KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 31, No. 1 1~9 (2025)
https://doi.org/10.20909/kopast.2025.31.1.1

인공지능(AI) 기반 냉동시스템 제어를 통한 저온물류센터 에너지 효율화 방안 연구

장경훈 · 오재영*

한국건설생활환경시험연구원

A study on the Energy Efficiency Method of A Low Temperature Logistics Warehouse Through Controlling Chiller System Control based on Artificial Intelligence Algorithm

Kyung Hoon Jang and Jae Young Oh*

Korea Conformity Laboratories

Abstract As the demand for cold chain logistics for the distribution of fresh food or medicine increased, the domestic cold chain logistics center increased rapidly. Due to the nature of managing low temperature, cold chain logistics requires a lot of energy consumption. In order to cope with the rise in global energy prices and carbon neutrality policies, the establishment of a platform for converting cold chain warehouses to energy efficiency and low energy consumption structures continues to be required. In this study, we focused on the energy efficiency of the refrigeration system with the largest energy load in the operation of the cold chain distribution center, and developed an energy management system operation model through two AI-based refrigeration system control algorithms for effective energy reduction; 1) 3 dimentional temperature mapping and unit-cooler control algorithm through AI learning; 2) AI based automatic defrosting algorithm. In order to verify the energy reduction effect of this control system, it was quantitatively analyzed through experiments in an area of 100? chamber; 1) By applying 3D temperature mapping and unit-cooler control algorithm, unit cooler power consumption is reduced by 19.8% (from 65.85 kWh to 51.97 kWh for 12 hours) ; 2) By applying AI-based automatic defrosting algorithm, 48% reduction in defrosting power consumption (from 532.2 kWh to 271.9 kWh for 24 hours). In the future, it is expected to contribute to reducing the national energy load and carbon neutrality by applying it to the actual cold chain distribution center.

Keywords Cold-chain warehouse, Low temperature logistics, Energy efficiency, Total energy solution, AI algorithm

서 론

최근 1~2인 가구 증가, 베이비붐 세대의 온라인 시장 진입 등 식품 시장 소비 트렌드가 변화하고 있다. 이러한 트렌드 변화는 온라인 쇼핑 증가로 연결되어 기존 오프라인에서 온라인 중심으로 유통체계가 전환되고 있다. 초기에는 가전 등 비교적 보관이 쉬운 제품 위주에서 현재는 냉장·냉동 온도 유지 기술을 적용한 콜드체인 유통 서비스를 통해 신선식품과 같이 보관과 배송이 어려운 제품영역까지 온라인을 통해 구매할 수 있다. 반면에, 이러한 신선식품 및 가정간편식 등 콜드체인 유통 서비스의 원활한 운영을 위해서는 물류창고 및 냉동·냉장 탑차에서의 적정 온도관리 등 보관 및 수송의 영역에서 많은 에너지 소비를 유발하고 있다. 최근 언론보도에 따르면 한국전력의 부채 규모가 2024년 약 250조원에 육박하는 것으로 발표되고 있는데[1], 이를 국민 1인당 에너지 부채로 환산한다면 약 500만원/인에 이를 것으로 추정된다. 글로벌 에너지 가격 상승과 탄소중립 이행 등 어려운 외부 여건에 대응하여, 에너지 다소비 업종인 콜드체인 물류 서비스의 지속적 성장을 위해서는 에너지를 어떻게 절감시킬 수 있을지가 큰 관심의 대상이 되고 있다[2].

건물 부문의 경우 여러 정부 부처 및 각 시·도에서 다양한 정부 정책을 마련 추진하여 건물의 비효율적 요인을 개

*Corresponding Author: Jae Young Oh
Korea Conformity Laboratories, 199, 1st Gasan Digital Road, Gumcheon-gu, Seoul, 153-803 Korea
Tel: +82-2-6912-2330
E-mail: jyoungo@kcl.re.kr

선하기 위한 에너지 절약시설 및 생산시설을 설치하고, 에너지 이용 효율을 향상시키는 사업이 활발히 진행되고 있다[3]. 하지만, 에너지 다소비 업종 중 하나인 저온물류창고에 대한 에너지 수요관리 및 에너지 효율을 위한 효과적인 국가정책과 기술 표준은 부재한 상황이다. 또한, 저온물류창고의 경우, 콜드체인 산업의 성장 그리고 전기요금 인상폭 증가에 따라 정온 유지를 위해 소모하는 에너지 및 운영비용이 매년 상승하고 있다. 산업통상자원부와 한국전력은 최근 산업용 전기요금을 2024년 10월부터 평균 9.7% 인상하는 것으로 발표했다. 대용량 고객 대상인 산업용(을) 전기요금은 1kWh당 165.8원에서 182.7원으로 10.2%, 중소기업이 주로 쓰는 산업용(갑)은 164.8원에서 173.3원으로 5.2% 상승한다. 이에 따라 산업용(을) 이용 대기업은 연평균 1억 1000만원 내외, 산업용(갑) 전기요금은 연간 평균 100만원 수준 증가할 것으로 예상된다. 한국전력공사 보고서에 따르면 전기요금 조정을 본격화한 2022년 이래 7번째 인상으로 해당 기간 인상 폭은 60%를 넘은 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 물류센터 운영비용에서 전기요금이 차지하는 비중은 더욱 높아질 전망이다[4].

신선식품 온라인 주문 · 배송서비스 증가와 COVID19 감염병 확산 등에 따른 비대면 구매 증가로 '19~22년 국내 정온물류산업 인프라가 급격히 증가하였다. 국가 물류 통합정보센터 자료[5]에 따르면 식품위생법상 냉동 · 냉장창고로 신규 등록한 물류센터 개수는 2018년 35개에서 2022년 70개로 2배 이상 증가했다. 2022년 물류창고업 등록현황에 따르면 신규창고업으로 등록한 585개 중 70개가 냉동·냉장창고업으로 약 12%가 저온 창고로 보고되었다. 저온물류창고의 급격한 증가와 함께 에너지 다소비 업종으로 분류된 콜드체인 저온물류창고의 에너지 고효율화 및 에너지 저소비 구조로의 전환 플랫폼 구축이 지속해서 요구되고 있다.

