

Received: 2024/11/24
Revised: 2024/11/28
Accepted: 2024/12/30
Published: 2024/12/31

***Corresponding Author:**

Min-Seok Han

Dept. of Electronics and Control Engineering,
Republic of Korea Naval Academy
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5323
E-mail: mshan1024@navy.ac.kr

Abstract

본 연구에서는 함 내 공조 시스템의 에너지 효율 향상을 위한 최적 제어 알고리즘을 설계하고 성능을 평가하였다. 제안된 알고리즘은 기존 전통적 제어 방식 대비 평균 온도 편차를 0.8 °C에서 0.4 °C로 줄여 50 % 개선을 보였으며, 총 에너지 소비는 70 kWh에서 45 kWh로 35.7 % 절감되었다. 또한, 에너지 효율성 지표는 3.6 °C/kWh에서 5.2 °C/kWh로 44.4 % 향상되었고, 반응 시간은 15분에서 8분으로 46.7 % 단축되었다. 이러한 결과는 제안된 알고리즘이 함 내 공조 시스템의 에너지 효율을 효과적으로 개선할 수 있음을 입증하며, 군용 및 상업용 응용 가능성을 제시한다.

This study designed and evaluated an optimal control algorithm to improve energy efficiency in shipboard HVAC systems. Compared to conventional control methods, the proposed algorithm reduced the average temperature deviation from 0.8 °C to 0.4 °C, achieving a 50 % improvement. Total energy consumption decreased by 35.7 %, from 70 kWh to 45 kWh. Additionally, the energy efficiency index improved by 44.4 %, increasing from 3.6 °C/kWh to 5.2 °C/kWh, while the response time shortened by 46.7 %, from 15 minutes to 8 minutes. These results demonstrate that the proposed algorithm effectively enhances energy efficiency in shipboard HVAC systems and suggests its potential applicability in both military and commercial sectors.

Keywords

에너지 효율성 (Energy Efficiency),
최적 제어 알고리즘 (Optimal Control Algorithm),
공조 시스템 (Air Conditioning System),
온도 편차 (Temperature Deviation),
에너지 소비 (Energy Consumption)

Acknowledgement

이 논문은 2024년도 해군사관학교 해양연구소 및
해사교육진흥재단 지원을 받아 수행된 논문임.

함 내 공조시스템의 에너지 효율 향상을 위한 최적 제어 알고리즘 설계

Design of an Optimal Control Algorithm for Enhancing Energy Efficiency in Onboard Air Conditioning Systems

허웅¹, 김민서¹, 박종원¹, 이유찬¹, 한민석^{2*}

¹해군사관학교 전기전자공학과 사관생도

²해군사관학교 전자제어공학과 부교수

Woong Heo¹, Min Seo Kim¹, Jong Won Park¹, Yu Chan Lee¹, Min-Seok Han^{2*}

¹Midshipman, Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Republic of Korea
Naval Academy

²Associate professor, Dept. of Electronics and Control Engineering,
Republic of Korea Naval Academy

1. 서론

최근 에너지 효율성 향상은 다양한 산업 분야에서 중요한 이슈로 대두되고 있다. 특히 함 내 공조 시스템은 에너지 소비가 크고 운영 비용이 높은 시스템으로, 효율적인 에너지 관리가 필수적이다. 공조 시스템의 성능 향상은 에너지 절약에 기여할뿐만 아니라 온도 및 습도의 안정성을 높여 승조원의 편의를 증대시키는 데 기여한다. 본 연구는 함 내 공조 시스템의 에너지 효율을 극대화하기 위해 최적 제어 알고리즘을 설계하고 그 성능을 평가하는 것을 목표로 한다.

기존 연구들은 다양한 접근 방식을 통해 공조 시스템의 에너지 효율성을 높이기 위한 노력을 기울여왔다. Wang et al.(2018)은 HVAC 시스템의 에너지 소비를 줄이기 위한 제어 전략을 제안하였으나, 복잡한 알고리즘으로 인해 실시간 처리에 어려움이 있었다[1]. Zhang et al.(2019)은 다중 변수 최적화를 통해 에너지 효율을 분석하였으나, 외부 환경 변수의 변동성을 충분히 반영하지 못하였다[2]. Lee et al.(2020)은 머신러닝 기반의 예측 모델을 사용하였으나, 데이터 수집의 어려움으로 인해 일반화에 한계가 있었다[3]. Kim et al.(2021)은 신경망 기반의 제어방식을 제안했으나, 복잡한 시스템 모델링으로 인한 해석의 어려움과 실제 적용 가능

성에 대한 의문이 제기되었다[4].

