

논문 2024-19-16

# 시스템 에어컨의 온도 제어를 위한 부하 예측 기반 스위칭 모델 예측 제어 (Heat Load Estimation-Based Switching Explicit Model Predictive Temperature Control for VRF Systems)

김 준 영, 이 상 문\*  
(Jun-Yeong Kim, S.M. Lee)

Abstract : This paper proposes an EMPC (Explicit Model Predictive Controller) for temperature tracking control based on heat load prediction by an ESO (Extended State Observer) for a variable cooling circulation system with multiple indoor units connected to one outdoor unit. In this system, heat transfer and heat loss relative to the input temperature are modeled using system dynamics. Using this model, we design an EMPC based on an ESO that is robust to temperature changes and depends on airflow. To determine the stability of both the controller and the observer, asymptotic stability is verified through Lyapunov stability analysis. Finally, to validate the performance of the proposed controller, simulations are conducted under three scenarios with varying airflow, set temperature, and heat load.

Keywords : HVAC system, Lumped Model, Explicit Model predictive controller, External Disturbance, Extended State Observer

## 1. 서 론

시스템 에어컨은 소수의 실외기와 다수의 실내기로 구성된 장치를 의미한다. 내부에는 복잡한 동역학 장치를 기반으로 작동하는 EEV, 증발기, 열 교환기, 그리고 압축기들이 존재한다 [1]. 그러나 시스템 에어컨은 이러한 구성 요소 간에 높은 의존성에 의하여 제어 로직을 결정하는데, 많은 어려움이 존재한다. 따라서 연구자들은 더욱 효율적인 제어기 설계를 위하여 다양한 시스템 모델들을 채택하였다. 대표적으로 (1) 열역학적 모델 (Thermal dynamics model), (2) 인공신경망 기반 모델 (Artificial Neural Network-based model), (3) Lumped 모델들이 해당한다. 열역학적 모델의 경우, 시스템을 설계하기 위해서는 공간 온도와 연관된 모든 열역학 파라미터를 측정할 수 있어야만 모델링이 가능하다 [2, 3]. 하지만 인공신경망 모델의 경우 데이터 간의 규칙성을 찾아냄으로써 효율적으로 온도 모델을 설계할 수 있었다 [4-7]. 그러나 인공신경망 모델은 정확한 모델을 생성하기 위해 많은 양의 데이터들이 필요하며, 데이터의 불확실성이나 잡음으로 인해 학습 불균형이 초래될 수 있다.

최근 연구들은 효율적으로 시스템 에어컨을 제어하기 위하여, Lumped 모델을 채택하였다 [8-10]. Lumped 모델은

시스템 에어컨의 열역학 모델을 간단한 형태로 구성한 모델이다. Lumped 모델은 경우 몇 개의 주요 변수와 파라미터만을 사용하여 시스템을 설명하기 때문에 복잡한 시스템 에어컨의 구조와 동작 원리를 이해하기가 쉬우며, 효과적인 제어기를 설계하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 최소한의 파라미터만을 가지고 시스템 에어컨의 실내기들의 열 동역학적 특성을 기반으로 풍량에 따라 제어되는 공간 온도와 배관 출구 온도를 간단한 형태로 모델링한 Lumped 모델을 채택하였다 [11-13]. 따라서 기존 시스템 에어컨에서 간과했던 실외기의 에너지 사용량 문제를 에너지 사용 문제를 간접적으로 해결할 수 있다.

현재 다양한 제어 기법이 시스템 에어컨의 효율적인 온도 관리를 위해 채택되고 있다. 이들 중 PID 제어, 슬라이딩 모드 제어, 선형 이차 조절기 (LQR), 인공신경망 기반 제어, 그리고 MPC가 포함된다. MPC는 미래의 공간 온도 변화를 예측하여 시스템의 제약을 고려한 최적의 입력을 도출할 수 있는 제어기이다 [14, 15]. 최근 많은 연구가 시스템 에어컨의 최적 온도 제어를 위한 MPC의 적용 가능성을 보여주었다. Johan Theunissen은 MPC의 계산 복잡도를 줄이기 위해 명시적인 모델 예측 제어 방법을 설계하였다 [16]. 또한, Song Siyang은 공간 온도 예측의 불확실성에 대응하기 위해 신경망 기반의 모델 예측 제어 접근법을 소개했다 [17]. Soroush rastegarpour은 시스템 에어컨의 효율적으로 공간 온도 제어를 하기 위하여 시스템 에어컨의 비선형 Dynamics를 기반으로 설계한 모델을 기반으로 NMPC (Nonlinear MPC)를 제안하였다 [18]. Shiyu Yang은 인공신

\*Corresponding Author (moony@knu.ac.kr)  
Received: Jun. 18, 2024, Revised: Jun. 19, 2024, Accepted: Jun. 26, 2024.  
J.Y. Kim: Kyungpook National University (M.S. Course Student)  
S.M. Lee: Kyungpook National University (Prof.)  
\* 본 논문은 2024년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00350118).

경망을 사용하여 시스템 다이내믹스 모델을 학습시키고, 이를 강화학습 기반의 approximate MPC를 사용하여 cost를 최소화해 공간 온도를 제어하는 연구를 제안하였다 [19]. 하지만 인공신경망 모델을 생성하기 위하여 모든 열역학 파라미터를 측정해야 하기에 현실적으로 무리가 존재한다.

따라서 오늘날에는 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 Lumped model에 MPC를 이용하여 공간 온도와 에너지 사용량만을 비용함수로 정의하여 에너지 효율적인 제어를 설계하려는 다양한 연구들이 있었다 [20, 21]. 이러한 연구의 경우 외부 외란에 해당하는 온도 부하를 고려하지 않았다. 따라서 온도 부하에 대해서 민감하게 반응하고 최적성을 보장하지 못하며, 그리고 압축기에 연결된 배관 출구 온도를 고려하지 않았기에 실외기에서 발생하는 에너지 사용량을 간과하였다. 또한 MPC가 가지고 있는 연산 문제는 제어 입력을 산출하는데, 많은 시간을 소요시킨다는 문제가 있다.