우리나라의 에너지 자립도(Self-Sufficiency)는 불과 0.18% 수준으로 OECD 최하위 수준이며, 2008년 이후 우리나라의 연평균 에너지 수입의존도는 연평균 96.4%를 기록하고 있다. 에너지 수입의존도(Energy Dependence on Import)는 1차 에너지 공급 중 수입 에너지의 비중을 나타내는데 우리 경제가 대외 경제 여건, 에너지 국제 가격 변화 등에 받는 충격을 예측하는 지표로 활용된다. 우리나라는 1차 에너지 공급 중 평균적으로 97%를 수입에 의존하고 있어 에너지 수급 불안이나 가격 급등 등 충격에 사실상 무방비로 노출되어 있는 실정이다[5, 6].

물류 시설에는 단순 보관기능부터, 컨베이어, 자동분류기, 수직반송기, 조명, HVAC 시스템 등 하나의 시스템으로 시설이 운영되고 있다. 특히 물류 시설이 지능화·자동화가 진행되면서 물류 시설의 에너지 소비량은 점점 증가하고 있다[7]. Table 1에 나타낸 바와 같이 냉동창고의 에너지 사용량을 타 용도 건물군과 비교했을 때 냉동시설이 아파트, 학교시설, 호텔보다 각각 558%, 452%, 144% 높은 것으로 나타났다. 저온물류창고의 규모 및 사용량에 따라 에너지 소비량은 상이하지만, 최민호 등[8]에 따르면 에너지 사용량을 구분해서 관리하는 설비 중에서 내 · 외부 조명이 차지하는 전력 사용 비중 52.8%, 냉동기의 전력 사용 비중 43.9%로 나타났다. 저온물류창고의 경우 에너지 사용량 중 전기 사용이 전체 비중에서 차지하는 비중이 매우 높은 편이며, 판매관리비의 약 10%, 매출액의 약 9%를 전기사용료로 납부할 정도로 비용 면에서 큰 부분을 차지하고 있다. 전기를 많이 사용하는 철강이나 제강사의 경우 매출액 대비 전기료 비중이 5~7% 수준인 것을 감안하면 냉동 및 냉장창고의 전기료 절감을 위한 노력의 필요성이 높다.

Table 1. Average annual energy usage per unit area by building use[8]

Building classification		Average annual energy usage per floor area (kWh/m^2)
School		150.2
Research Institute		471.7
Hotel		340.0
Hospital		423.0
Communication		1,071.3
Apartment		126.2
etc		257.0
Logistics warehouse	Frozen	828.9
	Refrigeration	473.6
	Ambient	176.0

따라서, 상기와 같은 이유로 콜드체인 시장 확대에 따라 관련 업계 및 연구자들은 에너지 절감 및 고효율 제품 개발과 같이 에너지 효율화와 관련된 기술개발에 집중하고 있다. 저온물류창고 에너지 효율화 및 개선을 위해서는 3가지 카테고리 분류를 통한 기술적 검토가 필요하다. 첫째 저온물류창고에서 에너지 소비가 가장 큰 조명과 냉장 · 냉동 공조설비(HVAC) 운영 효율화, 둘째 태양광 패널과 같은 재생 에너지원 및 ESS 충/방전 스케쥴 조정을 통한 전력 품질 개선과 피크 부하 저감, 셋째 스마트 센서와 IoT(사물인터넷) 기술, 빅데이터 기반 AI 기술을 활용한 에너지 사용량 실시간 모니터링 및 에너지 최적화 솔루션 적용으로 물류창고가 환경에 미치는 영향을 최소화는 동시에 최고의 에너지 효율로 저온물류창고 운영이 가능하다.

본 연구에서는 저온물류센터 운영에서 에너지 부하량이 가장 큰 냉동시스템의 에너지 효율화에 중점을 두고, 두 가지 AI 기반 냉동시스템 제어 알고리즘(AI 학습을 통한 3D 온도맵핑 및 unit-cooler 제어 알고리즘 / AI 기반 자동 제상 알고리즘)을 통한 에너지관리시스템 운영 모델을 개발하였고, 면적 100 m^2 (30평) 냉장 · 내동실(room)에 AI 기반 냉동시스템 제어를 통한 물류창고 에너지 효율 및 절감

효과를 실험을 통해 정량적으로 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 저온물류창고 에너지 효율화 기술개발 및 표준, 가이드라인 전략을 수립하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

재료 및 방법

1. 에너지 저감 실험을 위한 저온물류창고 파일럿(Pilot) 테스트 베드 구성

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실험을 위해 건축면적 약 330 m^2 (100평) 규모의 저온물류창고 파일럿 실증 모델을 구축하였고, 실층에는 1개의 전실과 2개의 냉장·냉동실, 2층에는 시스템 운영 및 종합관제실, 3층에는 재생에너지 및 에너지 공급설비(PV+ESS+UPS)를 설치하여 구성하였다. 에너지 절감량을 비교하기 위하여 냉장 냉동시스템 제어는 수동 및 자동 운전이 가능하게 하여, 독립적 운전 또는 인공지능 기반 에너지관리시스템과의 연계가 가능하도록 설계하였다. 본 논문에서는 구축한 저온물류창고 파일럿 실증 모델에서 냉동시스템을 대상으로 에너지 절감 실험을 진행하였다.

