

에너지효율을 고려한 모델예측제어에 기초한 열펌프의 실내온도 제어

조 항 철, 변 경 석, 송 재 복*, 장 효 환*, 최 영 돈*
고려대학교 대학원, *고려대학교 기계공학과

Indoor Temperature Control of a Heat Pump Based on Model Predictive Control Considering Energy Efficiency

Hang-Cheol Cho, Kyung-Seok Byun, Jae-Bok Song*, Hyo-Whan Chang*, Young-Don Choi*

Graduate School, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received October 27, 2000; revision received December 6, 2000)

ABSTRACT: In indoor temperature control of a heat pump, a reduction in energy consumption is very important. However, most control schemes for heat pumps have focused only on control performance such as settling time and steady-state error. In this paper, the model predictive control (MPC) which includes the energy-related variable in its cost function is proposed. By computing the control signal minimizing this cost function, the trade-off between energy reduction and temperature control performance can be obtained. Since the MPC requires the process model, the dynamic model of a heat pump is also obtained by the system identification technique. Performance of the proposed MPC considering energy efficiency is compared with the two other control schemes. It is shown that the proposed scheme can consume less energy than the others in achieving similar control performance.

Key words: Heat pump(열펌프), Model predictive control(모델예측제어), Cost function(비용함수), System identification(시스템구명)

기 호 설 명

A, B, C : 시스템 다항식

y : 출력

u : 입력

e : 오차

J : 비용함수

N_1 : 출력 예측범위의 하한

N_2 : 출력 예측범위의 상한

N_3 : 제어입력의 예측범위

ρ : 제어입력에 대한 가중치

1. 서 론

생활수준의 향상으로 쾌적한 생활을 추구하려는 욕구가 증가함에 따라 냉난방기기의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 특히 하절기 냉방수요의 증가에 따른 전력수급의 불균형 문제가 대두되면서 에너지 절약에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존의 냉동공조 시스템에서 사용한 압축기

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3363

E-mail address: jbsong@korea.ac.kr

는 제한된 운전영역에서 온/오프 제어만으로 작동되므로, 연속적으로 변하는 냉난방 부하에 적절히 대응하지 못하고, 반복적인 시동/정지의 운전 형태로 인하여 에너지 소비의 증가와 기기 수명의 단축을 유발하였다. 그러나 인버터의 도입으로 압축기를 넓은 영역에서 가변속 운전함으로써, 변화하는 냉난방 부하에의 적절한 대응을 통한 제어 성능의 향상과 에너지 소비의 감소를 도모할 수 있게 되었다. 이러한 장점에 의해서 냉동공조 시스템에 사용하는 압축기의 구동에 인버터를 적용한 제품이 선진국을 중심으로 널리 사용되고 있는 추세지만, 국내에서는 아직 일부 제품만이 인버터 압축기를 장착하고 있을 뿐이다.

온/오프 제어만으로 작동되던 기존의 압축기를 적용한 경우에 제어로직은 다양한 튜닝을 통하여 비교적 쉽게 결정할 수 있다. 그러나 인버터형 압축기를 갖는 열펌프에서는 가변요소가 많아지고, 이들 사이에 강력한 결합성(coupling)이 존재하므로, 주어진 사양을 만족시키는 제어로직의 결정이 쉽지 않게 된다. 최근에 이러한 냉동공조 시스템의 제어를 위해서 비선형제어,⁽¹⁾ 퍼지적용제어,⁽²⁾ 직부하제어⁽³⁾ 등의 고급제어 기법을 적용하기 위한 연구가 일부 진행되었지만, 아직은 연구 수준에 머물러 있으며, 제품에까지 반영되지는 못하고 있다.

본 논문에서는 인버터형 압축기를 갖는 열펌프를 대상으로 하여, 에너지와 관련된 비용함수에 기초한 모델예측제어(model predictive control, MPC) 기법⁽⁴⁾을 적용하여 실내온도의 제어를 수행하고자 한다. MPC는 과거의 입력과 출력, 비용함수, 그리고 플랜트의 모델에 기초하여 미래의 플랜트 출력을 예측하고, 최적화된 미래의 제어입력을 계산하는 기법이다. 대부분의 MPC에 사용되는 비용함수는 추종오차와 제어입력의 변화량으로 구성되어 있다. 열펌프에서 소비하는 에너지는 제어입력(즉, 압축기속도)의 변화량이 아닌 제어입력 자체에 비례하므로, 기존의 일반적인 비용함수로는 에너지를 적절히 고려할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 에너지 효율을 고려할 수 있도록 새로운 비용함수를 선정하고, 이에 기초하여 열펌프의 실내온도 제어를 수행하고자 한다. 또한, PID 제어 결과와 MPC 중에서 가장 널리 사용되는 GPC(Generalized Predictive Control)에 기초한 제어실험 결과를 비교

하여 이 방식의 장단점에 대하여 살펴보고자 한다.

