으로 이바지할 수 있다.

ICT 기술의 적용에 있어 스마트 양식 산업의 주요 이슈들은 다음과 같다. 1) 스마트 양식 시스템에 ICT 기술의 적용을 위해서는 양질의 데이터를 장기간 안정적으로 축적하는 것이 선행되어야 한다. 2) 데이터 축적 및 관리를 위해서는 다양한 기업, 연구자, 어민 등이 활용할 수 있는 통합 플랫폼이 구축되어야 한다. 3) 데이터의 형태 및 사용자의 목적에 맞게 데이터를 축적하고 가공하는 것이 필요하다. 4) 어류 양식장에서는 수온 조절용 히트펌프, 질병 예방을 위한 물리적·생물학적 여과기와 같은 살균장치, 용존산소량 관리를 위한 산소 발생기나 수차, 양식수 순환을 위한 펌프 등 다양한 설비가 이용되고 있다. 이에 따른 에너지비용은 양식어가 운영비의 주된 부분을 차지하며, 에너지비용 절감을 위한 많은 노력이 수행되고 있다⁵⁾. 5) 에너지비용과 함께 운영비의 많은 비중을 차지하는 항목 중 하나는 어류의 양성 관리 및 사료 비용이다. 양성 관리의 최적화를 통한 사료 효율성 향상과 성장 시기 예측을 통한 출하 시기 조절은 양식어가의 경제적 이득에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 어종별 양성 관리 기술과 성장 예측 모델의 개발 및 고도화가 필요하다. 6) 어류는 물에서 양식되는 수생생물이기 때문에 양식수의 적절한 수질 환경 유지가 중요하다. 최근 일본의 원전수 방류나 해양 오염 등의 문제가 더욱더 심화됨에 따라, 환경을 고려한 지속 가능한 스마트 양식으로 발전의 필요성이 증대되고 있다.

국내 스마트 양식 산업의 발전과 더불어 국가 경쟁력 확보를 위해서는 스마트 양식 산업이 직면해 있는 문제들을 해결하고, 에너지비용 최소화, 시스템 관리의 최적화, 생산성 향상, 물류 및 유통의 효율화, 서비스 기술 개발, 가치사슬을 개선하는 방향으로 스마트 양식 산업이 발전해 나가야 한다. 하지만 수산업은 농업이나 축산업에 비해 ICT 기술의 적용이 느리며, 디지털 트윈의 적용도 뒤처지고 있다. 최근 프랑스, 이탈리아, 노르웨이 등 유럽을 중심으로 디지털 트윈 개발이 진행되고 있으며 수산 분야로의 디지털 트윈 적용을 위한 연구가 수행되고 있다⁷⁻¹¹⁾. 또한, 국내에서도 양식장 구조의 최적 설계, 최적 양성 관리, 에너지 관리 및 최적화, 수처리 시스템 운영을 위한 디지털 트윈 개발이 진행되고 있다^{5,7)}. 하지만 아직 초기 단계로서 디지털 트윈 적용을 위한 표준 제시, 개념 정의, 기대효과 제시 등에 머물고 있다¹²⁾.

이에 본 논문에서는 다양한 분야에서 활용되고 있는 디지털 트윈 기술이 농·축·수산 분야에 적용된 사례를 분석하고, 스마트 양식장으로서의 디지털 트윈 기술 적용

을 위한 양식장 에너지 모델 개발 및 에너지 최적 관리 방안 도출 사례를 알아본다.

II. 농·축·수산 분야의 디지털 트윈

2.1 농·축·수산 분야 디지털 트윈의 필요성

작물, 가축, 어류 등의 적정 생육을 위해서는 생물의 호흡, 대사활동, 에너지, 환경조절 등에 따른 다양한 생육 조건들을 맞춰야 한다. 따라서, 농가 및 어가의 소득 증대를 위해서는 생물의 생육 환경을 적절히 조성하는 것이 중요하다. 예를 들어, 그림 1에 나타낸 바와 같이 토마토 재배 시 노지에서 재배하는 경우보다 토마토의 생육 조건을 적절하게 조성할 수 있는 유리온실에서 온도, CO₂, 인공광 등의 환경조절을 통해 10배 이상의 토마토를 생산할 수 있다¹³⁾.

우리나라는 사계절이 뚜렷하여 농·축·수산 생산시설의 환경조절이 더욱 어려우며 에너지비용 등 환경관리 비용이 가중된다. 실제로 온실, 축사, 양식장 등이 포함된 동식물관련시설의 2020년 건축물 용도별 전력사용량 비율은 동식물관련시설이 많이 분포되어 있는 광역시 외의 지역에서 업무시설보다도 높은 것으로 분석된 바 있다¹⁴⁾. 추가로 농·축·수산 생산물은 소비기한이 공산품에 비해 짧아 신선도를 고려한 유통·물류의 최적화가 필요하다. 이와 더불어, 축산·어류 농가 운영비용의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 항목 중 하나인 사료비의 절감을 위해 사료효율을 높이는 것은 농가 및 어가의 소득에 직접적인 영향을 미친다.

따라서, 농·축·수산 분야로의 디지털 트윈 기술 적용은 에너지비용 및 사료비 절감을 통한 경제성 향상, 성

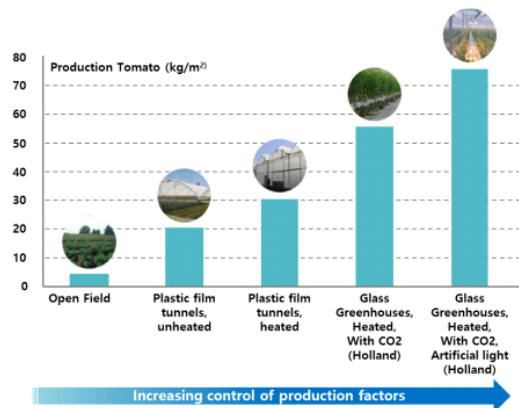


그림 1. 생산환경조절에 따른 단위면적당 생산량 (토마토) 변화^[13]
Fig. 1. Tomato production according to environmental control^[13]

장 예측을 통한 출하 시기 조절에 따른 가격 조절, 유통물류의 최적화, 가치사슬 구조의 개선 등의 효과를 기대할 수 있다. 디지털 트윈 기술은 생물이 지닌 까다로운 조건들을 최적화할 수 있으므로 농·축·수산 산업에 미치는 경제적 효과가 클 것으로 판단된다.