2. 적용된 인공지능(AI)기반 제어 알고리즘

저온물류창고 에너지 고효율화 및 저감을 위해 적용된 AI 알고리즘 기술은 Table 2에 나타낸 바와 같이 두 종류의 알고리즘을 개발하여 사용하였다.

① AI 학습을 통한 Unit-cooler 제어 알고리즘: 냉동·냉장기 에너지 소비 절감을 위한 목적으로 다중 온도센서 기반 실시간 3차원 체적 온도분포 맵핑 알고리즘을 통한 Unit-cooler 제어 알고리즘

② AI 기반 자동 제상 알고리즘: 냉동·냉장기 에너지 소비 절감을 위한 목적으로 Unit-cooler 내 열교환기 서리 착상에 따른 온도 변화 양상을 추적하고, 제상이 필요한 시점을 자동으로 감지하여 제상 운전 수행 여부를 실시간 판단하는 알고리즘

2.1. AI 기반 Unit-cooler 제어 알고리즘

대부분의 냉동·냉장 창고는 설정 온도를 일정하게 유지하며, ± 1~2°C 제어 편차가 있는 상태로 운영된다. 냉동창고의 온도 편차는 관리자의 주관적 경험과 숙련도에 따라 큰 변화 폭을 갖게 되며, 관리자에 따라 냉동기의 동작·운영 및 온도관리 방법이 달라진다. 해당 문제를 해결하기 위해 실시간 데이터값에 따라 제어 규칙을 생성하는 규칙 기반 알고리즘을 개발하였다. 적용한 AI 제어 알고리즘은 Deep-deterministic policy gradient(DDPG)이며, 냉동창고 온도 환경을 제어하기 위해 다양한 외부 조건이 주어졌을 때 냉동창고의 목표 온도를 유지하면서 에너지 소비를 최소화하

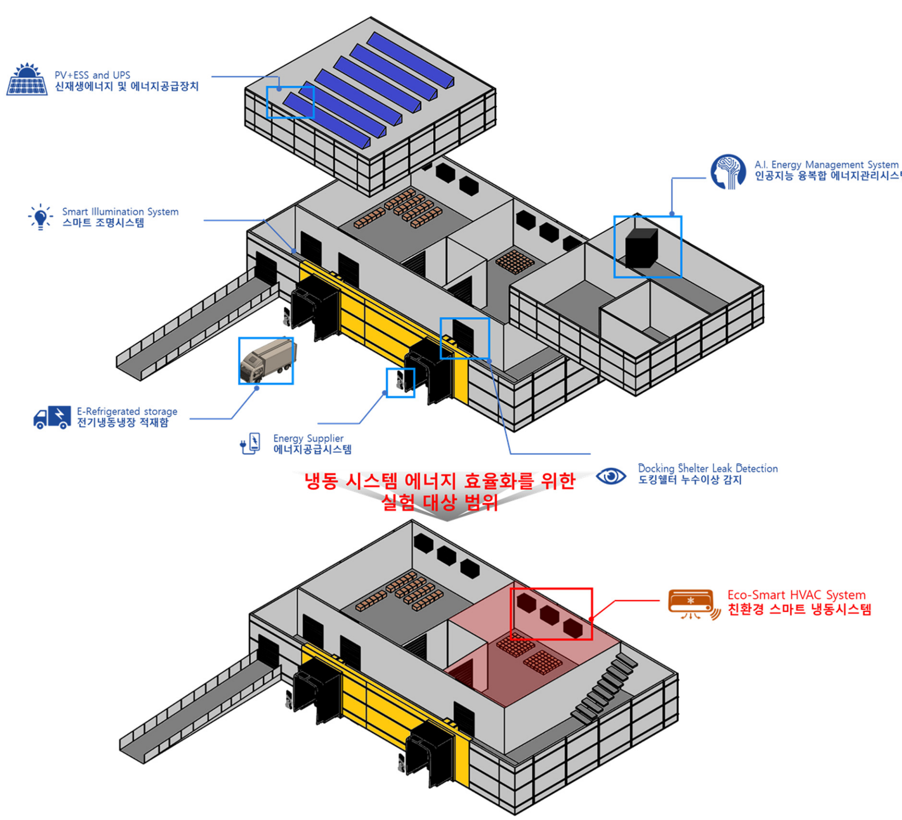
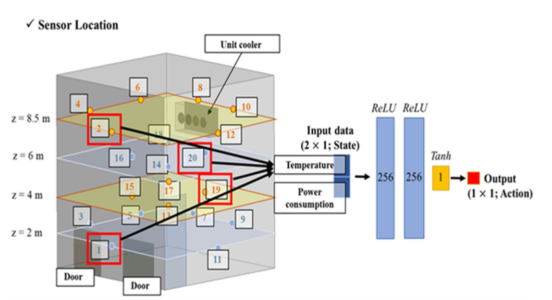
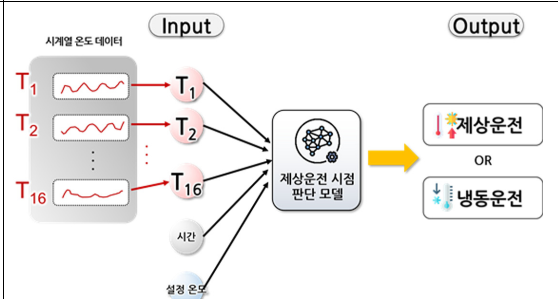


Fig. 1. Pilot Test Bed for Cold Chain Logistics Warehouse for Energy Reduction Experiments.