한편, MPC는 기본적으로 플랜트의 모델을 이용하여 미래 제어입력을 구하므로, 플랜트의 모델이 필요하게 된다. 본 연구에서 사용하는 인버터형 열펌프나 에어컨의 모델링에 대해서는 많은 연구가 수행되고 된 바 있지만,⁽⁵⁾ 이러한 모델은 시스템의 각 요소에 여러 물리법칙을 적용한 복잡한 수학적 모델로 성능 시뮬레이션에는 적합하지만, 제어기의 설계에 직접 적용하기는 어렵다. 제어기의 설계를 위한 플랜트의 모델은, 구현을 위해서 단순하면서도, 플랜트의 동적 거동을 잘 표현하여야 한다. 본 연구에서는, 압축기 속도를 입력, 실내온도를 출력으로 하는 single-input single-output(SISO) 시스템을 고려하여, 시스템 규명(system identification) 기법을 이용하여 모델링을 수행하였다.

2. 열펌프 시스템 및 실험장치

본 연구에 사용한 열펌프는 열교환기로서 응축기와 증발기 역할을 하는 실내기와 실외기, 팽창장치인 모세관, 액체상태의 냉매가 압축기로 유입되는 것을 방지하는 축압기 및 로터리식 압축기 등의 요소로 구성된, 인버터형 냉난방 겸용의 열펌프이다. R-22 냉매를 작동유체로 사용하며, 본 연구에서는 열펌프 기능 중에서 냉방모드를 대상으로 연구를 수행하였다. Fig. 1은 열펌프 시

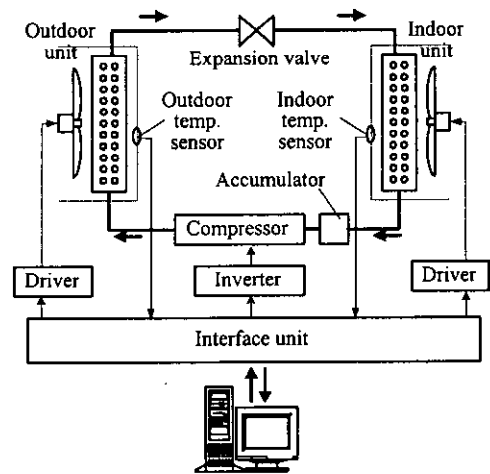


Fig. 1 Schematic of the heat pump system used in the experiment.

Table 1 Specifications of the heat pump system used in the experiment

Rated cooling Capacity	3550 kcal/h
Rate voltage	220 V
Rated cooling power	1247 w
Refrigerant	R22, 1 kg

시스템에 대한 개략도이며, Table 1은 사양을 나타낸다.

압축기는 3상 인버터를 사용하여 30~72 Hz 사이에서 구동하였다. 30 Hz 이하 또는 72 Hz 이상의 속도에서의 구동은 압축기의 손상을 방지하기 위하여 피하는 것이 바람직하므로, 이러한 영역은 제어기에서 제어입력의 제약조건으로 처리하였다. 실외기팬용 모터의 속도는 릴레이를 사용하여 강, 중, 약의 3단으로 조절이 가능하고, 실내기팬용 모터는 solid state relay로 위상을 제어하여 1,500 rpm까지 원하는 속도로 조절이 가능하다. 실내온도는 실제 제품에서와 동일하게 실내기 입구에 설치된 서미스터를 사용하였으며, 실외온도는 실외기 입구에 서미스터를 설치하여 측정하였다. 열펌프에서 소비하는 전력은 압축기, 실내기팬, 실외기팬에 인가되는 전압과 전류를 측정하여 계산하였다. 이러한 각 제어요소와 센서는 인터페이스 장치를 통해서 PC와 연결되고, PC에서는 Labview에서 작성한 프로그램을 사용하여 측정, 제어, 저장 등을 수행하였다.