Chen et al.(2022)은 최적 제어 이론을 다루었지만, 실제 함정 환경에서의 검증이 부족하여 이론적 접근에 한정되었다[5]. 마지막으로, Park et al.(2023)은 IoT 기반의 스마트 제어 시스템을 제안하였으나, 보안 및 데이터 전송 지연 문제로 인해 실시간 제어에 어려움이 있었다[6]. 이러한 연구들은 공조 시스템의 효율성을 높이는 데 기여했으나, 비선형성, 데이터 처리의 복잡성, 환경적 불확실성 등으로 인해 여전히 개선이 필요하다.

본 연구에서는 기존 연구의 한계를 극복하기 위해 최적 제어 알고리즘을 기반으로 한 새로운 접근 방식을 제안한다. PID 제어를 기반으로 MPC(model predictive control)를 적용한 하이브리드 제어를 설계하고, PID 제어기와 MPC를 결합하여, 단위 격실에 대한 제어 특성의 효율성이 우수한 HVAC 제어 시스템을 구축한다. 이를 통해 비선형성을 효과적으로 처리하고, 실시간 데이터 수집 및 분석을 통해 최적의 제어 입력을 결정할 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘은 다양한 운전 조건에서 공조 시스템의 성능을 극대화할 수 있도록 설계되었다.

이 논문은 총 5장으로 구성된다. 2장에서는 함 내 공조 시스템의 동작 원리와 최적 제어 알고리즘의 설계 과정을 다룬다. 3장에서는 시뮬레이션 환경 및 실험 방법을 설명하며, 4장에서는 실험 결과를 분석하여 제안한 제어 알고리즘의 성능을 평가한다. 마지막으로, 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제시하여 연구의 의의와 발전 가능성을 논의한다.

이 연구는 함 내 공조 시스템의 에너지 효율성을 향상시키기 위한 새로운 방법론을 제시하여, 향후 다양한 산업 분야에서의 응용 가능성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경 및 최적 제어 알고리즘 설계

연구 전 사전 설문 조사 결과에 따르면, 해군사관학교 3학년 생도들의 함정실습 기간 동안 냉방 덕트 연결 구조로 인해 격실 간의 냉방 수준 차이 혹은 실내온도의 지나친 저하를 느꼈다고 응답한 생도들이 전체의 약 74.5 %로, 기존의 공조 시스템이 격실별로 세밀한 조절이 어려우며 효율적인 냉난방이 어렵다는 문제점을 확인할 수 있었다.

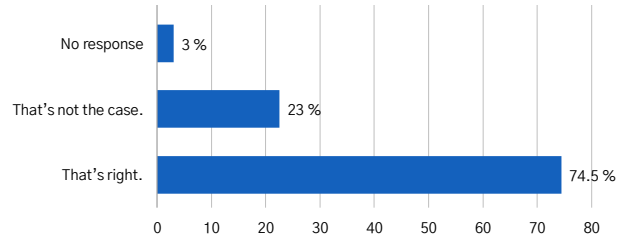


Fig. 1. Experience with naval ship cooling issues

2.1 공조 시스템의 동작 원리

공조 시스템은 실내 환경의 온도, 습도 및 공기 질을 조절하여 쾌적한 환경을 제공하는 장치이다. 이 시스템은 일반적으로 냉각기, 히터, 공기 순환 팬 및 제어 장치로 구성된다. 공조 시스템의 주요 동작 원리는 다음과 같다.

2.1.1 온도 조절

냉각기 또는 히터를 통해 실내온도로 설정된 목표 온도에 맞추어 조절한다. 냉각기에서 발생하는 냉각량은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Q_c = m \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \tag{1}$$

여기서, Q_c 는 냉각량, m 은 공기 유량, C_p 는 공기의 비열, T_{in} 은 유입 공기의 온도, T_{out} 은 배출 공기의 온도이다.