Table 2. Development Algorithm for Energy Efficiency in Cold Chain Logistics Warehouse

Div.	1) 3 dimentional temperature mapping and unit-cooler control algorithm through AI learning	2) AI based automatic defrosting algorithm
Goal	Reducing Refrigeration Energy by AI-based Unit-Cooler Control	Refrigerator energy saving by AI-based automatic defrosting operation algorithm
Concep	Unit-cooler control algorithm based on multi-temperature sensor based real-time 3D volume temperature distribution mapping algorithm	An algorithm that tracks temperature changes due to frost formation in the heat exchange in the unit cooler and automatically detects when defrosting is needed to determine whether defrosting is performed
	 Location of temperature sensor installation in freezer for unit-cooler control algorithm implementation	 Operation logic of AI-based automatic defrosting algorithm for refrigerator energy saving

는 방식으로 개발하였다[10]. 해당 알고리즘 제어 전략을 사용하면 냉동창고 제어 상황에 맞게 설정된 온도에 따라 냉매 흐름을 조절하여 정밀한 온도 관리가 가능하다.

Fig. 2는 개발된 알고리즘의 Frame work를 나타낸다. 디지털 전력량계를 Unit-cooler에 설치해서 소비되는 전력량을 실시간 모니터링하고, Modbus TCP 통신을 통해 실시간 전력 값과 온도 측정값을 AI 서버로 전송한다. 전송된 계측값은 제어 알고리즘의 입력으로 사용해 Unit-cooler의 설정 온도를 출력으로 도출한다. 도출된 출력값을 중앙 서버에서 매개변수로 넘겨받고 단위 unit-cooler 제어 패널로 전달하여 Unit-cooler의 동작을 실시간 제어하였다.

Fig. 3은 DDPG 알고리즘의 workflow를 나타낸다. 개발된 DDPG 알고리즘은 5초 간격으로 전력량과 온도 데이터를 Input으로 받고, 입력된 데이터를 알고리즘 모델에 알맞은 형태로 변환하는 re-scale 과정을 거친다. 이렇게 re-scale된 데이터는 AI 학습에 필요한 데이터 저장소 역할을 하는 리플레이 버퍼에 저장되고, 학습과 추론을 위한 데이터로 최종 활용되게 된다.

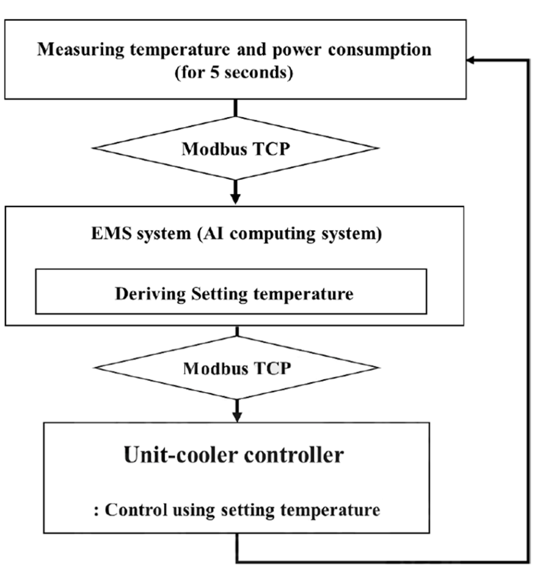


Fig. 2. Frame work of the continuous-DDPG algorithm for unit-cooler control algorithm; amended from ref. 9.

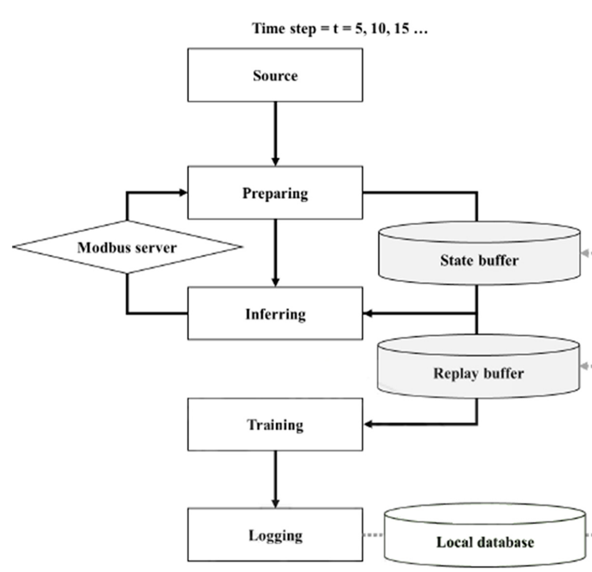


Fig. 3. Workflow of the continuous-DDPG algorithm; amended from ref. 9.

2.2. AI 기반 자동 제상 알고리즘

기존 저온물류창고의 냉동·냉장창고는 유닛쿨러 열교환기의 서리 착상 제거를 위해 주기 제상 방식을 채택하여 사용하고 있으며, 통상적으로 냉장 3~5회/일, 냉동 6~8회/일, 제상 시간 약 15분으로 진행하고 있다. AI 기반 자동 제상 알고리즘은 불필요한 제상으로 소모되는 전기에너지를 최소화하기 위해 AI 기반 제상 시점 판정 및 운전 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 사용된 알고리즘은 크게 온도 데이터의 시간적 특성을 파악하기 위한 특징 추출부와 파악한 특성을 바탕으로 제상 운전 여부를 판단하는 최종 판단부로 구성하였다. Fig. 4와 같이 특징 추출부는 시계열 데이터 분석에 적합한 Long short-term memory(LSTM) layer로 구성하였고, 최종 판단부는 Fully connected neural network(FCNN)로 layer를 구성하여 개발하였다. FCNN의 경우, 입력 데이터의 모든 feature를 활용해 복잡한 패턴을 학습하고 예측하는데 효과적인 신경망 구조이며, 특히 열교환기에 부착된 복수 개의 온도센서 값을 사전 학습하고 실시간 예측 작업을 수행하는데 가장 적합하여 최종 선정하였다.