열펌프의 제어성능을 시험하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 제작하였다. 실내공간은 약 3평으로 실외공간 내에 설치하였으며, 실외공간은 히터와 팬으로 구성된 2개의 온풍기를 온/오프

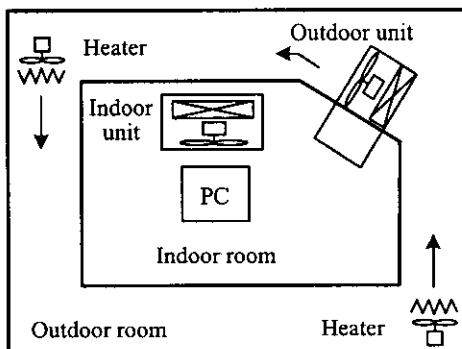


Fig. 2 Configuration of experiment setup.

프 제어하여 일정한 실외온도가 유지되도록 하였다. 이러한 실험장치는 정밀한 성능시험에는 적합하지 않지만, 제어성능 실험을 위한 반복성은 별다른 문제가 없다.

3. 시스템 모델링

열펌프의 제어를 위해서는 시스템의 동적 모델링이 필요하다. 그러나, 열펌프의 동적 모델링은 여러 요소들의 연속적인 상호작용과 온도와 압력의 빠른 변화 및 열교환기의 열용량의 영향 등에 의해 매우 복잡하다.

본 연구에서는 시스템규명 기법을 이용하여 단순한 열펌프 시스템의 모델식을 구하였다. 시스템규명이란, 먼저 적절한 시스템의 모델을 선정하고, 모델의 파라미터는 실험으로 얻은 시스템의 입출력 정보를 이용하여 구하는 방식이다.

열펌프 시스템을 입력은 압축기속도, 출력은 실내온도로 하는 ARMAX(auto-regressive moving-average process with external input) 모델로 가정하여 동적 모델식을 구하였다. 모델의 계수는 prediction error algorithm⁽⁶⁾을 사용하여 구하였으며, 유일한 모델의 계수를 구하기 위해 넓은 범위의 주파수 성분을 포함하는 PRBS(pseudo random binary sequence) 신호를 입력으로 사용하였다.

Fig. 3은 실내기팬 속도는 1,400 rpm, 실외온도는 35°C로 유지한 채, 30과 72 Hz의 압축기속도의 PRBS 입력에 대한 실내온도의 변화를 나타내는 그림이다. 이때, 샘플링시간은 10 sec로 선정하였다. 그림에서 실선은 측정치, 점선은 이 측정치에 기초한 시스템규명의 결과를 나타낸다.

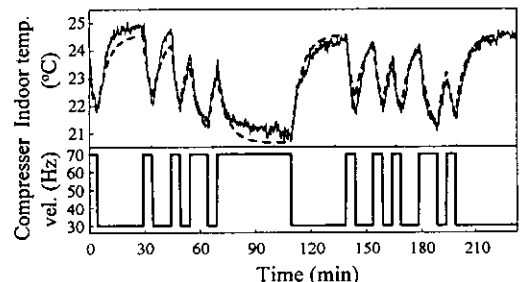


Fig. 3 PRBS test for system identification (solid; measurement, dashed; system identification).

이 그림으로부터 실외온도가 일정할 때 열펌프 시스템은 시간지연이 없는 1차 시스템을 알 수 있다. 본 연구에 사용한 SISO 구조의 열펌프 시스템의 동적 모델은 다음과 같다.

$$(1 - 0.9709q^{-1})y(t) = -0.0027q^{-1}u(t) + (1 - 0.2078q^{-1})e(t) \quad (1)$$

여기서, $u(t)$, $y(t)$, $e(t)$ 는 각각 압축기속도, 실내온도 및 잡음을 각각 나타낸다.

4. 모델예측제어(MPC)

모델예측제어(model predictive control, MPC)는 플랜트 모델과 플랜트의 과거의 입력력 정보를 이용하여 미래 제어입력에 대한 플랜트의 출력을 예측하며, 비용함수를 최소화하는 미래 제어입력을 계산하는 방식의 제어기법이다. 여기서는 MPC에 대한 자세한 설명이나 유도는 생략하고, 실내온도 제어에 필요한 최소한의 결과식 위주로 MPC를 소개하기로 한다. MPC는 Fig. 4에서와 같이 플랜트의 모델, 예측방정식, 기지의 기준입력, 그리고 비용함수로 구성된다. 이러한 MPC는 시스템의 모델과 비용함수에 따라 여러 방식으로 분류할 수 있다.⁽⁴⁾