본 연구에서는 온도 부하 추정을 위해 풍량에 따라 정의되는 모델들에 대해서 Switching ESO-EMPC 제어를 제안한다. ESO는 모델 정확도에 크게 의존하지 않으며, 불확실한 외부 교란을 시스템의 확장된 상태 변수로 처리하여 실제와 관측된 상태 값의 차이를 통해 외란을 식별할 수 있는 능력을 갖춘다. ESO는 열펌프, 스마트 그리드, 건물 에너지 관리 전략을 포함한 다양한 HVAC 시스템에 적용되어 그 효과를 이미 입증하였다. 또한 Offline 상에서 제어 입력을 affine 함수 형태로 미리 연산하여 저장하고, 매 순간 최적성을 보장하는 제어 입력 값을 도출하는 EMPC를 사용하여 연산 문제를 해결한다. 추가로 풍량에 따라 시스템 행렬이 정의되는 시스템들의 안정성을 확인하기 위하여 본 연구에서는 PWQ (Piecewise quadratic Lyapunov function)을 이용하여 안정성을 확인한다.

제안하는 방법은 다음과 같다. 1) 시스템 에어컨 - 공간 내부 온도에 영향을 주는 동적 파라미터를 기반으로 구성된 선형 모델을 선정한다. 2) 선정된 모델의 온도 부하를 예측하기 위하여, 풍량에 따라 정의되는 시스템에 대한 ESO 그리고 온도 부하가 생겼을 때 이를 보상하는 EMPC 제어를 설계한다. 3) 설계한 제어기 성능 검증은 진행하기 위하여, 시뮬레이션 환경을 설정한 시나리오 환경에 맞게 제안하는 제어기를 이용하여 다양한 상황에 대해서도 온도 제어를 한다. 최종적으로 온도 추적제어를 달성함으로써 제어기의 성능을 검증한다.

## II. 본 론

본 장에서는 제안하는 열평형식 기반 실내온도 부하 모델에 대한 설명과 풍량에 따라 스위칭 되는 시스템 모델에 대하여 제안하는 Switching ESO 및 EMPC 설계 과정을 설명한다.

### 1. 열평형식 기반 실내온도 부하 모델

본 논문에서는 최근 연구를 통해 이미 검증된 실내 공간 모델을 토대로 파라미터를 선정하고 방 내부 온도 제어 시

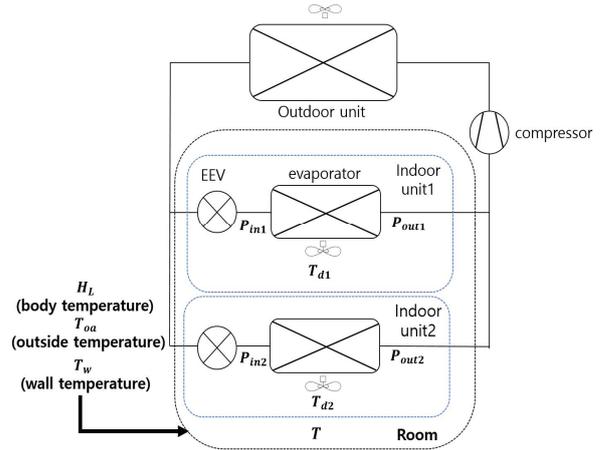


그림 1. 시스템 에어컨 - 공간 온도 모델  
Fig 1. VRF system with space temperature

표 1. 시스템 에어컨 - 공간 온도 모델 변수  
Table 1. The VRF system model variables

Parameters	Description	System variables
$T$	Space temperature	State
$P_{out,1}$	Pipe out temperature 1	State
$P_{out,2}$	Pipe out temperature 2	State
$P_{in,1}$	Pipe in temperature 1	Input
$P_{in,2}$	Pipe in temperature 2	Input
$T_{d1}$	Output temperature 1	Input
$T_{d2}$	Output temperature 2	Input
$T_w$	Wall temperature	Disturbance
$T_{oa}$	Outside temperature	Disturbance
$H_L$	body temperature	Disturbance
$Q_L$	Heat load	Disturbance

물레이션을 진행하도록 하였다. 모델의 전체 도식도는 그림 1과 같다. 각 도식도에서 지칭하는 파라미터에 대한 설명은 표 1. 시스템 에어컨 - 공간 온도 모델 변수에 표기하였다. 이를 토대로 다입력-다출력 (Multi-Input Multi-Output; MIMO) 시스템 모델 설계를 진행하였다.  $P_{out,i}$ 에 해당하는 상태방정식은 수식 (1)에 해당한다.

$$\frac{dP_{out,j}}{dt} = \frac{m_e C_p}{C_e} (P_{in,j} - P_{out,j}) + \frac{P_{in,j} - P_{out,j}}{C_e R_{pipe}}. \quad (1)$$

수식 (1)의  $C_e$ 는 파이프 내에 존재하는 열 질량을 의미한다.  $m_e$ 와  $C_p$ 는 파이프인 단에 나오는 냉매의 유속 및 공기의 비열을 내포하는 파라미터이다.  $m_e C_p (P_{in,j} - P_{out,j})$ 는 EEV에서 나오는 냉매의 파이프인 온도가 증발기를 지나가며, 파이프 아웃 온도 단까지 도달하기 위한 열 전달량을 의미한다.  $P_{in,j} - P_{out,j}$  식을 통하여 파이프인 온도가 증발기의 파이프 아웃 온도까지 도달한다. 이때 열 저항력에 해당하는  $C_e R_{pipe}$  파라미터를 토대로 냉매가 이동하면서 열 손