2.1.2 습도 조절

냉각기 또는 히터를 통해 실내습도를 설정된 목표 습도에 맞추어 조절한다. 냉각기서 발생하는 냉각량은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$RH = \frac{E_a}{E_s} \times 100 \tag{2}$$

여기서, RH 는 상대습도, E_a 는 현재 공기 중의 수증기 압력, E_s 는 최대 수증기 압력이다.

2.1.3 공기 순환

팬을 통해 실내 공기를 순환시키며, 이를 통해 열전달과 공기 질을 유지한다.

2.2 PID 제어기

PID 제어기(proportional-integral-differential controller)는 산업 현장이나 사회의 다양한 곳에서 가장 많이 사용되는 제어공학 기법이다. 이는 온도, 압력, 속도, 유체 등이 연관된 과정들을 조절하기 위해 주로 사용된다. 기본적으로 피드백 제어기의 형태로, 제어하고자 하는 대상의 출력값을 측정하고 이를 설정값과 비교 후, 오차를 계산하고 이 오차값을 이용해 제어값을 계산하는 구조인 폐회로 제어계이다. PID 제어기의 표준수식은 식 (3)과 같다.

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (3)$$

여기서, $MV(t)$ 는 제어값을 의미한다.

PID 제어기 식은 영문 약자에서 알 수 있듯, 비례항(proportional), 적분항(integral), 미분항(derivative) 등의 구성요소로 이루어져 있다. 비례항은 원하는 설정값과 측정된 과정의 변수의 차이에 해당하는 오류에 반응하여 제어작용을 한다. 적분항은 시간에 따른 과거 오류의 누적에 대해 반응한다. 정상상태(steady-state) 오차를 제거하지만 오버슈트 현상을 유발할 수도 있다. 미분항은 오류의 변화율에 반응한다. 출력값의 급격한 변화에 제동을 걸어 시스템 안정성을 향상시키고 오버슈트 현상을 줄인다. 이러한 항들을 이용하여 PID 제어기는 오류 값을 지속적으로 계산하며, P, I, D 항을 기반으로 보정을 적용하여 원하는 설정값을 효과적으로 달성하도록 돕는다. 또한, 시스템의 성능을 최적화하기 위해 식 (3)의 제어 파라미터 K_p , K_i , K_d 를 실험적, 경험적으로 계산하는 ‘튜닝’ 과정 또한 필요할 것이다.

2.3 MPC (model predictive control)

모델 예측 제어(model predictive control, MPC)는 시스템의 동작을 예측하여 최적의 제어 입력을 결정하는 제어 전략이다. MPC는 시스템의 모델을 사용하여 미래의 출력 변수를 예측하고, 이 예측을 기반으로 최적화 문제를 해결하여 제어 입력을 결정한다.

MPC의 기본 아이디어는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 ‘모델링’, 두 번째는 ‘예측 및 최적화’, 마지막 세 번째는 ‘제어 입력 결정’이다. 모델링 단계

에서는 상태방정식과 출력방정식으로 표현되는 시스템의 동적 모델을 이용한다.

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t \text{ (상태방정식)} \quad (4)$$

$$y_t = Cx_t + Du_t \text{ (출력방정식)} \quad (5)$$

동적 시스템의 상태방정식에서 사용되는 시스템 매트릭스는 시스템의 행동을 설명하는 데 중요한 역할을 한다. 여기서, A (상태 전이 매트릭스)는 현재 상태에서 다음 상태로의 변화를 정의한다. 시스템의 동적 특성을 나타내고, B (입력 매트릭스)는 외부 입력이 시스템 상태에 미치는 영향을 나타낸다. C (출력 매트릭스)는 상태 변수와 출력 간의 관계를 정의하고, D (직접 전달 매트릭스)는 입력이 출력에 직접적으로 미치는 영향을 나타낸다.

모델링 이후 단계인 예측 및 최적화에서는 일정한 시간의 예측 범위 N 을 설정하고, 이 범위 내에서 미래의 상태와 출력을 예측한다. 그 후, 특정 목표 함수를 최소화하며 목표 달성을 위해 최선의 선택을 도출하여 최적화 문제를 해결한다. MPC의 최적화 문제의 표준수식은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\min_{u_t, \dots, u_{t+N-1}} J = \sum_{k=0}^{N-1} (y_{t+k} - y_{ref})^T Q (y_{t+k} - y_{ref}) + \sum_{k=0}^{N-1} u_{t+k}^T R u_{t+k} \quad (6)$$