2.2 농·축·수산 분야의 디지털 트윈 사례

디지털 트윈 기술은 제조업 분야를 중심으로 발전하기 시작하여 다양한 분야로 확장되고 있다. 농·축·수산 분야에서의 디지털 트윈 개발은 2018년부터 활발히 진행되어 농업생산물, 농업시설, 농업기계, 농산물 공급망 및 물류 등을 대상으로 개발되었다. 그림 2는 농·축·수산 분야에서 개발된 디지털 트윈의 서비스 분류를 나타낸다. 농·축·수산 분야에서의 디지털 트윈은 주로 1) 에너지 사용량 분석, 2) 시스템 고장 분석 및 예측, 3) 실시간 모니터링, 4) 최적화 및 고도화, 5) 기술 융합 서비스를 위해 개발되었다. 디지털 트윈의 적용은 생산성 향상, 문제 발생 시 원인 규명, 농업생산물의 품질 향상, 생육 조건 관리, 질병의 조기 진단, 생산물 유통 및 물류, 비용 절감, 자연 친화적 운영 등의 장점이 있다. 또한, 농·축·수산 분야의 디지털 트윈은 1) 정보의 융합, 2) 복잡한 시스템의 맞춤형 큐레이션, 3) 운영 간소화, 4) 불확실성 정량화, 5) 인간 중심 지능의 부가가치를 가진다[6].

농·축·수산 분야의 디지털 트윈은 농장, 실내 구조물 등의 물리 객체와 가축, 작물 등의 생물 객체로 이루어진다. 농업 분야의 디지털 트윈의 상용화를 위해서는 생물 객체의 디지털 트윈 구현이 핵심이지만, 현재까지 대부분의 농·축·수산 분야 디지털 트윈은 생물을 고려

하지 않은 물리 객체를 대상으로만 개발되었다. 또한, 농업 분야에서 개발된 대부분의 가상 모형은 기술성숙도(TRL: Technology Readiness Level)를 기준으로 아직 개념적 수준(Concept Kevel)에 머물러있다[6]. 따라서, 농·축·수산 분야의 디지털 트윈은 실용화 및 산업화 단계로 넘어가기 위한 적극적이며 지속적인 기술 개발이 필요하다.

농·축·수산 분야에 디지털 트윈이 적용된 사례로써 스마트 축사의 환경 제어 및 관리, 에너지 최적화, 안전 관리 기술 등을 위한 디지털 트윈 개발을 들 수 있다[15]. 그림 3과 같이 실제 축사에 설치된 센서로부터 현장의 환경 데이터를 수집하고, 실측데이터를 기반으로 운영 및 관리의 최적화를 위한 시뮬레이션을 수행한다. 다양한 시나리오 분석을 통해 최종적으로 제어를 위한 의사결정을 수행하고, 실제 축사의 제어에 적용된다. 이처럼 디지털 트윈을 이용하여 축사 환경, 제어, 운영에 대한 지능화를 실현할 수 있다.

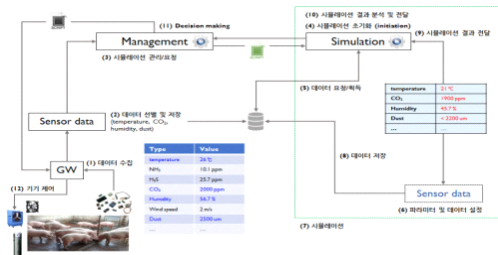


그림 3. 디지털 트윈 기반 스마트 축사를 이용한 시뮬레이션 정보 흐름도[15]
Fig. 3. Information flow of smart livestock house using digital twin[15]

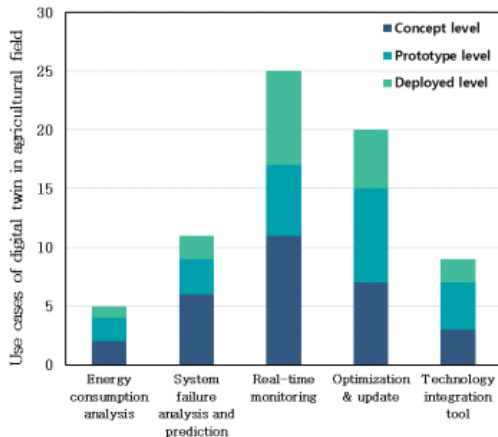


그림 2. 농·축·수산 분야 디지털 트윈의 서비스 분류[6]
Fig. 2. Digital twin service in agriculture, livestock, and fishery[6]

III. 디지털 트윈 기반 스마트 양식

본 장에서는 디지털 트윈 기술을 수산 양식 분야에 적용하여 스마트 양식을 제공하는 방안과 이를 활용한 사례로써, 디지털 트윈을 활용한 스마트 양식장의 에너지 모델 개발 및 분석 사례에 대해 기술한다.

3.1 디지털 트윈 기반 스마트 양식 개요

어류는 다른 농작물 또는 가축과 달리 생육 환경에 대한 의존성과 민감도가 높다. 수온, 용존산소, 수질 등 양식수 환경의 최적 관리는 생산성과 직결된다. 또한, 양식수 환경 관리에 실패하는 경우 집단 폐사 등과 같은 문제로 인한 경제적 위험 부담이 다른 산업에 비해 크다. 따라서 디지털 트윈 기술 적용을 통한 위험 조기 예측 및 스마트 양식 시스템 최적화에 따른 경제적 효과

가 다른 산업에 비해 클 것으로 전망된다.