실이 발생한다. 증발기에 의해 제어되는 중간 배관 온도에 의하여 제어되는 공간 온도에 해당하는  $T$ 의 동특성 방정식은 수식 (2)에 해당한다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{m_i C_p}{C} (P_{out,j} - T) + \frac{m_d C_p}{C} T_{d,j} + \frac{23(\text{벽온도}) - (T)}{C(R)} + \frac{30(\text{외기온도}) - (T)}{C(R_{oa})} + H_L \quad (2)$$

수식 (2)의  $T_{d,j}$  은 증발기 내부에서 제어되는 파이프 아웃 단 온도를 기반으로 도출되어야 하는 취출 온도의 열 손실 온도를 의미한다.  $P_{out,j} + T_{d,j}$  온도를 통해 취출 온도가 결정되며, 풍량에 해당하는  $m_i$  파라미터를 통해 실질적으로 제어하고자 하는 공간 온도를 연산된 입력값을 통하여 제어한다.  $23(\text{벽온도}) - T + 30(\text{외기온도}) - T$ 은 공간 온도에 영향을 끼치는 벽에서 발생하는 복사열과 외기 열이 열 저항력에 해당하는  $CR$ 을 거쳐서 현재 방 온도에 끼치는 영향을 표현한 항이다.  $H_L$  은 사람에 의해 발생하는 온도 부하를 내포하는 함수를 추가적으로 외부 외란으로서 정의한다. 최종적으로  $23(\text{벽온도}) - T + 30(\text{외기온도}) - T + H_L$ 은 추정해야 하는 전체 온도 부하  $Q_L$ 로 정의하여 ESO를 통해 추정해야 하는 온도 부하로 정의한다. 이를 기반으로, 풍량  $m_i$ 을 고려한 스위칭 모델을 고려한다. 상태방정식 기반의 스위칭 모델의 상태로 정의되는 state는  $x_j(k) = [T P_{out,j}]^T$ 이며, EMPC 제어를 통해 산출되어 공간 온도 및 파이프 아웃 온도를 제어하는 입력은  $u_j(k) = [T_{d,j} P_{i n,j}]^T$ 로 정의한다. 앞서 정의한 상태 값과 제어 입력을 토대로 정의되는 행렬 형태의 상태방정식은 수식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} x_j(k+1) &= A_j(m_i)x_j(k) + B_j u_j(k) + Q_L(k), \\ y_j(k) &= Cx_j(k), \quad i \in [1, 2, 3], \quad j \in [1, 2], \end{aligned} \quad (3)$$

$$A_j(m_i) = \begin{pmatrix} \frac{-m_i C_p}{C} - \frac{1}{CR} - \frac{1}{CR_{oa}} & \frac{m_i C_p}{C} \\ 0 & \frac{-m_e C_p}{C_e} - \frac{1}{C_e R_{e,eva}} \end{pmatrix},$$

$$B_j = \begin{pmatrix} \frac{m_d C_p}{C} & 0 \\ 0 & \frac{m_e C_p}{C_e} + \frac{1}{C_e R_{e,eva}} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

풍량에 따라 정의되는 시스템 에어컨의 상태방정식에 대한 파라미터들의 값 또는 명칭은 표 2. 시스템 에어컨 - 공간 온도 모델 파라미터에 표기한다.

공간 내에 실내기 2대가 존재한다고 가정했을 때 풍량  $m_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ )에 따라 바뀌는 시스템 에어컨 - 공간 내 온도 상태방정식을 통해 표현된다. 본 시스템에서 고려하는 공간의 크기는  $162.52 \text{ m}^3$ 이며, 벽 내부 온도 및 외기 온도의 경우 변하지 않는다는 가정에서 시뮬레이션 검증 및 제어기 설계를 진행하였다.

표 2. 시스템 에어컨 - 공간 온도 모델 파라미터  
Table 2. Parameters of the VRF system

Parameters	Description	Value
$C_p$	Specific heat of air	14 kJ / G
$C$	Thermal mass of a space	1760.26 F
$C_e$	Thermal mass of $P_{out}$	1000F
$R_{pipe}$	Thermal resistance between $P_{in,j}$ and $P_{out,j}$	0.5 Ohm
$R$	Thermal resistance between $T_w$ and $T$	0.9756 Ohm
$R_{oa}$	Thermal resistance between $T_{oa}$ and $T$	3.4272 Ohm
$m_1$	Supply airflow (1)	47.62 $\text{m}^3/\text{min}$
$m_2$	Supply airflow (2)	52.62 $\text{m}^3/\text{min}$
$m_3$	Supply airflow (3)	57.62 $\text{m}^3/\text{min}$
$m_d$	Supply airflow from evaporator	57.62 $\text{m}^3/\text{min}$
$m_e$	Supply airflow from EEV	17 $\text{m}^3/\text{min}$

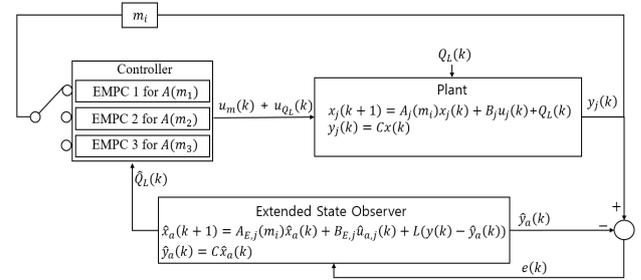


그림 2. 시스템 에어컨 ESO-EMPC 제어 블록선도  
Fig. 2. Block diagram of Switching ESO-EMPC based VRF system

## 2. 공간 내에 온도 부하 추정을 위한 ESO 설계

시스템 에어컨에서 측정하는 공간 온도에 온도 부하가 발생하였을 때, 이를 ESO를 통해 추정하고 이를 상쇄시키는 제어 입력을 연산하도록 제어기를 설계하였다. 이를 묘사하는 전체 블록선도는 그림 2. 시스템 에어컨 ESO-EMPC 제어 블록선도를 통해 표기한다.