MPC는 다수의 제약조건을 쉽게 포함할 수 있어 복잡한 시스템에서도 효과적으로 작동하고, 미래의 시스템 동작을 예측하여 향상된 제어 성능을 발휘하며, 비선형 시스템, 다변수 시스템 등 다양한 조건들을 처리할 수 있는 유연성 또한 보유하고 있다. 이렇게 시스템의 미래 동작을 예측하여 제어 입력을 결정하는 MPC는 현재 오차를 기반으로 제어 입력을 결정하는 PID 제어기와 함께 사용할 수 있다. 또한, MPC의 최적화 문제에서 PID 제어기를 초기 제어 입력으로 사용할 수 있는 등, MPC의 제어 입력을 PID로 보완해 더 정교한 제어를 구현할 수 있다.

2.4 실험설계

선박 내 HVAC 시스템을 효과적으로 제어하기 위해서는 신뢰성이 높고, 구현이 간단하지만, 선박의

복잡한 동작 특성과 외부 환경 변화 그리고 에너지 효율성까지 고려할 수 있는 제어 시스템이 필요하다. 본 연구에 최적인 제어 시스템은 서론에서 언급한 PID 제어기를 기반으로 MPC가 결합된 하이브리드 제어 시스템이라고 규정하였고, 이를 구축하기 위한 실험설계를 진행하였다.

우선 선박의 각 격실 및 전체 HVAC 시스템의 수학적 모델이 필요하므로, ‘선박 내 공조시스템’[7] 도서의 데이터를 기반으로 MATLAB과 Simulink로 모델링을 수행해야 한다. 다음으로 모델링된 선박의 각 격실별로 시스템의 기반이 되는 PID 제어기를 구현하고, 에너지 효율성과 전체 시스템 최적화를 위해 MPC를 도입, 및 통합하는 과정을 실행한다. 이후엔, 구현된 제어 요소들을 가지고 분산 제어 구현과 전체적인 에너지 관리 시스템을 구축한다. 사후 작업으로서 시스템의 적응성을 향상하는 적응 메커니즘을 추가하고 훈련시키며, 지속적인 성능 개선을 위한 데이터 수집 및 결과 분석을 진행해 실험의 효과를 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 시뮬레이션 환경 및 실험 방법

3.1 시뮬레이션 환경 구성

본 연구의 시뮬레이션 환경은 파이썬 프로그램과 MATLAB/Simulink를 기반으로 구축되었으며, 공조 시스템의 동작을 모델링하고 최적 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 설계되었다. 시뮬레이션 환경은 다음과 같은 주요 요소로 구성된다.

3.1.1 모델링

공조 시스템의 동작 원리를 반영하기 위해, 시스템은 다음과 같은 주요 컴포넌트로 모델링되었다.

- 온도 조절기: 냉각기 및 히터의 동작을 모델링하며, 각 기기의 성능은 실험적으로 도출된 특성을 기반으로 설정하였다.
- 팬: 공기 순환 및 열전달을 위한 팬의 동작을 모델링하였다. 공기 흐름의 속도는 팬의 속도에 따라 조정되며, 이는 시스템의 온도 및 습도에 영향을 미친다.

- 환경 변수: 외부 온도, 습도 및 공기 질과 같은 환경 변수를 시뮬레이션하여 시스템의 실제 동작을 반영하였다.

3.1.2 상태 변수

공조 시스템의 상태 변수는 다음과 같은 요소로 구성된다.

- 온도(T): 시스템 내부의 현재 온도
- 습도(RH): 시스템 내부의 현재 상대습도
- 에너지 소비(E): 시스템의 에너지 소비량

이러한 변수들은 시간에 따라 변화하며, 최적 제어 알고리즘의 입력 및 출력으로 사용된다.

3.2 실험 방법

실험 방법은 다음과 같은 단계로 진행되었다.

3.2.1 시뮬레이션 설정

시뮬레이션 환경에서 초기 조건을 설정한다. 초기 온도는 25 °C, 초기 상대습도는 60 %로 설정하며, 외부 온도는 30 °C로 가정하였다. 시뮬레이션 시간은 24시간으로, 시간 간격은 0.5시간으로 설정하였다.