디지털 트윈 기술을 활용하는 경우, 표 1에서와 같이 스마트 양식에 다양한 서비스 제공이 가능하다. 디지털 트윈 기반 스마트 양식의 서비스는 크게 1) 데이터 관리 서비스, 2) 최적화 서비스, 3) 지능화 서비스의 3가지로 분류된다. 이를 세분화하면 1-1) 사육환경 및 양성정보 모니터링, 2-1) 사육환경 제어 및 자동화, 2-2) 에너지 절감 및 관리, 2-3) 양성 관리 및 생산량 예측, 2-4) 생육 단계별 질병 관리, 3-1) 지능화 플랫폼의 6가지의 소분류로 분류될 수 있다¹²⁾. 디지털 트윈을 활용하여 스마트 양식에 제공 가능한 서비스는 기존에 제시한 서비스에서 더 나아가 어가 관리, 작업자 관리, 수질관리, 환경 부하 관리, 시장 가격 예측, 콜드체인 최적화, 유통 단계에서의 신선도 예측 및 유지 등 다양한 서비스가 제공될 수 있다.

‘디지털 트윈 기술 K-로드맵’(2021)에서는 기술 요소 분석을 통해 디지털 트윈의 발전 단계를 5단계로 제시하였다. 또한 디지털 트윈 기술의 13개 응용·확산 분야 중 하나로 농축·수산·환경 분야를 설정하였다¹⁶⁾.

표 1. 디지털 트윈 기반 아쿠아팜 서비스의 분류 및 개요 [12]
Table 1. Classification of aquafarm service based on digital twin[12]

Category	Subcategory	Service overview
Data management service	Breeding environment and growth information monitoring	• Data collection and management service for smart aquafarm including growth environment and breeding information
	Breeding environment control and automation	• Control and automation service for optimal management
Optimization service	Energy conservation and management	• Energy optimization management service
	Growth management and production forecasting	• Optimal breeding management and production forecasting service for growth stage of fish
	Disease management by growth stage	• Ensuring production stability through disease prevention of fish
Intelligent service	Intelligent platform	• A data-driven intelligent platform capable of automated control and integrated management

17). 또한, 기존에 제시된 발전 단계에 맞춰 디지털 트윈 기반 스마트 양식의 발전 단계를 나누고 단계별 주요 핵심기술을 제시하였다. 현재 국내 디지털 트윈 기반 스마트 양식 관련 기술 수준은 가상공간에서 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 실제 공간의 환경 제어에 활용하는 2단계 수준에 있다. 따라서, 지속적인 연구 개발을 통해 생산, 유통, 소비의 전 주기 관리, 어류의 생장, 에너지, 질병 관리, 물류 및 유통 등의 최적화를 위한 디지털 트윈 연구가 진행되어야 한다¹²⁾. 그림 4는 디지털 트윈 기반 스마트 양식에 대한 예시를 나타낸다. 실제 양식장에 설치된 센서를 통해 온도, 습도, 수온, 용존 산소, 부유물질 농도 등 다양한 데이터를 수집한다. 수집된 데이터를 기반으로 분석 목적에 따라 설계·에너지·수처리·양성 등의 시뮬레이션을 수행하고, 다양한 시나리오 분석을 통해 최적 제어를 위한 의사결정을 수행한다. 분석된 결과를 통해 도출된 최적 제어는 실제 양식장의 환경 제어에 적용된다.



그림 4. 디지털 트윈 기반 스마트 양식
Fig. 4. Smart aquafarm using digital twin technique

3.2 사례 연구: 디지털 트윈 기반 스마트 양식의 에너지 모델 개발 및 에너지 최적 관리 방안 도출

본 절에서는 양식장 운영에 있어 주요한 요소인 수온과 에너지에 대하여 디지털 트윈을 활용하여 순환여과식 육상양식장 에너지 모델 개발하고, 에너지 최적 관리 방안 도출을 위한 현장 재현을 향상을 통한 예측 성능 개선 사례에 관해 기술한다. 앞서 언급한 바와 같이 국내 수산업은 어가 인구 감소와 더불어 젊은 세대의 이탈에 따른 고령화와 근해 수산자원 감소로 인해 정체되고 있으며, 수산물 먹거리 및 어촌의 지속 가능성이 위협받고 있다. 더불어, 기후변화 및 자연재해로 인한 수산물 피해는 지속해서 증가하고 있다. 이의 대응 방안으로써 수조를 사용하는 순환여과식 육상양식장은 양식에 사용된 물 대부분을 수처리 시설을 통해 어류에 적합한 수질 환경을 재조성하여 사용하는 양식 시스템이다. 따라서, 순환여과식 양식 시스템은 어류에게 최적의 생육

환경이 조성된 양식 용수를 제공할 수 있으나, 고도화된 시스템이 적용됨에 따라 높은 에너지 소비량을 나타낸 다¹⁸⁾. 이러한 현황에서 지속적인 전기 요금의 인상은 양식업계의 또 다른 위기를 초래하고 있으며, 양식장 에너지 효율화의 필요성이 증대되고 있다.

이러한 위기를 극복하는 수단으로, 순환여과식 육상 양식장으로의 ICT 및 디지털 트윈 기술 도입은 가상의 양식장 모델과 실제 양식장 간의 데이터 및 제어 연동을 통하여 신속하고 예측 가능한 양식 기술력을 확보함과 동시에 양식장 운영 환경 예측, 에너지 최적 제어를 통한 생산성 증대가 가능할 것으로 예상된다¹⁹⁾. 하지만, 기존 육상양식장의 현장 및 경험 의존적 특성으로 인해 육상양식장 에너지 모델 개발에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 또한, 개발된 모델의 현장 단계에서의 낮은 재현율은 예측 성능의 장애로 이어지므로 현장 재현을 향상을 위한 양식장 에너지 모델의 예측 성능 개선이 필요하다. 이에 본 절에서는 BES(Building Energy Simulation) 프로그램을 활용하여 순환여과식 육상양식장 에너지 모델을 개발하고, 에너지 최적 관리 방안 도출을 목적으로 측정 데이터 분석 기반 현장 운영 스케줄 도출 및 수온 제어 세분화 프로세스에 따른 현장 재현을 향상을 통한 모델 예측 성능 개선에 관한 연구 사례에 대해 기술한다.