수식 (1-3)의 상태방정식을 토대로, 추정하고자 하는 외란  $Q_L$ 을 상태 (State)로 편입시켜 상태 변수를 확장 시킨다. 본 연구에서 제안하는 이산 제어기인 EMPC 설계를 위해 ESO를 통해 새롭게 정의되는 시스템 모델은 수식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{a,j}(k+1) &= A_{j,E}(m_i)x_{a,j}(k) + B_{j,E}u_{a,j}(k), \\ y_a(k) &= C_E x_a(k), \\ \text{where } A_{j,E}(m_i) &= \begin{bmatrix} A_j(m_i) & 1 \\ 0 & \delta \end{bmatrix}, \\ B_{j,E} &= \begin{bmatrix} B_j u_{a,j}(k) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_E &= \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, Q_L = [0 \ 0 \ 1], x_a(k), \delta \approx 0. \end{aligned} \quad (4)$$

수식 (4)을 토대로 확장된 행렬을 기반으로 구성된 상태방정식을 토대로, 온도 부하에 해당하는  $Q_L$ 를 추정하기 위

한 확장 상태 관측기의 형태는 수식 (5)과 같다.

$$\begin{aligned}\hat{x}_{a,j}(k+1) &= A_{j,E}(m_i)\hat{x}_{a,j}(k) + B_{j,E}u_{a,j}(k) \\ &\quad + L(y_{a,j}(k) - \hat{y}_{a,j}(k)), \\ \hat{y}_{a,j}(k) &= C_E\hat{x}_{a,j}(k).\end{aligned}\quad (5)$$

수식 (5)의 추정된 Error에 해당하는  $(y_a(k) - \hat{y}_a(k))$ 을 0에 근사하게 수렴시키기 위하여 관측기 이득 값에 해당하는 gain  $L$ 을 구한다. 이를 위해서 ESO에 관한 Error dynamics를 수식 (6)으로 정의한다.

$$\begin{aligned}e_j(k+1) &= (A_{j,E}(m_i) - LC_E)e_j(k), \\ e_j(k) &= [x_a(k) - \hat{x}_a(k)].\end{aligned}\quad (6)$$

시스템 행렬  $A_{j,E}(m_i)$ 따른 error를 동시에 최소화하기 위한 gain  $L$ 을 구한다. 이를 위한 비용함수는 수식 (7)과 같이 정의한다.

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} e_j(k)^T Q e_j(k).\quad (7)$$

수식 (7)의 비용함수가 유한한 값을 기반으로 0으로 수렴하기 위하여 리아프노프 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}V(e_j(k)) &= e_j^T(k) P e_j^T(k), \\ \Delta V(e_j(k)) &= V(e_j(k+1)) - V(e_j(k)), \\ &= e_j^T(k) [A_{j,E}^T P A_{j,E} - P] e_j^T(k).\end{aligned}\quad (8)$$

리아프노프 함수를 기반으로  $P \geq 0$ 를 만족하는 Positive semidefinite matrix 구한다. 이에 대한 조건은 수식 (9)에 해당한다.

$$e_j(k)^T P e_j(k) - P < -Q.\quad (9)$$

### 3. 온도 제어를 위한 스위칭 EMPC 설계

안정성을 보장하는 Explicit MPC 제어기 설계를 위하여 우선 다음의 제어기를 고려한다.

$$u_i(k) = K_i x_{0,j}(k) + k_i.\quad (10)$$

수식 (10)의 풍량에 따라 정의되는 시스템들에 대하여 affine function 형태의 controller를 통하여 Piecewise affine 폐쇄 루프 다이내믹스를 수식 (11)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}x_{j,l+1} &= (A(m_i) + BK_i)x_{j,l} + k_i, \\ m_i &\in [m_1, m_2, m_3].\end{aligned}\quad (11)$$

해당 페루프 시스템을 통하여,  $K_i$ 와  $k_i$ 를 모두 내포하도록 아래와 같은 확장된 행렬의 상태와 시스템을 재정의한다.

$$\begin{aligned}\bar{x}_j &= \begin{bmatrix} x_j \\ 1 \end{bmatrix}, \\ \bar{A}_{j0}(m_i) &= \begin{bmatrix} (A(m_i) + BK_i) & k_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad l > 0, \\ \bar{A}_{j0}(m_i) &= \begin{bmatrix} (A(m_i) + BK_i) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad l = 0.\end{aligned}\quad (12)$$

풍량에 따라 바뀌는 시스템 행렬에 대한 Active Constraints 영역을 찾기 위하여 수식 (12)로 재정의된 시스템 행렬에 대한 PWQ (Piecewise Quadratic) 리아프노프 함수를 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}V_l(x_j) &= \bar{x}_j^T \bar{P}_l \bar{x}_j; \quad x_j \in X_l, \\ V_l(x_j) &> 0, \quad \forall x_j \in X_l, \\ V(x_l) &> V(x_{l+1}).\end{aligned}\quad (13)$$

수식 (13)를 만족하는 대칭 행렬  $\bar{P}_l$ 은 식별되는 모든 Critical Region (CR)내에서 이를 만족하는 값을 구한다.

$$\begin{aligned}\bar{P}_l &> 0; \quad \forall l, \\ \bar{A}_l^T(m_i) \bar{P}_{l+1} \bar{A}_l(m_i) - \bar{P}_l &> 0.\end{aligned}\quad (14)$$