AI 제상 운전 알고리즘의 학습 과정에서 특성 간 스케일 차이에 따른 수치 불안정성 문제를 해결하기 위해 Fig. 5와 같이 열교환기 Fin 간극 유동 온도, 냉동기 운전 설정 온도, 제상 운전 여부 데이터에 대한 scaling을 수행하고, 각 parameter 데이터는 0에서 1 사이의 값으로 변환시켰다. 이후 Scaling 된 Dataset 은 window sliding을 통해 작은 조각의 dataset으로 다시 분류하였고, 해당 과정을 통해 AI 알고리즘이 열교환기 Fin 간극 유동 온도 변화를 실시간으로 분석 가능하게 하였으며, 동시에 분석에 필요한 컴퓨팅 리소스를 효율적으로 사용할 수 있도록 구성하였다. 알고리즘 학습 시, 모델 과적합을 방지하기 위해 learning Dataset와 validation Dataset 로 분리하였으며, 비율은 일반적으로 많이 사용하는 8:2 비율로 설정하여 dataset을 구성하였다.

3. 실험방법 및 환경 조건

개발된 알고리즘 검증은 Pilot 실증 모델에서 진행하였다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 시험실 내 설치된 총 3개의 Unit-cooler 중 소비 전력이 가장 큰 메인 Unit-cooler를 대상으로 알고리즘 기술 적용에 따른 에너지 절감량을 산출하였다. AI 기반 Unit-cooler 제어 알고리즘 검증을 위해 시험실 내부에 복수 개의 온도센서를 등간격으로 높이(2, 4, 6,

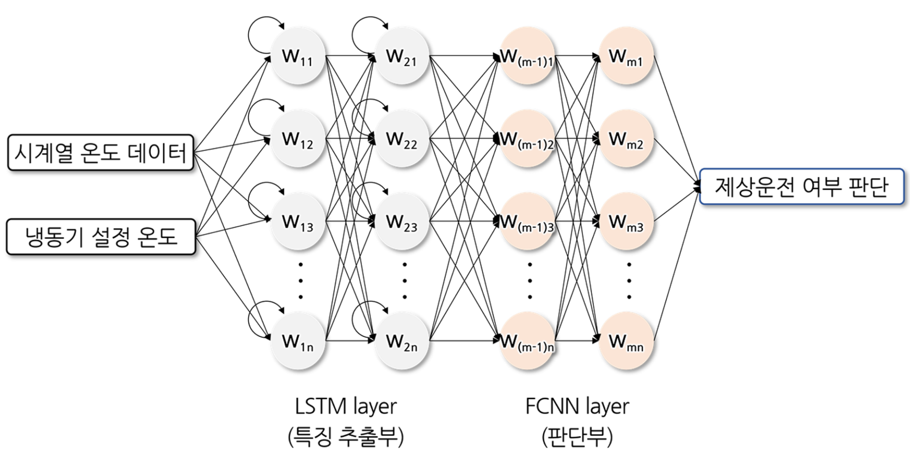


Fig. 4. Model architecture of AI-based automatic defrosting algorithm.

t1	t2	t3	···	t14	t15	t16	t_target	defrost
-23.5	-22.7	-22.4	···	-22.6	-22.6	-20.2	-20	0
-23.5	-22.7	-22.4	···	-22.7	-22.7	-20.2	-20	0
-22.8	-21.9	-21.4	···	-21.9	-21.9	-19.5	-20	0
-22.8	-21.8	-21.3	···	-21.8	-21.8	-19.4	-20	0
-23.2	-21.9	-21.4	···	-22.0	-22.0	-19.6	-20	1
-23.8	-22.6	-22.3	···	-22.7	-22.7	-20.5	-20	1
-23	-22.1	-21.9	···	-22.2	-22.2	-19.8	-20	1
-22.4	-21.6	-21.5	···	-21.7	-21.7	-19	-20	1
-21.8	-20.9	-20.9	···	-21.1	-21.1	-18.2	-20	1
-21.2	-20.4	-20.5	···	-20.6	-20.6	-17.6	-20	1
-20.8	-20	-20.1	···	-20.2	-20.2	-17	-20	1

Scaling

t1	t2	t3	···	t14	t15	t16	t_target	defrost
0.00	0.00	0.00	···	0.06	0.06	0.06	0	0
0.00	0.07	0.04	···	0.05	0.05	0.05	0	0
0.04	0.07	0.09	···	0.07	0.07	0.07	0	0
0.11	0.15	0.22	···	0.17	0.17	0.16	0	0
0.11	0.15	0.22	···	0.17	0.17	0.16	0	1
0.15	0.19	0.22	···	0.19	0.19	0.19	0	1
0.19	0.26	0.30	···	0.26	0.26	0.26	0	1
0.41	0.41	0.39	···	0.40	0.40	0.40	0	1
0.63	0.67	0.65	···	0.65	0.65	0.65	0	1
0.85	0.85	0.83	···	0.84	0.84	0.84	0	1
1.00	1.00	1.00	···	1.00	1.00	1.00	0	1

Fig. 5. Scaling process for data-set configuration.