3.2.1 대상 양식장

디지털 트윈 기반 순환여과식 육상양식장 에너지 모델 개발을 위한 대상 양식장은 경상남도 밀양에 위치한 순환여과식 뱀장이 육상양식장으로 그림 5와 같다. 대상 양식장은 사무실, 양식장, 수처리 기기실로 구성되며, 본 연구에서는 실제 뱀장이 사용되는 양식장만을 대상으로 하였다. 양식장의 바닥은 200mm 두께의 콘크리트, 외벽은 100mm 두께의 샌드위치 판넬, 지붕은 PET(Polyethylene Terephthalate) 천막을 활용한 막 구조로 구성된다.

양식장은 그림 6과 같이 수조 지름 5.2m, 수심 1m의 PP(Polypropylene) 재질로 제작된 원형 수조가 한 line 당 8개씩 총 8개의 line으로 구성되어 있다. 각 line은 뱀장어 양식 단계에 따라 line 별 제어 및 운영이 이루어진다. 하나의 line은 그림 7과 같이 물리적 여과로써 드림 필터와 생물학적 여과조 2개소 및 가열조를 공유한다. 가열조는 물리적 및 생물학적 여과조를 거쳐 정화된 사육수를 히트펌프 3대와 전기보일러 1대를 통해 간접 가열하여 뱀장어의 생육 적온인 27~28°C의 설정온도로 유지한다. 각 수조에는 DO(Dissolved oxygen, 용존산소) 용해 및 수조 내 물 회전을 목적으로 산소 용해기와 용해

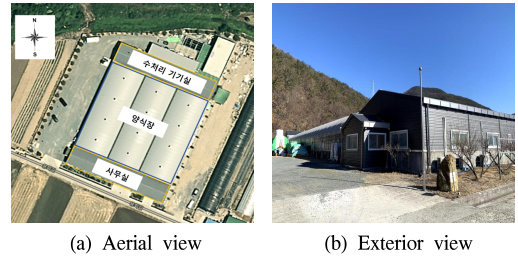


그림 5. 대상 양식장 외부 전경
Fig. 5. External view of indoor fish farm

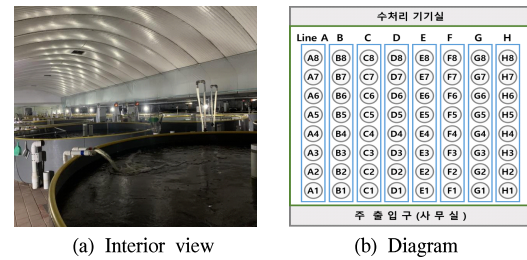


그림 6. 대상 양식장 내부 전경 및 수조 분포도
Fig. 6. Internal view and fish tank distribution diagram

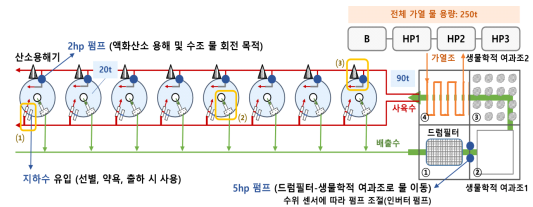


그림 7. Line 전체 물 순환 다이어그램
Fig. 7. Water circulation diagram

기 펌프가 개별로 설치되어 있으며, 지하수 유입 파이프가 추가로 설치되어 현장 운영 상황에 따라 활용된다.

3.2.2 순환여과식 육상양식장 에너지 모델 개발

순환여과식 육상양식장 에너지 모델은 대류 및 복사로 인한 수면의 증발, 그에 따른 실내 온열 환경과 수온의 변화, 펌프 에너지 사용량, 수온 유지를 위한 냉난방 설비의 에너지 사용량에 대한 예측 성능 확보가 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 건축 분야에서 광범위하게 사용되고 있는 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램인 EnergyPlus를 활용하여 순환여과식 육상양식장 에너지 모델을 개발하였다. EnergyPlus는 실내 수영장 모델링을 위해 내장된 “Swimming pool:Indoor” 객체를 통해 수면의 증발과 대류, 외피와 수면 사이의 복사, 바닥과 벽 사이의 전도 등을 모사할 수 있다. 해당 객체는 수영장으로 지정된 내부의 바닥 표면과 연결되며, 지정된

바닥 표면에 대한 깊이로 시뮬레이션이 수행된다. 양식장의 열전달은 실내 수영장에서의 열전달과 유사하기 때문에, “Swimming pool:Indoor” 객체를 활용하여 순환여과식 육상양식장 에너지 모델을 개발하였다²⁰⁾. 그림 8은 개발된 순환여과식 육상양식장 에너지 모델을 나타내며, 표 2는 모델에 사용된 재료값을 나타낸다. 그림 8에서 파란색으로 표시된 바닥은 “Swimming Pool:Indoor” 객체가 적용된 바닥을 의미하며, line 별 제어가 수행됨에 따라 수조의 수표면 면적을 고려하여 각 line을 하나의 수조로 모사하였다.

본 연구에서 개발된 순환여과식 육상양식장 에너지 모델의 예측 성능 검증은 양식장 내부 온습도 측정값을 대상으로 수행하였다. 양식장 내부 온습도는 7대의 HOB0® 온습도 데이터 로거를 활용하여 2022년 2월 14일부터 3월 17일까지 한 달간 5분 간격으로 측정하였다. 시뮬레이션에 활용한 외기 온습도의 경우 기상청에서 제공하는 밀양 지역의 기상 데이터를 활용하였다. 그림 9는 측정 기간 동안의 양식장 내부 온습도 측정값 및 예측값을 나타낸다.