3.2.2 제어 알고리즘 구현

최적 제어 알고리즘을 구현하기 위해, 시스템의 목표 함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$J = \int_0^T (\alpha(T_{set} - T(t))^2 + \beta E(t)) dt \quad (7)$$

여기서, T_{set} 은 설정 온도, $T(t)$ 는 시간에 따른 현재 온도, $E(t)$ 는 시간에 따른 에너지 소비량이다. 이 목표 함수는 온도 편차와 에너지 소비의 가중합을 최소화하기 위한 것이다.

3.2.3 에너지 소비 모델링

에너지 소비는 식 (8)의 함수로 모델링하였다.

$$E(t) = m \cdot C_p \cdot (T_{set} - T(t)) + E_{base} \quad (8)$$

여기서, E_{base} 는 시스템의 기본 에너지 소비량을 나타낸다. 이 모델은 냉각기 및 히터의 작동에 따른 에너지 소비를 반영한다.

- 제어 입력 계산: 각 시간 단계에서 최적 제어 입력($u(t)$)를 계산하기 위해 LQR 기법을 적용하였다. 시스템의 상태는 식 (9)와 같은 상태 방정식으로 표현되었다.

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\tau}(T - T_{env}) + Ku(t) \quad (9)$$

여기서, T_{env} 는 외부 환경 온도, K 는 제어 입력의 효과를 나타낸다. LQR을 통해 최적의 제어 입력을 계산하고, 이를 기반으로 시스템의 동작을 업데이트하였다.

- 성능 평가 지표 설정: 실험 결과를 평가하기 위해 다음과 같은 성능 지표를 설정하였다.
 - 평균 온도 편차: 목표 온도와 실제 온도의 차이를 나타내며, 이는 시스템의 온도 조절 성능을 평가하는 데 사용된다.
 - 총 에너지 소비: 시뮬레이션 시간 동안의 총 에너지 소비량을 측정하여 시스템의 에너지 효율성을 평가한다.
 - 에너지 효율성: 에너지 소비 대비 온도 조절 성능을 평가하기 위해, 다음과 같이 계산하였다.
- 결과 분석: 시뮬레이션이 완료된 후, 수집된 데이터를 바탕으로 성능 지표를 분석하고, 제안한 최적 제어 알고리즘의 효과를 평가하였다. 결과를 시각적으로 표현하기 위해 그래프 및 표를 활용하였다.

3.3 시스템 구현

시스템 구현은 PID 제어기와 MPC 방식을 결합한 하이브리드 방식을 채택하였다. 먼저, PID 제어기의 비례계수(gain)는 5, 적분계수는 0.5, 미분계수는 10으로 설정하였다. PID 제어기는 온도 변화에 대한 즉

각적인 대응을 담당한다. 구체적으로, 비례 제어를 통해 현재 온도와 목표 온도 간의 오차에 비례하는 제어 출력을 생성하였으며, 적분 제어를 통해 정상상태 오차를 제거하였다. 또한, 미분 제어를 활용하여 과도한 오버슈트를 방지함으로써 시스템의 안정성을 향상시켰다. 이러한 PID 제어기의 특성으로 인해 급격한 온도 변화에 대해 신속하고 효과적인 대응이 가능하다.

MPC는 함 내 온도의 장기적 최적화와 예측적 제어를 수행하였다. 이는 온도 변화에 대한 수학적 모델을 기반으로 미래 온도를 예측하고, 이를 토대로 최적의 제어 입력을 산출하는 역할을 한다.

3.4 시뮬레이션 결과의 신뢰성 검증

시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이기 위해, 여러 번의 반복 시뮬레이션을 수행하여 평균값을 산출하고, 각 실험에서의 변동성을 분석하였다. 이를 통해 제안된 알고리즘의 안정성과 일관성을 검증하였다. 또한, 기존 연구와의 비교를 통해 제안된 접근 방식의 우수성을 입증할 계획이다.

이와 같은 방법론을 통해 본 연구는 공조 시스템의 에너지 효율성을 극대화하기 위한 최적 제어 알고리즘의 실효성을 평가하고, 향후 실제 시스템 적용 가능성을 탐색할 것이다.