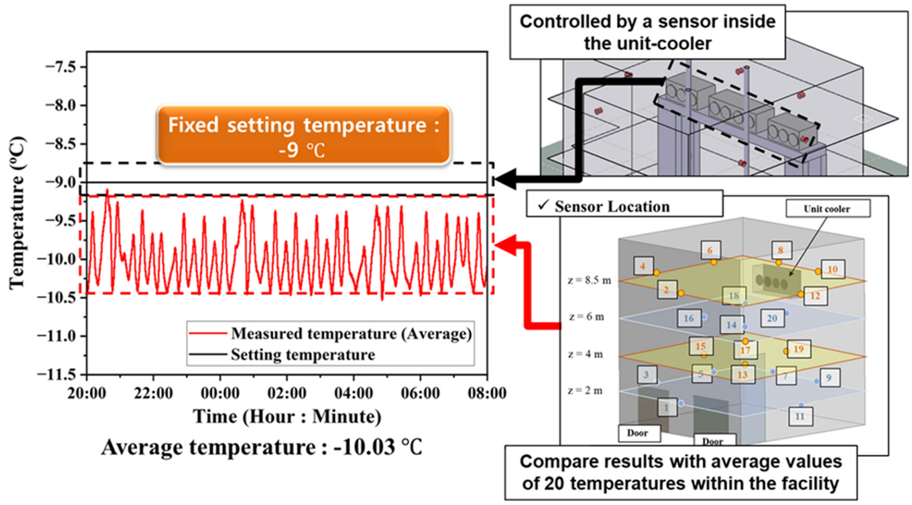


Fig. 6. Test configuration for AI-based unit-cooler control algorithm verification.

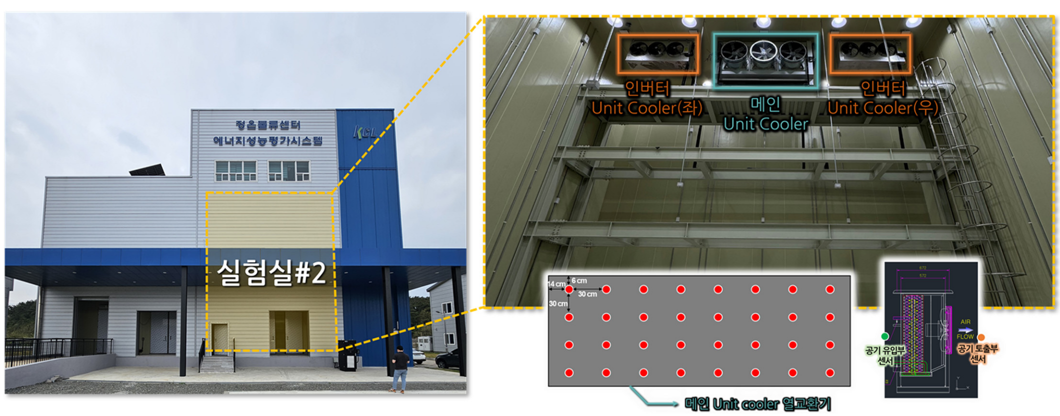


Fig. 7. Pilot test bed & temperature sensor attached to main unit-cooler heat exchanger for experiments.

8.5 m)에 따라 설치하여 3차원 온도분포를 계산하였으며, 해당 결과를 기반으로 메인 Unit-cooler를 제어하였다(Fig. 6 참조). 알고리즘 적용에 따른 에너지 효율 전/후 비교를 위해 기존 제어 방식은 설정 온도를 –10°C로 고정하여 12시간 운전하였으며, 알고리즘 적용 시에는 타겟 온도 –9°C 설정 후 12시간 운전하여 기존방식과 소비 전력을 비교하였다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 알고리즘 적용 시에는 타겟 온도를 –9°C로 설정해야 평균 온도가 –10°C가 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 같이 AI 자동 제상 운전 알고리즘 구현을 위해 메인 Unit-cooler 열교환기에 총 32개의 온도센서를 설치하여 제어 및 모니터링을 진행하였다. 열교환기에 서리 착상을 극대화하기 위해 –20°C 고내온도 조건에서 시험을 진행하였고, 제상 운전 주기(평균), 열교환기 온도, 소비 전력의 변화를 기존방식과 비교하였다. 제상 운전 알고리즘 적용에 따른 에너지 효율 전/후 비교를 위해 주기 제상(4시간 간격) 시 소비하는 전력량과 알고리즘 적용 시 전력량을 비교하였다.

4. 시험 결과

4.1. AI 기반 Unit-cooler 제어 알고리즘

알고리즘 기술 검증을 위한 시험은 총 12시간 진행했으며, 12시간 동안 소비된 총 전력량은 81.48 kWh로 확인하였다. 제상 주기는 4시간마다 설정하여 12시간 동안 총 3번의 제상 운전이 실행되도록 하였다. Fig. 8에서 Red line은 제상 운전 시 소비되는 소비 전력량을 나타내고, Black line은 Unit-cooler와 제상 시 소비되는 전력량의 합계를 의미한다. 본 연구에서 진행한 시험에서는 제상 주기 동안 Unit cooler의 fan이 동작하지 않기 때문에 온도 제어를 통한 Unit-cooler 제어는 불가능하다. 따라서, 제상 운전 시에는 설정 온도 제어를 통한 Unit-cooler 제어 결과로 판단하지 않기 때문에 제상 상태에서 소비된 전력량은 최종 소비 전력에서 제외하였다. 상위와 같은 이유로 제상 상태에서의 소비 전력량을 제외하면 총 64.85 kWh이며, 해당 값을 기존 제어를 통한 소비 전력량으로 정의하고 AI 제어 결과와 비교하였다.