4.1 비용함수

본 연구에서는 열펌프를 압축기속도를 입력으로, 실내온도를 출력으로 하는 SISO 구조의 시스템으로 단순화하였다. 이 시스템에서 소비하는 에너지는 압축기속도인 제어입력에 대체로 비례

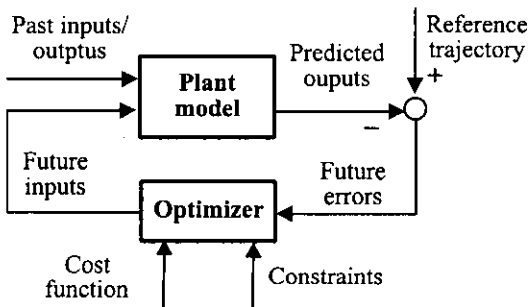


Fig. 4 Basic structure of MPC.

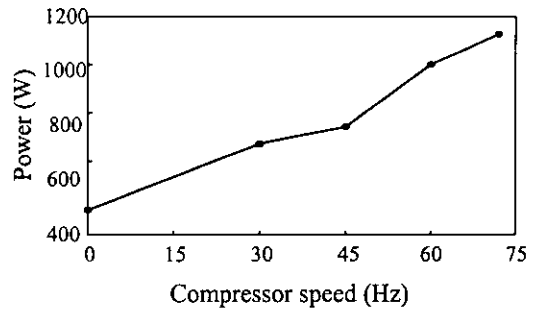


Fig. 5 Energy consumption as a function of compressor speed.

하게 된다. Fig. 5는 실내기팬 속도를 1,400 rpm, 실외기팬 속도를 강으로 설정하였을 때, 압축기속도와 시스템에서 소비하는 에너지와의 관계를 나타내는 그림이다. 압축기의 속도가 커질수록 에너지소비가 거의 비례적으로 증가한다는 사실을 알 수 있다. 또한, 압축기속도가 0인 경우에, 실내기팬과 실외기팬 등 다른 부분에서 소비하는 에너지가 약 400 W 정도임을 알 수 있다.

MPC에 사용하는 대부분의 비용함수는 다음과 같이 구성되어 있다.⁽⁷⁾

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [y(t+k) - w(t+k)]^2 + \lambda \sum_{k=1}^{N_3} [\Delta u(t+k-1)]^2 \quad (2)$$

여기서, $y(t+k)$ 는 미래 예측출력, $w(t+k)$ 는 기준레적, $u(t+k-1)$ 는 미래 예측입력을 각각 나타낸다. N_1 과 N_2 는 출력 예측범위의 하한과 상한을, N_3 는 제어입력 예측범위를, λ 는 가중치를 각각 나타낸다. 식(2)의 비용함수에서 첫째 항은 추종오차를 나타내며, 둘째 항은 제어입력의 변화량을 나타낸다. 만약, 둘째 항이 제어입력의 변화량 대신에 제어입력 자체를 포함한다면, 이러한 비용함수로부터 구한 제어입력은 시스템의 출력에 정상상태 오차를 유발하게 된다.

한편, 식(2)에서 제어입력의 변화량을 포함한 비용함수의 최소화는 제어입력 자체, 즉 에너지 소비의 최소화가 아니라는 점에 주목하여야 한다. 이러한 문제를 개선하기 위하여, 본 연구에서는 다음과 같이 제어입력 자체가 포함된 변형된

비용함수를 제안하고자 한다.

$$y = Gu + f \tag{7}$$

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [y(t+k) - w(t+k)]^2 + \rho \sum_{k=1}^{N_3} [u(t+k-1) - u_{ss}]^2 \tag{3}$$

여기서, u_{ss} 는 정상상태 제어입력을 나타내는 항으로, 이는 정상상태 오차가 발생하는 것을 방지하기 위하여 첨가된 항이며, ρ 는 제어입력에 대한 가중치를 나타낸다.