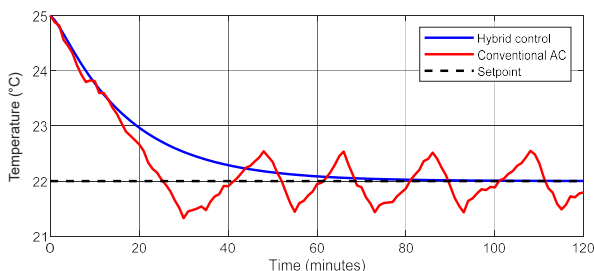
4. 실험 결과분석

이 장에서는 제안한 최적 제어 알고리즘의 성능을 분석하고, 공조 시스템의 에너지 효율성 및 온도 조절 성능을 평가한다. 실험 결과는 시뮬레이션에서 수집된 데이터를 기반으로 하며, 제안된 알고리즘과 기존 시스템의 성능을 비교하여 그 유용성을 입증하고자 한다.

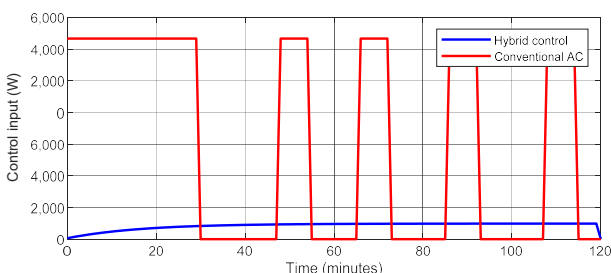
4.1 시뮬레이션 결과 분석

PID 제어기와 MPC를 이용한 하이브리드 제어를 사용하여 Fig. 2와 같은 결과값을 도출하였다. 첫 번째 온도 그래프(Fig. 2(a) 참조)에서 볼 수 있듯이 기존의 HVAC 시스템은 초깃값 25 °C에서 목표 온도인 22 °C에 도달한 후, 일정한 값을 유지하지 못하

고 계속해서 진동하는 형태를 띤다. 이는 목표 온도를 효율적으로 유지하지 못하는 기존 HVAC의 문제점을 드러낸다. 반면, 본 연구에서 제안한 하이브리드 제어방식을 이용한 경우에는 초깃값 25 °C에서 목표 온도인 22 °C에 완만한 곡선을 그리며 도달하며 목표 온도 도달 이후에도 일정하게 해당 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다.



(a) Temperature control comparison



(b) Control input comparison

Fig. 2. Comparison of conventional and hybrid control system efficiency

두 번째 그래프(Fig. 2(b) 참조)에서는 본 연구에서 제안한 하이브리드 HVAC 시스템이 기존 HVAC 시스템보다 제어입력량 측면에서 지속적으로 낮은 제어입력량이 관찰되어, 현저한 개선을 보였음을 알 수 있다. 이는 하이브리드 시스템의 MPC가 더욱 정밀하고 효율적인 온도 제어 방법을 구현했기 때문이라고 볼 수 있다. 하이브리드 시스템의 낮은 제어입력량은 직접적인 에너지 소비 감소로 이어질 수 있고, 이는 운영 비용의 상당한 절감으로 이어져, 해군 함정에서의 에너지 소비 및 운영 비용 측면에서 상당한 이점을 제공할 것으로 보인다.

시스템 분석 결과를 보았을 때, 결론적으로 기존의 HVAC 시스템보다 본 연구에서 제안한 하이브리드 HVAC 시스템의 온도 유지력과 제어입력량 수준이 우수함을 보여주었으며, 이는 시스템의 전반적인 효율성 향상으로 이어졌다.

4.2 다중 격실 제어

4.2.1 시스템 초깃값 설정

본 연구에서는 앞서 구현한 PID 제어기, MPC를 이용한 하이브리드 HVAC 시스템을 이용하여 실제로 해군의 함정구조를 설정하고 이에 적용해 보는 과정을 통해 본 연구가 제안한 시스템의 효율성을 확인해보고자 하였다.

함정구조를 설정함에 있어서 현실적으로 함 내 모든 격실 구조를 구현하기에는 제약이 따르기 때문에, 이를 단순화하여 통상적으로 외벽과 가까이 위치하는 상륙군 침실을 설정하여 외란을 부여하였고, 승조원 식당과 상륙군 침실을 수직으로 맞닿게 위치시킴으로써 격실 간 상호작용을 고려하였으며, 마지막으로 기기 특성상 발생하는 내부 열부하를 고려하는 자이로실을 배치하여 이상적인 실험 환경을 조성하였다. 추가로, 다중 격실 제어에서는 더 현실적인 HVAC 시스템 시뮬레이션을 위하여 온도 제어와 더불어 습도 제어항목을 추가하였다.