모델의 예측 성능 검증은 M&V(Measurement and verification) 가이드 라인에서 제시하는 모델에 대한 평가 지표인 MBE(Mean bias error)와 Cv(RMSE)(Coefficient of variation of the root mean square error)

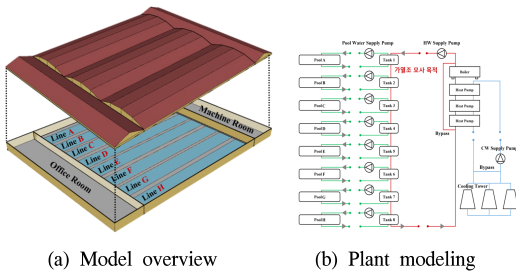
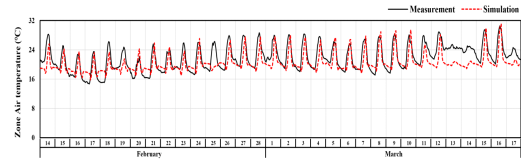


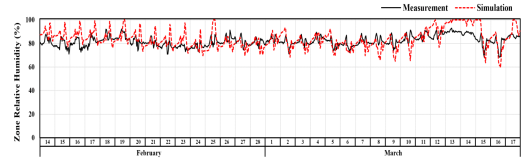
그림 8. 개발된 순환여과식 육상양식장 에너지 모델
Fig. 8. Modeling of the indoor fish farm

표 2. 재료의 열 성능
Table 2. Thermal properties of materials

Category	Thickness	Thermal conductivity	Density	Specific heat
Unit	m	W/m·K	kg/m ³	J/kg·K
Sandwich panel	0.1	0.03	43	1210
PP Fish tank	0.05	0.125	900	1930
Concrete	0.2	1.95	2240	900
PET Tent	0.001	0.15	1780	1300



(a) Indoor air temperature



(b) Indoor relative humidity

그림 9. 순환여과식 육상양식장 측정값 및 예측값
Fig. 9. Comparison of measured and simulated data for an indoor fish farm

를 기준으로 하였다²¹⁾. 평가 기준은 M&V 가이드 라인에서 제시하는 시간당 권장 오차율인 MBE= ±10%, Cv(RMSE)= ±30%로 선정하였다. 그림 9에서 나타난 바와 같이, 2~3월 시뮬레이션 예측값은 건구 온도 및 상대습도에서 각각 MBE= 5%와 Cv(RMSE)= 13%, MBE= -5%와 Cv(RMSE)= 13%로 권장 오차율을 만족하는 예측 성능을 나타내었다.

3.2.3 측정 데이터 분석을 통한 현장 운영 스케줄 도출

대부분의 순환여과식 육상양식장은 확립화된 제어 기준 또는 운영 스케줄이 아닌 관리자의 경험을 바탕으로 시스템의 on/off 및 line 별 수온 제어가 이루어진다. 이러한 한계점은 디지털 트윈을 위한 현장 재현을 확보와 더불어 에너지 모델의 수온 및 에너지 사용량 예측 성능에 부정적인 영향을 미친다. 따라서, 효과적인 디지털 트윈 기반 마련 및 현장 재현을 확보를 위해서는 현장에서 적용되고 있는 운영 스케줄 도출이 우선시되어야 한다. 이에 본 연구에서는 수조 운영 정보(수온과 DO, 양식 마릿수) 측정을 통해 현장 운영 스케줄을 도출하였다. 수온과 DO는 Oxyguard®의 DO 센서를 활용하여 측정하였으며, 측정값은 그림 10과 같이 실시간 모니터링 시스템과 연동된 웹 클라우드상에서 취득하였다. 양식 수조의 수온은 시간당 급격하게 변화하지 않으며 온도 변화에 따른 생육 스트레스 방지를 목적으로 일별 수온 제어가 이루어지므로, 본 연구에서 수조 운영 정보는 측정 데이터의 일평균 값을 기준으로 활용하였다.

표 3은 수조 운영 정보 측정값 분석을 통해 도출된

현장 운영 스케줄을 나타낸다. 수온은 보일러와 히트펌프 가동에 따라 line이 운영되는 경우 27~28℃의 설정 온도로 일정하게 유지된다. 따라서, 26.5℃ 이상의 수온 분포를 나타내는 경우 설비 시스템이 가동되고 있는 것으로 가정하였다. DO는 산소 용해기 및 펌프 가동에 따라 생육 적합 범위인 10mg/L의 농도로 유지되므로^[22, 23], 9.5mg/L 이상의 DO 분포를 나타내는 경우 설비 시스템이 가동되고 있는 것으로 가정하였다. 표 3에서 운영 시나리오 0은 수조가 사용되지 않는 설비 시스템 미운영 스케줄을 의미한다. 운영 시나리오 1은 설비 시스템은 운영되지 않으나 충분한 DO 농도를 가지는 지하수만 유입하여 활용하는 스케줄을 의미한다. 운영 시나리오 2는 출하 또는 약육을 목적으로 설비 시스템을 가동함과 동시에 지하수를 혼합하여 활용하는 스케줄을 의미한다. 운영 시나리오 3과 4는 수조 내에 뱀장어를 사육하지 않음에도 물양 유지 또는 수조 청소를 목적으로 온수를 활용하는 스케줄을 의미한다. 운영 시나리오 5는 수온과 DO, 마릿수 모두 운영 기준을 만족하는 경우로 일반적인 수조 운영 상태를 의미한다.