4.2 제어법칙^(4,7)

다음과 같이 표현되는 SISO 이산시간 시스템을 고려하여 보자.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})e(t) \tag{4}$$

여기서, $u(t)$, $y(t)$, $e(t)$ 는 플랜트의 입력, 출력 및 백색잡음(white noise)을 각각 나타내고, d 는 시스템의 시간지연을 나타낸다. 또한, A , B , C 는 q^{-1} 의 다항식으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \\ B(q^{-1}) &= 1 + b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \end{aligned} \tag{5}$$

계산의 단순화를 위하여, 일반성을 잃지 않으면서 $C(q^{-1})$ 를 1로 가정할 수 있다. 다음과 같은 디오판틴(diophantine) 방정식을 고려하여 보자.

$$\frac{1}{A(q^{-1})} = E_k(q^{-1}) + q^{-k} \frac{F_k(q^{-1})}{A(q^{-1})} \tag{6}$$

여기서, E_k 와 F_k 는 q^{-1} 의 다항식으로, $1/A$ 를 k 보다 지수가 큰 항인 E_k 와 나머지를 F_k 로 나타낸 것이다. 식(6)을 사용하여, $d+1$ 에서 $d+N$ 스텝까지 미래 출력의 최적 예측값은 다음과 같은 행렬과 벡터로 나타낼 수 있다.

여기서, y , u , G 및 f 는 다음을 의미한다.

$$\begin{aligned} y &= [y(t+d+1) \dots y(t+d+N)]^T \\ u &= [u(t) \dots u(t+N-1)]^T \\ G &= \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_N & g_{N-1} & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} f &= [E_{d+1}\{(q^{-1})B(q^{-1}) - g_0\} \dots \\ &\quad \{E_{d+N}(q^{-1})B(q^{-1}) - g_0 - g_1q \dots \\ &\quad - g_{N-1}q^{-(N-1)}\}q^N]^T u(t-1) \\ &\quad + [F_{d+1}(q^{-1}) \dots F_{d+N}(q^{-1})]^T y(t) \end{aligned}$$

제약조건이 없는 경우에는, 식(3)과 (7)로부터 $d+1$ 에서 $d+N$ 스텝까지 비용함수를 최소화시키는 최적의 미래 제어입력 u^* 는 비용함수 J 의 u 에 대한 도함수로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u^* = -(G^T G + \rho I)[(f-w)^T G - \rho u_{ss}^T]^T \tag{9}$$

제약조건이 있는 경우에 비용함수를 최소화하는 문제는 quadratic programming 문제로 생각할 수 있으며, Lemke's complementary pivoting 알고리즘을 이용하여 최적해를 구할 수 있지만, 자세한 설명은 여기서 생략하기로 한다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 비용함수의 종류에 따라서 두 가지 방식의 MPC 기법을 고려하기로 한다. 하나는 식(2)의 일반적인 비용함수를 채택한 MPC 기법으로, 이는 MPC 중에서 가장 널리 사용되는 GPC(generalized predictive control) 기법에 해당한다. 또 하나는 본 연구에서 제안한 비용함수(3)을 채택한 MPC 기법으로, 본 연구에서는 이 방식을 에너지효율을 고려한 MPC 기법이라 부르기로 한다.

두 제어 기법은 다음과 같은 방식으로 적용된다. 우선 열펌프의 입력인 압축기속도는 30~72 Hz로 제한되므로, 이를 제한범위로 설정하였다. 식(9)의 정상상태 제어입력 u_{ss} 은 시스템구형 기법을 이용하여 구한 모델식(1)에 근거하여 계산

하였다. 비용함수를 최소화하는 최적의 미래 제어입력은 식(9)를 이용하여 계산하였는데, 만약 이렇게 산출된 제어입력이 제한범위를 벗어나는 경우에는 다음과 같이 조치하였다. 에너지효율을 고려한 MPC 방식에서는 제한범위를 벗어난 미래 입력 대신에 단순히 적절한 제한값(즉, 30 Hz 또는 72 Hz)을 취하는 방식을 사용하였으며, GPC 방식에서는 Lemke's complementary pivoting algorithm을 이용하여 최적의 미래 제어입력을 구하였다.

이렇게 현재시간 t 에서 계산된 미래 제어입력 $u(t), u(t+1), \dots$ 중에서 첫번째 입력인 $u(t)$ 만을 실제 제어입력으로 사용하게 된다. 매 샘플링 시간마다 이러한 최적화 과정을 수행하여 제어입력을 구한 다음, 이를 시스템의 입력으로 사용하여 제어를 수행하였다.

5. 실험결과 및 고찰

시스템규명 기법으로 구한 모델에 기초하여 에너지효율을 고려한 MPC를 사용하여 실내온도를 제어하는 다양한 실험을 수행하였다. SISO 시스템에 대한 모델링에서 뚜렷한 시간지연이 나타나지 않았기 때문에, 출력 예측범위의 하한(N_1)은 0으로 설정하였고, 출력 예측범위의 상한(N_2)과 미래 제어입력의 예측범위(N_3)를 동일하게 설정하였다.