수식 (14)를 통해 안정성을 보장하는 영역  $\bar{P}_l$ 을 정의한다. 풍량  $m_i$ 에 따른 정의된 시스템을 통하여 온도 부하를 추정하고 EMPC의 최적화 문제는 수식 (15)으로 정의된다.

$$\begin{aligned}\min_{u_{a,j}, \dots, u_{N_p-1}} &\sum_{k=0}^{N_p-1} x_j(k)^T Q x_j(k) + u_j(k)^T R u_j(k) + x_{N_p}^T \bar{P} x_{N_p}, \\ \text{s.t. } &x_j(k+1) = A_j(m_i)x_j(k) + B_j u_j(k), \\ &y_j(k) = C_E x_j(k), \\ &[u_{\min}] \leq u_j(k) \leq [u_{\max}], \\ &[x_{\min}] \leq x_j(k) \leq [x_{\max}], \\ &Q = \text{state weight}, \quad R = \text{Input weight}, \\ &\bar{P} = \text{terminal weight}, \quad N_p = \text{Horizon value}.\end{aligned}\quad (15)$$

EMPC가 예측한 Horizon까지의 예측된 행렬 형태의 입, 출력값들이 형성되었고, 이를 행렬  $F_j(m_i)$ 와  $\Phi_j(m_i)$  그리고  $U_j$ 가 정의되며, 출력 값은 수식 (16)과 같다.

$$Y_j = F_j(m_i)x_{0,j}(k) + \Phi_j(m_i)U_j.\quad (16)$$

$$\begin{aligned}F_j(m_i) &= \begin{bmatrix} CA_j(m_i) \\ CA_j(m_i)^2 \\ \vdots \\ CA_j(m_i)^{N_p} \end{bmatrix}, \quad U_j = \begin{bmatrix} u_{j,0} \\ u_{j,1} \\ \vdots \\ u_{j,N_p-1} \end{bmatrix}, \\ \Phi_j(m_i) &= \begin{bmatrix} CB_j & \dots & 0 \\ CA_j(m_i)B_j & \ddots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ CA_j(m_i)^{N_p-1}B_j & \dots & CA_j(m_i)^{N_p-N_\epsilon}B_j \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

수식 (16)을 기반으로 수식 (15)에서 정의한 제약 조건을 모두 내포하도록 수식 (17) 형태로 정의한다.

$$G(m_i)U \leq W + Tx_{0,j}(k).\quad (17)$$

수식 (15)의 최적화 문제는 수식 (17)의 제약 조건을 만족하는 해를 찾기 위하여, 수식 (18) 이차 함수 문제로 정의된다.

$$\begin{aligned} \min_U & \frac{1}{2} U_j^T H U_j + q^T U_j + c, \\ \text{s.t. } & G(m_i) U_j \leq W + T(m_i) x_{0,j}, \\ & H(m_i) = \Phi^T(m_i) \bar{Q} \Phi(m_i) + R, \\ & q = \Phi^T(m_i) \bar{Q} F(m_i) x_0(k), \\ & c = x_0(k)^T (Q + F^T(m_i) \bar{Q} F(m_i)) x_0(k). \end{aligned} \quad (18)$$

수식 (18)의 제약 조건을 만족하는  $K_i$  및  $k_i$  값을 Critical Region 수만큼 구하여 최종 제어 입력  $U^*$  는 수식 (19) 형태로 정의된다. 또한 온도 부하에 해당하는  $Q_L(k)$ 을 상쇄시키는 제어 입력  $u_{Q_L}(k)$ 은 수식 (20)으로 도출된다.

$$U_j^*(x_{0,j}(k)) = K_i x_{0,j}(k) + k_i, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} u_{m_i}(k) &= [I \ 0 \ \dots \ 0] U_j^*(x_{0,j}(k)), \\ u_{Q_L}(k) &= B^{-1}(-\hat{Q}_L(k)). \end{aligned} \quad (20)$$

상태방정식에 최종적으로 스위칭 되는 시스템의 제어 입력은 수식 (21)과 같다.

$$u_{empe}(k) = u_{m_i}(k) + u_{Q_L}(k). \quad (21)$$

### III. 시뮬레이션 결과

제안하는 제어기 성능 검증을 위해 시뮬레이션 환경은 SeDuMi, YALMIP 그리고 MPT3를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 파라미터 및 기준 온도는 표 3과 같다.

1. 시나리오 : 인원 수 및 설정 온도 변화에 따른 온도 부하 추정 기반 제어

시나리오는 풍량  $m_1 = 47.56$ ,  $m_2 = 52.56$  그리고  $m_3 = 57.56$  로 스위칭 되는 시스템 모델로 정의한다. 초기 온도  $x_0 = [23, 15]^T$  에서 기준 온도  $x_r = [21, 14]^T$ ,  $x_r = [22.5, 13.5]^T$ ,  $x_r = [21.5, 14]^T$ 로 온도 추적 제어하는 것을 목표로 한다. 이때 기준 온도가 바뀔때 따라 풍량 또한 바뀐다 가정한다.