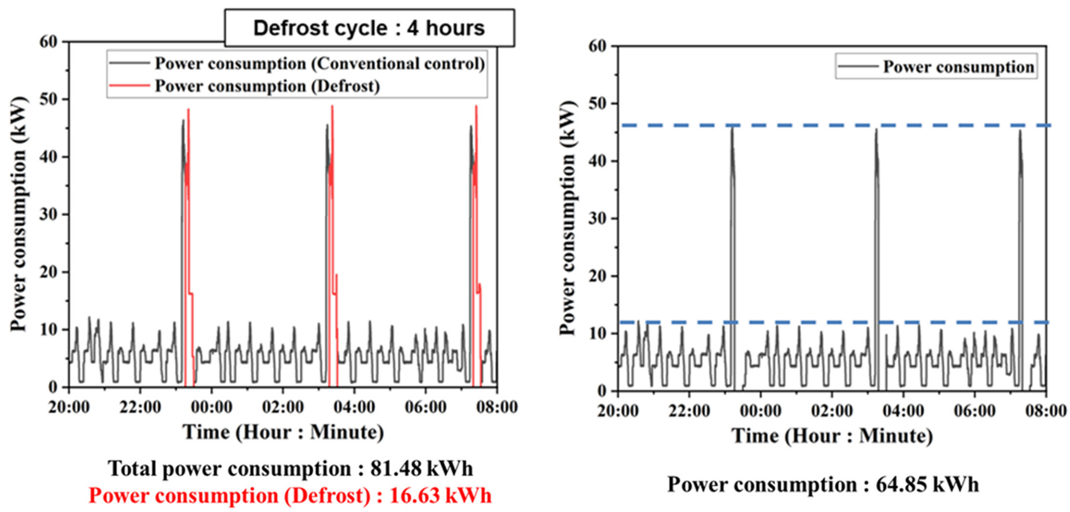


Fig. 8. (left) Power consumption including unit-cooler operation and defrost process and (right) power consumption with constant set-temperature control algorithm, except during defrost.

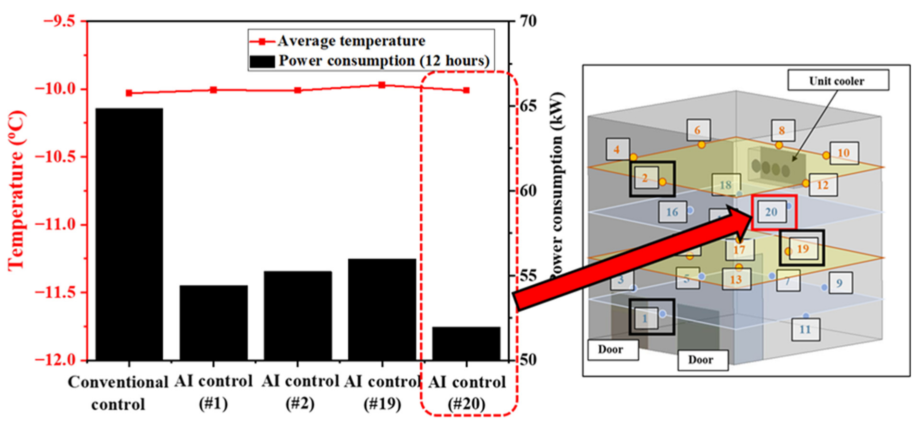


Fig. 9. Conventional Unit-cooler control method vs. Unit-cooler control method based on AI DDPG algorithm.

냉동창고 내 설치된 복수 개의 온도센서 중 20번 센서를 알고리즘의 Input으로 사용해 학습한 경우, 평균 고내 온도는 –10.01°C, 총 소비 전력량은 51.97 kWh로 나타났다. 기존 제어와 AI 제어 결과를 비교한 결과 모든 결과에서 비슷한 평균 고내온도를 보였지만, 그중에서 20번 센서를 Input으로 사용해 알고리즘을 구동한 경우가 가장 높은 에너지 절감 효과(19.8%)를 나타냈다(Fig. 9 참조). 센서 20번의 경우 unit-cooler에 가장 가깝게 위치한 센서이며, 제상 운전에 따른 unit-cooler on/off시 온도 변화에 가장 민감하게 동작·반응하여 다른 위치에 있는 센서보다 에너지 효율 향상에 큰 영향을 미친 것으로 판단하였다.

4.2. AI 기반 자동 제상 알고리즘

시험 결과 Unit cooler의 냉동 운전 시 평균 소비 전력은 11.3 kWh이며, 1회 제상 운전(20분) 시 소비되는 평균 전력은 48 kWh로 확인하였으며, 기존 주기 제상 운전 조건(제상 주기 4시간)에 따른 24시간 소비 전력은 532.2 kWh로 확인하였다. 반면 AI 자동 제상 운전 알고리즘 적용 시 제상 운전 주기는 72시간으로 증가하였고, 그에 따라 24시간 동안 제상 운전은 1회도 동작하지 않았다. 해당 결과 동일 조건에서 소비하는 전력은 271.9 kWh로 48%의 에너지 절감이 가능함을 확인하였다.

열교환기 표면에 형성되는 서리 착상 초기에는 서리층 두께가 얇게 형성되어 Fin 표면온도의 영향을 크게 받지만, 시간이 경과하고, 서리층 두께 성장이 가속화될수록 열저항이 증가하여 Unit cooler 열교환기에 급격한 온도 변화가 관측된다[10,11]. 반면 Fig. 10-11과 같이 시험에 사용된 Unit cooler 열교환기의 경우 급격한 온도 변화는 관측되지 않았다. 해당 결과는 열교환기 표면 서리층 두께가 충분히 성장하지 않았음에도 불구하고 제상이 이루어지고 있다는 의미이며, 불필요한 제상 운전으로 과다한 에너지 소비가 진행되고 있음을 의미한다. AI 자동 제상 운전 알고리즘 적용

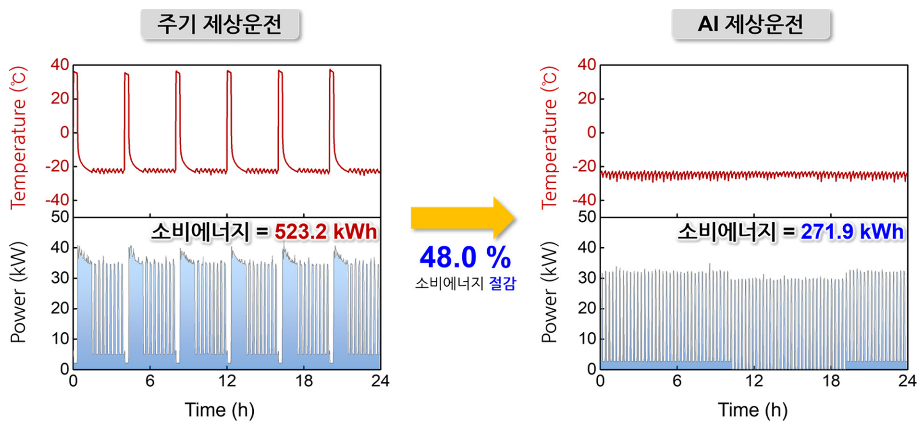


Fig. 10. Energy saving effect by applying AI automatic defrosting operation algorithm.