에너지효율을 고려한 MPC에서는 제어입력의 예측범위(N_3)와 제어입력의 가중치(ρ)를, GPC에서는 제어입력의 예측범위(N_3)와 제어입력의 변화량에 대한 가중치(λ)를 설계변수로 하여 제어를 설계하였다. 또한, 에너지효율을 고려한 MPC의 제어성능을 확인하기 위해서, 모든 실험에서는 초기온도를 30°C, 목표 실내온도를 22°C로 선정하였으며, 샘플링 시간은 10 sec, 실외기팬 속도는 강, 실외온도와 실내기팬 속도는 각각 35°C와 약 1,400 rpm으로 일정하게 유지하면서 제어를 수행하였다.

5.1 에너지효율을 고려한 MPC의 성능

Fig. 6은 에너지효율을 고려한 MPC를 적용한

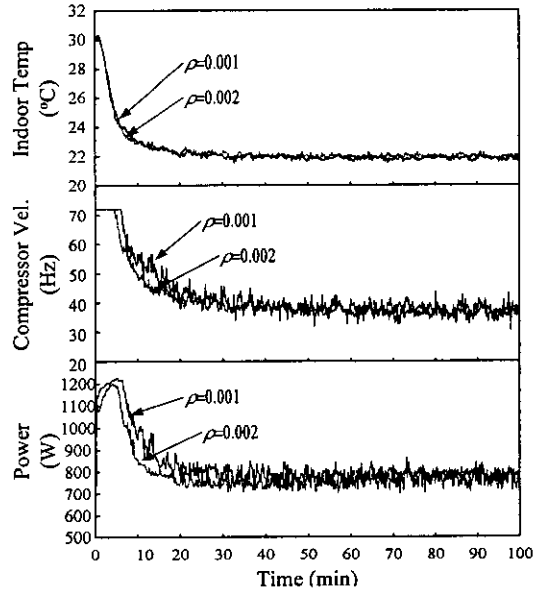


Fig. 6 Experimental results using MPC considering energy efficiency with $\rho=0.001, 0.002$ and $N_3=12$.

실험결과로서, 제어입력 가중치 ρ 의 변화에 따른 제어성능을 보여준다. 이때, 미래 제어입력의 예측범위는 12로 선정하였다.

제어입력 가중치가 0.002인 경우가 0.001인 경우보다 제어입력이 정상상태로 더 신속하게 접근하는 것을 볼 수 있는데, 이는 제어입력 가중치가 클수록 제어입력, 즉 압축기속도를 최소화하려는 경향이 커지기 때문이다. 약 30분까지 압축기에서 소비한 에너지를 비교하여 보면, 제어입력 가중치가 0.001인 경우에 1940 kWh, 0.002인 경우에 1696 kWh이었다. 즉, 제어입력 가중치가 클수록 제어입력이 더욱 신속히 최소화되므로, 압축기에서 소비하는 에너지는 작아진다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 실험에서는 압축기에서의 에너지소비량이 약 10% 정도의 차이를 보이지만, 실내온도는 변화형태는 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 그러나 일반적으로는 소비되는 에너지가 작아질수록 목표 실내온도에 도달하는 시간이 길어지게 된다. 따라서 가중치라는 파라미터의 조정을 통해서 에너지소비의 감소 및 목표 실내온도 추종이라는 제어성능 간의 적절한 절충점을 찾을 수 있다.

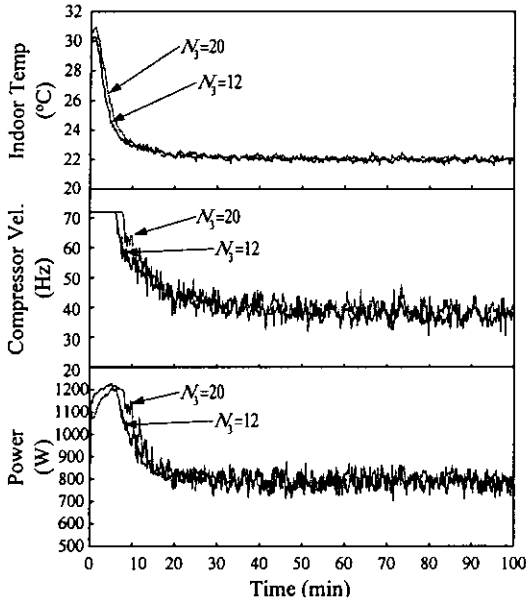


Fig. 7 Experimental results using MPC considering energy efficiency with $\rho=0.001$ and $N_3=12, 20$.