표 3. 시나리오의 기준 온도, 풍량 및 온도 부하  
Table 3. Reference temperatures, air flow volume, and heat load of Scenario

	Reference temperature	Airflow	Heat load
Scenario	$x_r = [21, 14]^T$ , $x_r = [22.5, 13.5]^T$ , $x_r = [21.5, 14]^T$	47.62, 52.62, 57.62	Changes in the number of people in a space

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(m_i)x(k) + B(u_m(k) + u_{Q_L}(k)) + Q_L(k), \\ A(m_1) &= \begin{bmatrix} 0.9621 & 0.0379 \\ 0 & 0.9760 \end{bmatrix}, A(m_2) = \begin{bmatrix} 0.9581 & 0.0419 \\ 0 & 0.9760 \end{bmatrix}, \\ A(m_3) &= \begin{bmatrix} 0.9541 & 0.0458 \\ 0 & 0.9760 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.0458 & 0 \\ 0 & 0.0240 \end{bmatrix}, \\ Q_L(k) &= 0 \text{ for } 0 \leq k < 50, 2 \text{ for } 50 \leq k < 150, \\ & 1 \text{ for } 150 \leq k < 250, 0 \text{ for } 250 \leq k < 300, \\ & 1 \text{ for } 300 \leq k < 400, 0 \text{ for } 400 \leq k < 500. \end{aligned} \quad (22)$$

수식 (22)을 통하여  $A(m_i)$ 에 대한 ESO는 아래와 같이 수식 (23)로 표현되며, 초기값은  $\hat{x}_{a,0} = [23, 15, 0]^T$ 로 정의한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_a(k+1) &= A_E(m_i)\hat{x}_a(k) + B_E u_a(k) + L(y_a(k) - \hat{y}_a(k)), \\ e_j(k+1) &= (A_{j,E}(m_i) - L C_E) e_j(k). \end{aligned} \quad (23)$$

수식 (23)를 기반으로 풍량에 따라 정의된 ESO에 대해서 수식 (4-9)을 만족하는  $L$ 은 다음과 같다.

$$L = \begin{bmatrix} 0.9668 & 0.0002 & 0.8748 \\ 0.0436 & 0.8831 & -0.0033 \end{bmatrix}.$$

시스템 행렬  $A(m_i)$ 의 Piecewise Affine 페루프 다이내믹스 및 PWQ 리아프노프 함수는 수식 (24)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{l+1} &= (A(m_i) + BK)x_l + k_l, \\ m_i, i &\in [1, 2, 3], \\ V_l(x) &= x^T \bar{P}_l x; x \in X_l. \end{aligned} \quad (24)$$

리아프노프 함수가 수식 (14)의 조건을 만족할 때, Critical Region 내에서 정의되는  $\bar{P}_l$ 의 파라미터는 다음 조건을 만족하는 값으로 귀결된다.

$$\bar{P}_l = [ V_l(x) = x^T \bar{P}_l x \text{ if } \bar{x} \in CR_l ]. \quad (25)$$

$\bar{P}_l$ 의 각 파라미터들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_1 &= \begin{bmatrix} 14.0776 & -1.4268 \\ -1.4268 & 15.7831 \end{bmatrix}, \bar{P}_2 = \begin{bmatrix} 10.2343 & -0.5498 \\ -0.5498 & 10.9205 \end{bmatrix}, \\ \bar{P}_3 &= \begin{bmatrix} 16.8908 & 8.5458 \\ 8.5458 & 19.5210 \end{bmatrix}, \bar{P}_4 = \begin{bmatrix} 18.4891 & 5.4408 \\ 5.4408 & 8.8418 \end{bmatrix}, \\ \bar{P}_5 &= \begin{bmatrix} 18.7111 & -1.2325 \\ -1.2325 & 9.2425 \end{bmatrix}, \bar{P}_6 = \begin{bmatrix} 19.5713 & -5.8720 \\ -5.8720 & 13.1222 \end{bmatrix}, \\ \bar{P}_7 &= \begin{bmatrix} 20.7292 & -10.4452 \\ -10.4452 & 31.1724 \end{bmatrix}, \bar{P}_8 = \begin{bmatrix} 23.2673 & -15.9364 \\ -15.9364 & 20.2306 \end{bmatrix}, \\ \bar{P}_9 &= \begin{bmatrix} 34.5274 & 5.4273 \\ 5.4273 & 27.8254 \end{bmatrix}, \bar{P}_{10} = \begin{bmatrix} 47.5205 & 11.1051 \\ 11.1051 & 32.5439 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

수식 (15)의 최적화 문제에서 중간 비용은  $\bar{P}_l$ 로 정의되며, 리아프노프 함수  $V_l(x)$ 는 그림 3과 같다. 최적화 문제를 통해 산출된 제어 입력 테이블은 그림 4의 형태로 도출된다. 본 연구에서 풍량에 따라 스위칭 되는 시스템  $A(m_i)$ 에 대해 ESO(Extended State Observer)를 사용하여 온도 부하를 추정된 결과는 그림 5와 같다.

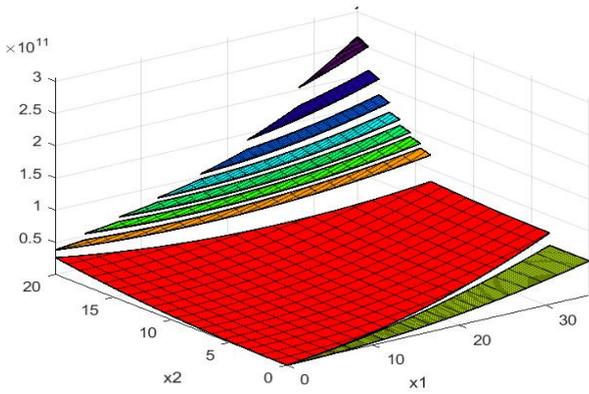


그림 3.  $A(m_i)$  시스템에 대한 리아프노프 함수  $V(x)$ .  
Fig. 3. Lyapunov function for the system  $A(m_i)$