표 3의 운영 시나리오 1-2에서와 같이 시스템 운영과 별개로 목적에 따라 지하수를 혼합하는 경우, 지하수 유입에 따른 수온 변화가 발생한다. 따라서 현장 재현을

항상 및 예측 성능 개선을 위해서는 지하수 혼합 사용에 따른 수온 변화 모사가 중요하다. 이에 본 연구에서는 지하수 혼합에 따른 수온 변화 분석을 위해 그림 11과 같이 운영 시나리오 1-2에 대한 line 별 수온 분포를 도출하였다. 지하수가 사용되는 경우, 일반적으로 14~16℃의 온도분포를 나타내는 지하수와 혼합에 따른 수온 하강으로 인해 평균 약 21℃ 수온 분포를 나타내었다. 따라서, 지하수 유입 스케줄 반영을 위해 21℃를 지하수 유입 수조의 설정온도로 적용하여 그림 12와 같이 수온 제어 스케줄 세분화 프로세스를 개발하였다. 지하수 유입 스케줄은 하나의 line 당 8개의 수조 중, 절반 이상인 5개 이상의 수조에서 지하수 유입 운영 시나리오로 운영되는 경우에만 적용하였다.

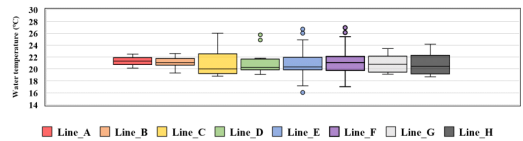


그림 11. 지하수 유입에 따른 line 별 수온 분포
Fig. 11. Water temperature distribution by line according to the inflow of groundwater



(a) Monitoring system (b) Web cloud

그림 10. DO 센서 실시간 모니터링 시스템
Fig. 10. DO sensor real-time monitoring system

표 3. 현장 설비 시스템 운영 스케줄 도출
Table 3. On-site plant system operation schedule

Category	Water temperature		DO		Headcount		Operation Scenario	Operation Schedule
	27~28℃	10mg/L	≥ 0					
Criteria	-	X	-	X	-	X	0	Plant Off
	-	X	○	-	-	X	1	
	-	X	○	-	○	-	2	Plant On
	○	-	-	X	-	X	3	
	○	-	○	-	-	X	4	
	○	-	○	-	○	-	5	

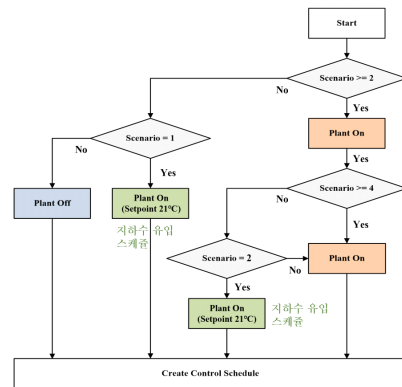


그림 12. 수온 제어 스케줄 세분화 프로세스
Fig. 12. Water temperature control schedule segmentation process

3.2.4 수온 제어 스케줄 세분화에 따른 모델 예측 성능 분석

현장 재현을 항상에 따른 예측 성능 변화 비교를 위해 그림 13과 같이 지하수 유입 스케줄 반영 여부에 따른 line 별 운영 스케줄을 도출하여 수온 및 에너지 사용량 예측값 비교 분석을 수행하였다. 그림 13에서 case 1은 지하수 유입 스케줄이 반영되지 않은 경우이며, case 2는 수온 제어 스케줄 세분화 프로세스에 따라

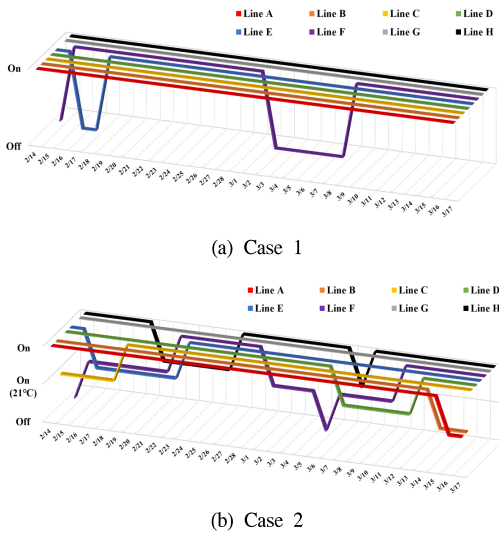


그림 13. line 별 운영 스케줄
Fig. 13. Operation schedule by line

지하수 유입 스케줄이 반영된 경우이다.

그림 14는 지하수 유입 스케줄 반영 여부에 따른 수온 측정값 및 예측값을 나타낸다. 수온 측정값과 예측값 간의 오차는 RMSE(Root mean square error)를 기준으로 하였다. 지하수 유입 스케줄 반영에 따른 RMSE 변화는 line A의 경우 2.3°C에서 1.5°C, line B의 경우 2.7°C에서 1.6°C, line C의 경우 3.0°C에서 1.8°C, line D의 경우 3.4°C에서 1.4°C, line E의 경우 4.6°C에서 2.5°C, line F의 경우 4.9°C에서 2.6°C, line G의 경우 0.2°C, line H의 경우 3.3°C에서 1.5°C로 평균 약 1.6°C의 오차를 나타내어 지하수 유입이 반영되지 않는 경우에

비해 약 54%의 오차 감소를 나타내었다. 또한, 일별 M&V 가이드 라인 권장 오차율인 $MBE = \pm 7.5\%$, $Cv(RMSE) = \pm 22\%$ 를 기준으로 case 1과 2의 평균 오차율은 각각 $MBE = -8.5\%$ 와 $Cv(RMSE) = 13.8\%$, $MBE = 5\%$ 와 $Cv(RMSE) = 7\%$ 로 MBE의 일별 권장 오차율을 초과하는 case 1과 달리 case 2는 권장 오차율을 만족하는 예측 성능을 나타내었다.