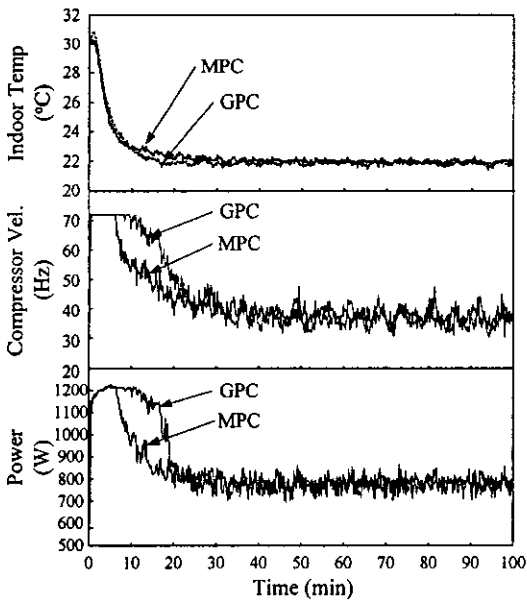


Fig. 8 Experimental results using MPC considering energy efficiency and GPC.

Fig. 7은 미래 제어입력의 예측범위에 따른, 에너지효율을 고려한 모델예측제어를 적용한 실내

온도제어의 실험결과를 나타내는 그림이다. 이때, 제어입력에 대한 가중치는 0.001로 선정하였다. 예측범위가 클수록 더 많은 미래의 출력과 입력을 예상하기 때문에, 비용함수를 최소화하는 미래 제어입력은 신뢰성이 더 높아지는 장점이 있으나, 계산시간이 더 많이 소요된다는 단점이 있다. 본 실험에서는 예측범위가 12와 20일 때 실험을 수행하였다. 실험결과를 검토하면, 예측범위가 12인 경우에 압축기속도는 예측범위가 20인 경우보다 다소 먼저 정상상태 제어입력에 도달하지만, 실내외 습도 등의 주위 환경의 영향을 고려한다면 거의 차이는 없다고 할 수 있다. 30분까지 예측범위가 12 및 20인 경우에 소비한 에너지가 1940.5 kWh 및 1957.2 kWh로 거의 차이가 없는 점도 이를 뒷받침한다. 또한, 실내온도도 예측범위에 상관없이 별 차이를 보이지 않고, 비슷한 결과를 나타내고 있다. 따라서 예측범위는 제어성능이나 에너지소비에 별다른 영향을 주지 않는다는 점을 알 수 있다.

5.2 PI 제어 및 GPC 제어와의 비교

본 연구에서 제안한 에너지효율을 고려한 MPC의 제어성능과 비교하기 위하여, 앞서 설명한 GPC 제어기와 엔티와인드업(anti-windup)을 갖는 PI 제어를 사용하여 동일한 실험을 수행하였다. 목표온도와 실내온도와 차이가 감소하더라도 오차는 계속 증가하기 때문에, 적분제어 신호는 제어입력인, 압축기속도를 포화시킬 수 있다. 이러한 것을 해결하기 위해 엔티와인드업을 갖는 PI 제어를 사용하였다. 실험조건은 앞의 실험과 동일하게 설정하였다.

Fig. 8은 미래 제어입력의 예측범위가 12인 경우에, 에너지효율을 고려한 MPC와 GPC의 실내 온도제어 실험결과를 나타내는 그림이다. 시스템의 출력인 실내온도를 살펴보면, 약 7분까지는 비슷한 결과를 보여주지만, 7분 이후에는 에너지효율을 고려한 MPC에서 압축기속도가 감소하기 시작하여 에너지소비가 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. 물론 이로 인하여 목표 실내온도에 도달하는 시간은 GPC에 비하여 다소 더 소요되지만, 온도차이는 약 1°C 미만이므로 이는 쾌적성에 별 영향을 미치지 않는다. 제어입력이 정상상태에 도달하는 약 40분까지 압축기에서 소비한