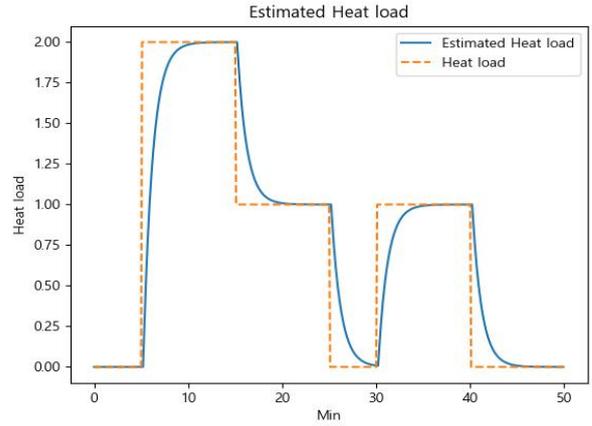


그림 5. 온도 부하 추정 결과  
Fig 5. Heat Load Estimation Results

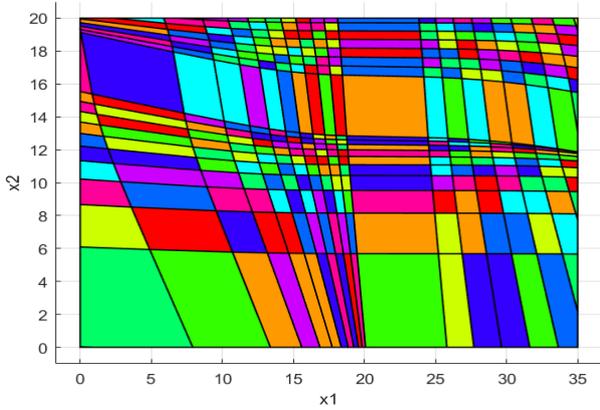


그림 4.  $A(m_i)$  시스템 제어 입력 테이블.  
Fig. 4. Control Input table for  $A(m_i)$

수식 (22)의 MAE (Mean Absolute Error)를 통해 추정된 온도 부하의 정확도 87%이다. 이를 토대로 온도 부하를 보상하는  $u_{Q_L}(k)$ 은 수식 (23)과 같다.

$$MAE = \frac{\sum_{k=0.1}^n |Q_L(k) - \hat{Q}_L(k)|}{n}, \quad (22)$$

$$u_{Q_L}(k) = B^{-1}(-\hat{Q}_L(k)). \quad (23)$$

$u_{Q_L}(k)$  과 제어 입력 테이블을 통해 산출된  $u_{m_i}(k)$ ,  $i \in [1,2,3]$ 을 통해 최종 제어 입력은 수식 (24)와 같다.

$$u_{empc}(k) = u_{m_i}(k) + u_{Q_L}(k), \quad (24)$$

$$m_i, i \in [1, 2, 3].$$

시뮬레이션 시간을 50 그리고 샘플링 타임은 0.1로 설정하여 Python 환경에서 제안하는 제어기와 MPC 제어기에 대해서 시뮬레이션을 진행한 결과는 그림 6과 같다. 제안하는 ESO-EMPC를 이용한 설정 온도와 현재 온도 사이의 시스템 에러 응답 그래프는 그림 7과 같이 0으로 수렴한다.

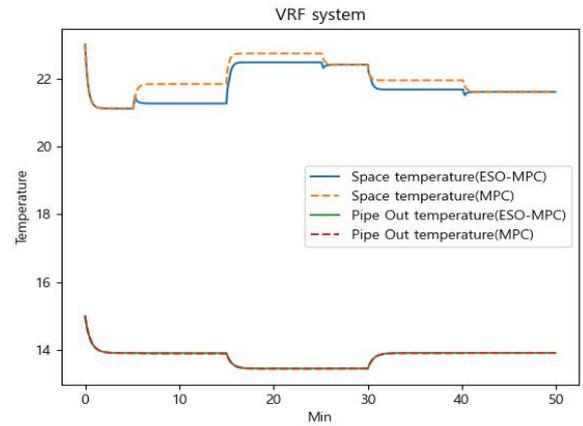


그림 6. 시뮬레이션 결과  
Fig 6. Simulation results

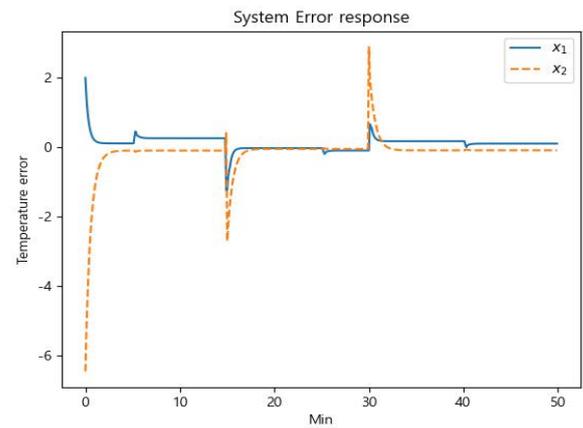


그림 7. 시스템 에러 응답 그래프  
Fig 7. System error response

#### IV. 결론

본 연구를 통해 다양한 열 역학 - 동역학 장치를 포함하면서 다중 실내기를 갖는 시스템 에어컨 - 공간 온도 모델

을 EMPC 제어기를 이용하여 온도 Tracking 문제를 수행하였다. 본 모델의 경우 방 내부 온도에 직접적인 영향을 미치는 외벽 온도, 외기 온도 및 인간의 체열과 같은 주요 인자를 고려하여 최소한의 파라미터를 통한 열평형 선형 모델을 고려하였다. 외부 외란에 해당하는 열의 경우에는 ESO를 이용하여 추정하여 이를 기반으로 최적화 문제를 정의하고 Explicit MPC를 사용하여 공간 온도 및 압축기 입력단에 해당하는 파이프 아웃 온도를 제어한다. 제안하는 제어기 성능을 MPC 제어기와의 비교를 통해 최종적으로 온도 부하 및 연산 시간 문제에 대해서 기존 MPC 제어기 대비 더 나은 성능을 보여주었다.