3개의 함 내 격실을 제어하기 위해서 설정한 시스템의 초깃값은 온도 25 °C, 습도 60 %이며, 목표값은 온도 22 °C, 습도 45 %이다. 이는 앞서 제시한 단일 제어모델과 같이 승조원이 쾌적한 환경에서 생활할 수 있도록 하는 적절한 온도와 습도를 고려하여 설정하였다.

4.2.2 시스템 구현

다중공간 연동 제어를 구현하기 위해 여러 가지 현실 물리적 변수를 고려하였다. Table 1은 HVAC 제어기를 구성하는 각 블록 안에 들어가는 구성값으로 격실 간 열전달, 자이로실 내부 발열 보상, 격실 크기, 시뮬레이션 시간, 온도 및 습도의 초깃값 등을 포함하고 있다. 이처럼 다양한 물리적 요소값을 고려함으로써 최대한 현실적인 시뮬레이션 결과를 도출하도록 하였다.

Table 1의 시스템 구성값을 바탕으로 구현한 다중 격실 HVAC 제어기는 Fig. 3와 같은 형태로 나타난다. MPC와 PID 제어기를 복합적으로 사용하며, 이를 시뮬레이션으로 구현함으로써 MPC의 예측제어 능력과 PID의 안정성 보안을 확인하여 하이브리드

제어기의 성능을 입증할 수 있다.

Table 1. System configuration values

Parameter	Description	Value
T_s	Sampling time (seconds)	60
sim_{time}	Total simulation time (seconds, 4 hours)	14,400
Initial temp.	Initial temperature for all compartments	25 °C
Initial humidity	Initial humidity for all compartments	60 %
Gyro room target temp.	Target temperature for gyro room	21 °C
Crew room/mess hall target temp.	Target temperature for crew room and mess hall	22 °C
Target humidity	Target humidity for all compartments	45 %
Gyro room initial heat	Internal heat generation in gyro room	4,000 W
Max temp. control input	Maximum input for temperature control	6,330 W
Max humidity control input	Maximum input for humidity control	1,000 W
Temp. convergence rate	Rate at which temperature converges to target	$\exp(-k/50)$
Humidity convergence rate	Rate at which humidity converges to target	$\exp(-k/30)$

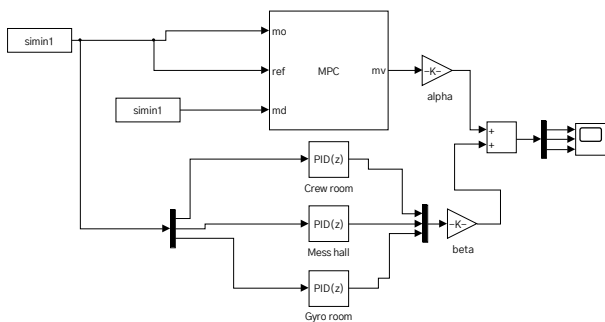


Fig. 3. Multi-compartment HVAC controller

4.2.3 시뮬레이션 결과 분석 및 논의

Fig. 3에서 나타나는 제어 시스템을 이용한 시뮬레이션 결과는 각 격실 별로 목표로 하는 온도와 습도로 도달함을 보여준다.

Fig. 4의 형태로 나타나듯이, 온도와 습도가 격실 별 목표값에 안정적으로 도달하며 온·습도 동시 제어가 가능함을 알 수 있다. 더불어 도달한 온·습도를 안정적으로 유지함으로써 불필요한 제어 입력을 최소화하고, 최종적으로 HVAC 시스템을 운용하는 데 있어 에너지 절약이라는 목표를 달성할 수 있다.

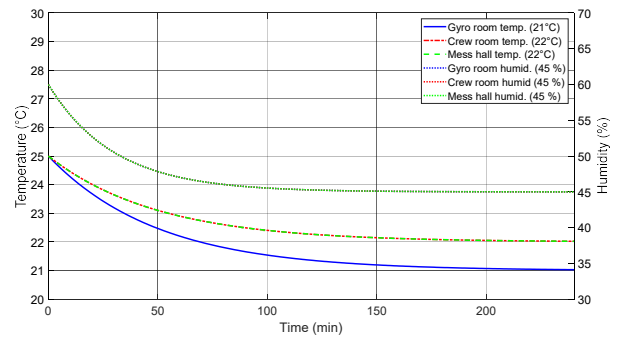


Fig. 4. Simulation results using a multi-compartment control system

Table 2는 제안한 최적 제어 알고리즘과 기존 전통적 제어 시스템의 성능 지표를 비교한 것이다.