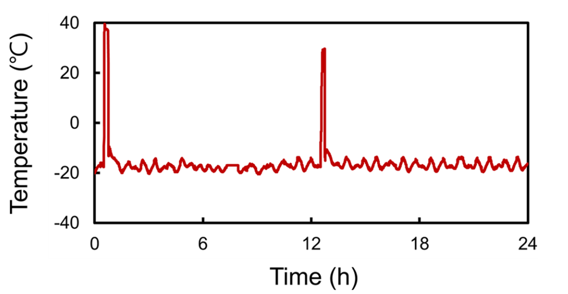


Fig. 11. Temperature change result of the unit cooler heat exchanger during periodic defrosting operation.

시 열교환기 표면에 설치된 온도 값을 Input으로 받고 제상 시점을 판정함으로 불필요한 제상 운전 횟수를 감소시킴에 따라 에너지 절감이 가능함을 저온물류창고 Pilot 실증 모델을 기반으로 확인하였다.

결 론

본 연구는 Pilot 실증 모델을 기반으로 저온물류창고 냉동기 전력 효율을 향상시키기 위해 2종 알고리즘(① AI 및 3D 온도맵핑 기반 유닛쿨러 제어 알고리즘, ② AI 자동 제상 운전 알고리즘)을 개발하여 기존 물류창고에서 운영하는 방식과 개발 기술 적용에 따른 소비 전력량을 비교·분석하였다.

AI 기반 Unit-cooler 제어 알고리즘 적용에 따른 시험 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 서로 다른 위치에 설치된 온도센서 중 어느 센서를 기준으로 학습하는지에 따라 에너지 절감률이 상이하였으며, 본 연구에서는 Unit cooler와 인접한 곳에 설치한 온도센서를 기준으로 할 경우 최적의 에너지 효율을 얻을 수 있었다.
- 제상으로 소비되는 전력량을 제외하고 –10°C 운전 조건에서, 기술 적용 시 총 19.8%(기존 65.85 kWh, 기술 적용 시 51.97 kWh)의 에너지 절감 효과를 확인하였다.

AI 자동 제상 운전 알고리즘 적용에 따른 시험 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 기존 물류창고의 제상 운전 방식은 주기 제상이며. 제상 6회/일을 기존 물류창고의 운영 방식으로 하여 비교하였다.
- 기술 적용 시 제상 운전 주기는 72시간으로 증가하였고, 그에 따라 24시간 동안 제상 운전은 1회도 진행하지 않았다.
- 최종 결과 기존 주기 제상 운전 방식 대비 총 48%(기존 532.2 kWh, 기술 적용 시 271.9 kWh)의 에너지 절감이 가능함을 확인하였다.

본 연구를 통해 얻은 결과는 단시간(12~24시간) 결과 데이터이므로 추후 개발 기술의 신뢰성 확보를 위해 장시간 시험 및 실제 운영 중인 물류창고를 대상으로 기술 적용에 따른 에너지 절감 효과를 검토가 필요하며, 이를 통해 에너지 다소비 업종인 콜드체인 물류 서비스의 에너지 저감은 물론 국가 에너지 부하 저감 및 탄소중립에도 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 에너지수요관리핵심기술개발사업(과제번호 : 2021202080090)에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. 조선일보, 250조 ‘부채 늪’ 한전·가스公, 작년 이자 비용만 6조, 2024.03.04.
2. 투데이에너지 보도자료, 창간특집 냉장·냉동 시스템, 에너지 소비 줄여야, 2024.
3. 박기현, “대학 캠퍼스 건물의 에너지 효율개선 방안 연구”, 에너지경제연구원 연구 보고서, 2015.
4. Lian Cui, Young-Joo Kim, Cheolsun Kim., “Estimation Model of Electric Energy Consumption on Logistics Center Based

on Thermodynamics Theory", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, 2015.

5. 국가물류통합정보센터, "연도별 물류창고업등록현황 정보", 2023, https://www.nlic.go.kr/nlic/fmComplex0010.action.
6. 에너지경제연구원, "KEEI 2024년 에너지수요전망", 제25권 제2호, 2024.
7. 한국철도기술연구원, "에너지 절감형 물류시설 기술개발 기획연구", 국토해양부 한국건설교통기술평가원, 2012.
8. 최민호, 이태동, 김창규, "에너지관리시스템: 물류센터 적용을 중심으로", 대한설비공학회 제 46권 제7호, pp.14-19, 2017.
9. Jong-Whi Park, "Continuous Deep Deterministic Policy Gradient-Based Control Algorithm for Energy-Efficient Cold Storage", Thesis for Doctor of Philosophy, Hanyang Univ., 2024.
10. K.S. Lee, "What is Frost Formation", 공기조화 냉동공학 제 24회, 1995.
11. K.S. Lee, "열교환기 휜에서의 서리층 두께와 서리층 표면온도의 실험 상관식", 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 798-803, 2009.

투고: 2024.11.28 / 심사완료: 2024.12.13 / 게재확정: 2024.12.19