그림 15는 최종적으로 지하수 유입 스케줄 반영 여부에 따른 순환여과식 육상양식장 에너지 모델의 에너지 사용량 예측값을 나타낸다. 지하수 유입 스케줄이 반영된 case 2의 에너지 사용량 예측값은 229,568 kWh, 일평균 7,174 kWh로 case 1에 비해 최대 29%, 평균 9% 적게 나타내었다. 이는 지하수 유입에 따른 수온 변화 모사를 위해 21°C의 설정온도가 적용됨에 따라 히트펌프와 보일러의 난방 에너지 사용량이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 전력 사용량 측정을 통해 수온 제어 스케줄 세분화 프로세스에 따라 지하수 유입 스케줄이 반영된 에너지 사용량 예측값에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

에너지 사용량 제어는 에너지 사용량에 대한 현황 파악을 바탕으로 주요 변수들을 활용하여 에너지 사용량에 대한 예측을 수행하고, 예측값을 기반으로 디지털 트윈 환경 내에서 제어 전략을 수립하여 최적 제어 전략을 적용하는 프로세스로 이루어진다. 현재까지 양식 분야에서의 에너지 예측 및 제어에 관한 연구와 에너지 모델링 및 디지털 트윈 환경을 활용한 에너지 최적 제어에 관한 연구는 미미한 실정이다. 따라서, 향후 연구에서는 본 사례 연구를 통해 개발된 순환여과식 육상양식장 에너지 모델을 활용하여 디지털 트윈 환경 내에서

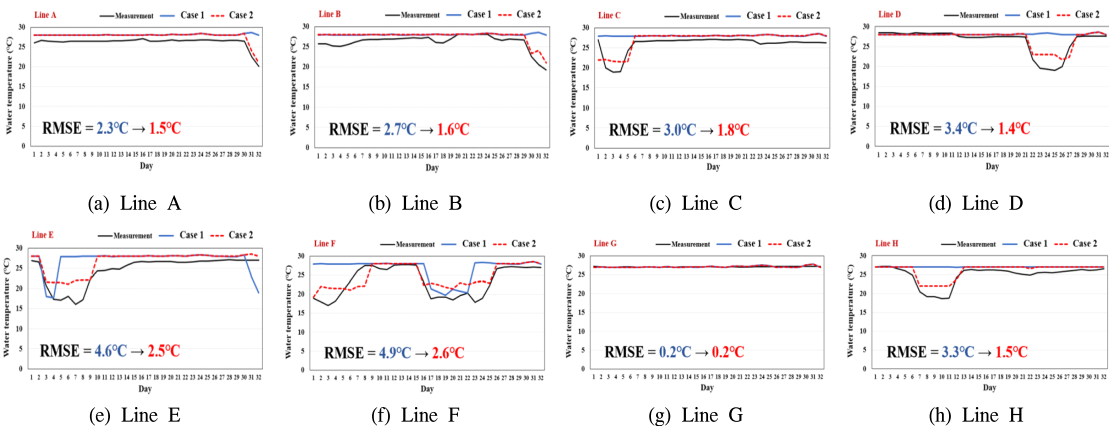


그림 14. 지하수 유입 스케줄 반영 여부에 따른 line 별 평균 수온 측정값 및 예측값
Fig. 14. Comparison of measured and simulated data for average water temperature according to the groundwater inflow schedule

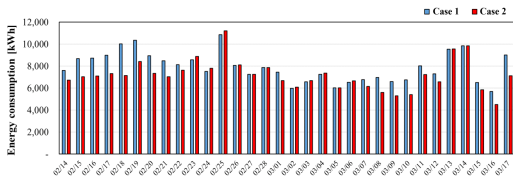


그림 15. 지하수 유입 스케줄 반영 여부에 따른 에너지 사용량 예측값
 Fig. 15. Simulated data for energy consumption according to the groundwater inflow schedule

순환어과식 에너지 공급 시스템 최적 제어에 따른 에너지 저감 시나리오 도출 및 분석을 통해 양식장의 제어 전략을 검토함으로써 양식장 운영을 최적화하고 에너지 소비를 최소화할 수 있는 에너지 최적 제어 관리 방안을 제시하고자 한다.

IV. 결 론

농업이나 축산업뿐만 아니라 수산업 분야에도 디지털 트윈 기술의 적용이 시도되고 있다. 수산업 분야에서 디지털 트윈 기술 5단계 수준에 이르기 위해서는 관·산·학·연·농의 긴밀한 협력을 통한 지속적인 연구가 필요하다. 또한, 협력 체계 구축을 통해 어민들의 노하우와 현장 상황을 반영하여 신기술의 개발부터 기술의 산업화까지 조화를 이룬 발전이 필요하다. 본 논문에서는 농·축·수산 분야에 디지털 트윈의 적용 사례를 알아보았다. 특히 디지털 트윈을 양식 분야에 적용하여 스마트 양식을 제공하는 서비스 및 개발 단계에 대해 기술하였다. 또한, 양식장에 디지털 트윈을 적용한 사례 연구로써 스마트 양식의 에너지 모델 개발하고 양식장의 에너지 최적 관리 방안을 도출하였다. 향후 지속적인 연구 개발을 통해 어류의 생산 및 공급 예측, 시장의 수요 예측, 생산관리, 물류, 가치사슬 등의 통합관리가 가능할 것으로 예상된다. 더불어 향후 IoT 기반 센서의 발전과 함께 양질의 데이터 취득이 용이해질 것으로 기대되며, 축적된 데이터를 중심으로 시뮬레이션 모델의 고도화, 인공지능 적용, 통합 플랫폼 운영 등이 디지털 트윈 기반 아쿠아팜 개발의 핵심이 될 것으로 예상된다.