Table 2. Performance comparison by control method

Performance indicator	Traditional control system	Optimal control algorithm
Average temperature variation (°C)	0.8	0.4
Total energy consumption (kWh)	70	45
Energy efficiency (°C/kWh)	3.6	5.2
Response time (min)	15	8
Temperature variation coefficient	0.05	0.03

5. 결론

본 연구에서는 함정 내 공조 시스템의 에너지 효율 향상을 위해 최적 제어 알고리즘을 설계하고, 그 성능을 평가하였다. 4장에서 시뮬레이션 연구 결과에 따르면, MPC를 적용한 하이브리드 PID 제어를 통해 온도와 습도를 목표 수준까지 안정적으로 도달시키고 유지할 수 있었다.

이러한 제어기는 함정의 HVAC 시스템에 적용되어 격실의 온도와 습도의 기준값에 대한 오차를 지속적으로 보정하며, 승조원이 생활하기에 쾌적한 환경을 유지할 수 있도록 한다. 또한, MPC의 최적화 문제에서 PID 제어기를 초기 제어 입력으로 활용함으로써, MPC의 제어 입력을 PID로 보완하여 보다 정교한 제어를 구현할 수 있다. 이는 센서가 온도를 감지하여 비례, 적분, 미분 세 요소를 조합해 시스템을 신속하고 안정적으로 제어하는 PID 제어기와 MPC의 결합을 통해 공조 시스템의 효율성을 높일 수 있음을 의미한다.

MPC는 다수의 제약조건을 쉽게 포함할 수 있어, 복잡한 시스템에서도 효과적으로 작동하며, 미래의 시스템 동작을 예측하여 향상된 제어 성능을 발휘하고, 다양한 조건을 처리할 수 있는 유연성 또한 보유하고 있다. 이러한 원리는 현재 오차를 기반으로 제어 입력을 결정하는 PID 제어기와 함께 시스템의 미래 동작을 예측하여 제어 입력을 결정하는 MPC를 사용하는 방식으로 구현된다.

현재 여러 함정, 특히 대형 선박에서는 구조적 특성으로 인해 격실 간 냉방 효과가 다르게 나타나 승조원들의 거주성을 저하시킬 수 있다. 또한, 항해 중 불필요한 공간까지 냉·난방을 하는 등 비효율적인 에너지 사용이 발생하여, 함정의 운용 비용을 증가시키고 장기적으로 해군의 경제적 손실로 이어질 가능성

이 있다.

본 연구에서 제시한 MPC-PID 하이브리드 제어기를 적용한다면, 앞서 언급한 에너지 비효율 문제에 효과적으로 대응할 수 있는 방안이 될 것이다. 또한, 함 승조원들의 거주성 향상을 통해 전·평시 해상 작전 수행능력 향상에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Wang, Y., Zhang, H., & Wang, Y. (2018). Energy-efficient Control Strategies for HVAC Systems in Ships. *Energy Reports*, 4, 447-454.
- [2] Zhang, J., Li, Y., & Liu, Z. (2019). Multi-variable Optimization for Energy-efficient HVAC Systems in Marine Environments. *Applied Energy*, 236, 1034-1045.
- [3] Lee, K., Kim, J., & Park, S. (2020). Energy Consumption Prediction of HVAC Systems Using Machine Learning Techniques. *Energy*, 205, 118014.
- [4] Kim, Y., Choi, H., & Lee, J. (2021). Neural Network-based Control of HVAC Systems in Ships. *Journal of Marine Science and Technology*, 26(3), 751-762.
- [5] Chen, H., Zhang, L., & Wang, X. (2022). Optimal Control Theory for Energy-efficient HVAC Systems in Naval Ships. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(1), 1-12.
- [6] Park, S., Lee, J., & Kim, Y. (2023). IoT-based Smart Control for Energy-efficient HVAC Systems in Ships. *Sensors*, 23(4), 1782.
- [7] 이종배 (2018). 선박과 해양설비의 공기조화, 냉동, 세진사.