## References

- [1] Afify, Ramez. "Designing VRF System,," ASHRAE Journal, Vol. 50, No. 6, pp. 52-55, 2008.
- [2] G. S. Okochi, Y. Yao, "A Review of Recent Developments and Technological Advancements of Variable-air-volume (VAV) Air-conditioning Systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 59, pp. 784-817, 2016.
- [3] J. Zhang, X. Li, T. Zhao, H. Yu, T. Chen, C. Liu, X. Yang, "A Review of Static Pressure Reset Control in Variable Air Volume Air Condition System," Procedia Engineering, Vol. 121, pp. 1844-1850, 2015.
- [4] A. Afram, F. Janabi-Sharifi, A. S. Fung, K. Raahemifar, "Artificial Neural Network (ANN) Based Model Predictive Control (MPC) and Optimization of HVAC Systems: A State of the Art Review and Case Study of a Residential HVAC System," Energy and Buildings, Vol. 141, pp. 96-113, 2017.
- [5] Y. I. Alamin, J. D. Álvarez, M. del Mar Castilla, A. Ruano, "An Artificial Neural Network (ANN) Model to Predict the Electric Load Profile for an HVAC System," IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, No. 10, pp. 26-31, 2018.
- [6] B. Tashtoush, M. Molhim, M. Al-Rousan, "Dynamic Model of an HVAC System for Control Analysis," Energy, Vol. 30, No. 10, pp. 1729-1745, 2005.
- [7] J. Teeter, M. Y. Chow, "Application of Functional Link Neural Network to HVAC Thermal Dynamic System Identification," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 1, pp. 170-176, 1998.
- [8] A. Afram, F. Janabi-Sharifi, "Theory and Applications of HVAC Control Systems - A Review of Model Predictive Control (MPC)," Building and Environment, Vol. 72, pp. 343-355, 2014.
- [9] H. Shi, J. Liu, Q. Chen, "HVAC Precooling Optimization for Green Buildings: An RC-network Approach," Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems, pp. 249-260, 2018.
- [10] O. T. Oguniola, L. Song, "Review and Evaluation of Using RC Thermal Modeling of Cooling Load Prediction for HVAC System Control Purpose," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 45233. American Society of Mechanical Engineers, pp. 735-743, 2012.
- [11] E. Biyik, A. Kahraman, "A Predictive Control Strategy for Optimal Management of Peak Load, Thermal Comfort, Energy Storage and Renewables in Multi-zone Buildings," Journal of Building Engineering, Vol. 25, pp. 100826, 2019.
- [12] M. Gholamzadehmir, C. Del Pero, S. Buffa, R. Fedrizzi, "Adaptive-predictive Control Strategy for HVAC Systems in Smart Buildings - A Review," Sustainable Cities and Society, Vol. 63, pp. 102480, 2020.
- [13] K. Zhang, A. Prakash, L. Paul, D. Blum, P. Alstone, J. Zoellick, R. Brown, M. Pritoni, "Model Predictive Control for Demand Flexibility: Real-world Operation of a Commercial Building with Photovoltaic and Battery Systems," Advances in Applied Energy, Vol. 7, pp. 100099, 2022.
- [14] R. Kwadzogah, M. Zhou, S. Li, "Model Predictive Control for HVAC Systems - A Review," 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, pp. 442-447, 2013.
- [15] Y. Yao, D. K. Shekhar, "State of the Art Review on Model Predictive Control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) Field," Building and Environment, Vol. 200, pp. 107952, 2021.
- [16] J. Theunissen, "Explicit Model Predictive Control for Active Suspension Systems with Preview," Diss. University of Surrey, 2020.
- [17] S. Song, J. Wang, "Incremental Model Predictive Control of Active Suspensions with Estimated Road Preview Information from a Lead Vehicle," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 142, No. 12, pp. 121004, 2020.
- [18] S. Rastegarpour, L. Ferrarini, "Hierarchical Nonlinear MPC for Large Buildings HVAC Optimization," 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE, pp. 2175-2180, 2021.
- [19] S. Yang, M. P. Wan, W. Chen, B. F. Ng, S. Dubey, "Experiment Study of Machine-learning-based Approximate Model Predictive Control for Energy-efficient Building Control," Applied Energy, Vol. 288, pp. 116648, 2021.
- [20] E. Semsar-Kazerooni, M. J. Yazdanpanah, C. Lucas, "Nonlinear Control and Disturbance Decoupling of HVAC Systems Using Feedback Linearization and Backstepping with Load Estimation," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 918-929, 2008.
- [21] Z. Afroz, G. M. Shafiullah, T. Urmee, G. Higgins, "Modeling Techniques Used in Building HVAC Control Systems: A Review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 83, pp. 64-84, 2018.

**Junyeong Kim (김 준 영)**

2022 School of Electronic and Communication Engineering from Kumoh National University (B.S.)

2022~School of Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (M.S.)

Field of Interests: Optimal Control, HVAC system, Model Predictive Control

Email: cpsc.junyeong@gmail.com

**Sangmoon Lee (이 상 문)**

1999 Electronics Engineering from Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea (B.S.)

2001 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (M.S.)

2006 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (Ph.D.)

2016~Electronics Engineering, in Kyungpook National University (Prof.)

Career:

2016, 2018~2020: Highly Cited Researcher (Clarivate Analytics)

2019~Int. J. Systems Science, Int. J. Control, Autom. & System, Associate Editor

Field of Interests: Cyber-Physical Systems Control, Networked Control Systems, Nonlinear Systems, Fuzzy Systems, Robust Control, Model Predictive Control, and Reinforcement Learning

Email: moony@knu.ac.kr