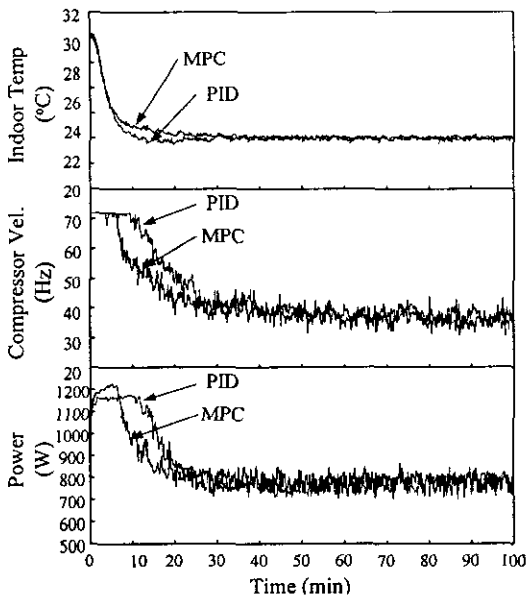


Fig. 9 Experimental results using MPC considering energy efficiency and PID.

에너지를 검토하면, 에너지효율을 고려한 MPC에서는 1807 kWh, GPC에서는 2021 kWh를 소비하여, 에너지효율을 고려한 MPC에서 약 10%의 에너지가 절약되었다.

Fig. 9는 에너지효율을 고려한 MPC와 PI 제어기의 성능을 비교한 실험결과이다. 에너지효율을 고려한 MPC에서 예측범위는 12, 제어입력에 대한 가중치는 0.001로 선정하였으며, PI 제어에서는 여러 번의 튜닝을 거쳐서 비례이득은 15, 적분시간은 300으로 선정하였다. 앞서와 마찬가지로, 에너지효율을 고려한 MPC는 PI 제어기와 비교하여 7분 이후에 약 1°C 이하의 온도차이를 보이지만, 이것은 쾌적성에 영향을 미칠 수 있는 정도는 아니며, 약 12% 정도의 에너지소비를 감소시킬 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 열펌프 시스템에 대한 모델링에 기초하여, 에너지효율을 고려한 모델예측제어(MPC)를 적용하여 실내온도 제어를 수행하였다. 이러한 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) MPC의 설계변수인 제어입력 가중치의 변화는 압축기에서의 에너지소비에 영향을 미치게

된다. 가중치를 증가시키면 에너지소비는 감소하지만, 목표 실내온도에 도달하는 시간이 다소 증가하게 된다. 따라서 이 가중치의 조절을 통하여 에너지소비와 제어성능 간의 절충점을 찾을 수 있게 된다.

(2) MPC의 또 다른 설계변수인 제어입력의 예측범위는 제어성능이나 에너지소비에 별 영향을 주지 않았다.

(3) 에너지효율을 고려한 MPC를 적용한 경우는 PI 제어와 GPC를 적용한 경우보다 압축기에서의 에너지소비를 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다.

이상의 연구로부터 에너지효율을 고려한 MPC를 적용한 열펌프의 실내온도 제어기법은, 에너지효율 향상을 위한 인버터형 열펌프의 제어로직 개발에 있어서 기초자료로 사용될 수 있을 것이다. 향후, 이 연구를 기반으로 다변수 입출력 시스템에 대한 제어 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 지원사업 “멀티형압축식 열펌프시스템 성능시뮬레이션 및 제어기술개발에 관한 연구”의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Betzaida, A. and Miguel, V., 1999, Nonlinear Control of a Heating, Ventilating, and Air Conditioning System with Thermal Load Estimation, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 56-63.
2. Piao, Y., Zhang, H. and Zeungnam, B., 1998, A Simple Fuzzy Adaptive Control Method and Application in HVAC, *Proc. of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 528-532.
3. Wei, D. and Chen, N., 1995, Air Conditioner Direct Load Control by Multi-pass Dynamic Programming, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 307-313.
4. Camacho, E. and Bordons, C., 1994, *Model Predictive Control in Process Industry*,

- Springer, pp. 22-26.
5. Kim, Y. S., Kim, Y. C., 1997, Performance Simulation of an Inverter Heat Pump Using R-22 and R-290, Proceeding of the SAREK '97 Winter Annual Conference, pp. 358-366.
 6. Landau, I., 1990, System Identification and Control Design, Prentice Hall, pp. 156-167.
 7. Ronald, S., 1992, Predictive Control, Prentice Hall, pp. 45-48.