References

[1] <https://www.vantagemarketresearch.com>, Retrieved Mar., 21, 2023.
 [2] <https://www.fao.org>, Retrieved Mar., 21, 2023.
 [3] National Statistical Office, *Fishing prices and*

farm area by type of aquaculture, Retrieved Mar., 21, 2023, from <https://www.kosis.kr>.
 [4] Telecommunications Technology Association, *The definition and current status of smart agriculture and fisheries(2022)*, Retrieved Mar., 21, 2023, from <http://weekly.tta.or.kr>.
 [5] S. K. Jo, S. H. Kim, K. W. Kwon, and D. Y. Jeong, "Digital twin-based aquafarm service provision plan," *J. KICS*, vol. 38, no. 8, pp. 42-48, Jul. 2021.
 [6] C. Pylaniadis, S. Osinga, and I. N. Athanasiadis, "Introducing digital twins to agriculture," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 184, no. 105942, Mar. 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>)
 [7] E. Ko, D. Raj, S. Y. Shin, S. G. Kim, and S. H. Park, "International standardization for maritime, underwater internet of things and digital twin applications," in *Proc. 15th Int. Conf. Underwater Netw. & Syst.*, pp. 1-2, Nov. 2021. (<https://doi.org/10.1145/3491315.3491366>)
 [8] H. Y. Lan, N. A. Ubina, S. C. Cheng, S. S. Lin, and C. T. Huang, "Digital twin architecture evaluation for intelligent fish farm management using modified analytic hierarchy process," *Applied Sci.*, vol. 13, no. 1, 141, Dec. 2022. (<https://doi.org/10.3390/app13010141>)
 [9] R. Teixeira, J. Puccinelli, B. de Vargas Guterres, M. R. Pias, V. M. Oliveira, S. S. D. C. Botelho, and M. Paris, "Planetary digital twin: A case study in aquaculture," in *Proc. 37th ACM/SIGAPP Symp. Appl. Comput.*, pp. 191-197, Apr. 2022. (<https://doi.org/10.1145/3477314.3508384>)
 [10] A. C. Lima, E. Royer, M. Bolzonella, and R. Pastres, "Digital twins for land-based aquaculture: A case study for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)," *Open Research Europe*, Feb. 16, 2022. (<https://doi.org/10.12688/openreseurope.14145.1>)
 [11] Z. Lv, H. Lv, and M. Fridenfolk, "Digital twins in the marine industry," *Electronics*, vol. 12, no. 9, Apr. 2023.

- (<https://doi.org/10.3390/electronics12092025>).
- [12] S. H. Lee, W. H. Yeo, J. G. Kim, and S. K. Jo, "Status and development of aquafarm based on digital twin," *Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 38, no. 3, pp. 29-37, Jun. 2023.
(<https://doi.org/10.22648/ETRI.2023.J.380304>)
- [13] S. Hemming, "Energy and climate in dutch greenhouses," *Public Wkshp. 20th Wageningen university and research*, UWS Hakesbury, Austrailia, Aug. 2010.
(<https://edepot.wur.nl/158852>)
- [14] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Open Access System for Architectural Data*, Retrieved Mar., 21, 2023, form <https://open.eais.go.kr>.
- [15] S. K. Jo and S. H. Kim, "Digital twin-based smart livestock house - case study," *J. KICS*, vol. 45, no. 8, pp. 1472-1481, 2020.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.8.1472>).
- [16] D. -Y. Jeong, *Korea digital twin technology roadmap*, 1st Ed., Institute of Information and Communications Technology Planning and Evaluation, 2021.
- [17] D. -Y. Jeong, et al., "Digital twin: Technology evolution stages and implementation layers with technology elements," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 52609-52620, May 2022.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174220>).
- [18] M. Badiola, O. C. Basurko, R. Piedrahita, P. Hundley, and D. Mendiola, "Energy use in Recirculating Aquaculture System (RAS): A review," *Aquacultural Eng.*, vol. 81, pp. 57-70, Mar. 2018.
(<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.03.003>)
- [19] D. G. Lee, B. S. Bae, J. H. Lee, S. T. Kim, and H. S. Kim, "Development of the smart aquaculture technology and industrialization plan," *The J. Fisheries and Marine Sci. Edu.*, vol. 33, no. 2, pp. 412-42, Apr. 2021.
(<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.4.33.2.412>)
- [20] J. Goo, Y. Kwak, H. Shin, J. Kim, S. K. Jo, and J. H. Huh, "Feasibility study of dynamic thermal-modeling development using measurement and validation: Case study of indoor fish farm," *Applied Thermal Eng.*, vol. 228, Jun. 2023.
(<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120512>)
- [21] ASHRAE, "Measurement of energy and demand savings (Guideline 14)," *Am. Soc. Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Atlanta, GA, 2002.
- [22] National Institute of Fisheries Science, *Eel Aquaculture Standard Manual*(2017), Retrieved Mar., 21, 2023, from <https://www.nifs.go.kr/contents/actionContentsCons0105.do>.
- [23] National Institute of Fisheries Science, *Rainbow Trout Aquaculture Standard Manual*(2017), Retrieved Mar., 21, 2023, from <https://www.nifs.go.kr/contents/actionContentsCons0105.do>.

구 자 빈 (Jabin Goo)



2021년 : 서울시립대학교 건축공학과 졸업
2023년 : 서울시립대학교 건축공학과 석사
2023년~현재 : 서울시립대학교 도시과학연구원 연구원

<관심분야> 건물 에너지, 예측 모델, 디지털 트윈, 스마트팜, AI

이 상 연 (Sang-yeon Lee)



2014년 : 서울대학교 지역시스템공학과 졸업
2016년 : 서울대학교 지역시스템공학과 석사
2021년 : 서울대학교 지역시스템공학과 박사
2021년~2022년 : 서울대학교 연구조교수

2023년~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원
<관심분야> 스마트팜, 농축수산, ICT, AI, 시설환경공학

박 대 현 (Dae-heon Park)



2006년 : 순천대학교 공학사
2008년 : 순천대학교 공학석사
2014년 : 순천대학교 공학박사
2011년~현재 : 한국전자통신연
구원 선임연구원
<관심분야> IoT, 빅데이터, 지
능형 시스템, 스마트팜

[ORCID:0000-0003-1253-6577]

조 성 균 (Seng-kyoun Jo)



2004년 : 한국항공대학교 항공
통신정보공학 학사
2006년 : 한국과학기술원 전자
공학 석사
2021년 : 독일 다름슈타트 공과
대학 컴퓨터공학 박사
2006년~현재 : 한국전자통신연
구원 책임연구원

2023년~현재 : 농축수산지능화연구센터 센터장
<관심분야> ICT 융합, 농축수산 ICT, IoT, AI
[ORCID:0000-0003-2621-419X]