

가변속냉동시스템의 효율적인 과열도제어를 위한 예측제어기 설계

최 정 필, Li Hua, 정 석 권[†]

부경대학교 대학원 냉동공조공학과, 부경대학교 기계공학부[†]

Design of Predictive Controller for Effective Superheat Control of Variable Speed Refrigeration System

Jeong-Pil Choi, Li Hua, Seok-Kwon Jeong[†]

ABSTRACT: In this paper, we suggest PI control with a predictive controller to progress both energy saving and coefficient of performance(COP) in a variable speed refrigeration system. The capacity and superheat are controlled simultaneously and independently by an inverter and an electronic expansion valve respectively for saving energy and improving COP in the system. The refrigeration system has long dead time in superheat inherently. The dead time makes the system difficult to achieve the satisfactory quick control response, especially superheat control response. In order to solve this problem, we designed a predictive controller based on PI control to progress superheat control performance. The control performance was investigated through some experiments to verify the effectiveness of the predictive controller.

Key words: Variable speed refrigeration system(가변속 냉동시스템;VSRS), Superheat control (과열도제어), PI control law(PI 제어칙), Smith predictive controller(스미스예측제어기), Decoupling model(비간섭 모델), Dead time(부동시간), COP(성적계수)

1. 서 론

최근 에너지의 효율적 이용을 위해 인버터 냉동·공조시스템의 보급이 보편화 되고 있다. 따라서 이들 시스템에 대한 고성능, 고정도의 제어가 필수적으로 요구되고 있다. 고성능, 고정도 제어기 설계를 위해서는 먼저 시스템의 정확한 동특성 모델링이 선행되어야 한다. 냉동·공조시스템의 주된 제어량인 챔버 온도와 과열도는 상호 간섭계를 이루고 있을 뿐만 아니라 시스템이 갖는 비선형성으로 인해 명확한 동특성 파악이 매우

어렵다.⁽¹⁻⁷⁾

Li 등은 이러한 점에 주목하여 두 제어량을 동시·독립적으로 제어가능한 비간섭 모델을 제안하고 PI제어기를 설계하여 모델의 효용성을 확인한 바 있다.⁽⁴⁻⁵⁾ 또한, 시스템의 모델링이 어려운 경우를 고려하여 AI 수법을 이용한 퍼지제어법을 제안하였다.⁽⁶⁻⁷⁾

제안된 제어법에 의해 챔버 온도는 비교적 양호한 제어성능을 보인 반면 과열도는 챔버 내 부하가 급격하게 변함에 따라 급격히 상승하는 등 다소 불안한 거동을 보였으며, 이는 최대 COP 유지에 부정적 요소로 작용한다. 이처럼 과열도의 과도응답 제어가 어려운 이유는 과열도의 부동시간(dead time)으로 인해 속응성 개선이 어렵고, 제어기 게인에 따라 불안정 진동이 나타나기

[†] Corresponding author
Tel.: +82-51-629-6181
E-mail : skjeong@pknu.ac.kr

때문이다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

따라서 본 논문에서는 냉동시스템의 용량과 과열도의 동시·독립적인 제어가 가능한 비간섭(decoupling) 모델을 바탕으로 부동시간이 존재하는 과열도를 효과적으로 제어할 수 있는 스미스 예측제어기를 설계하였다. 기존 밝혀진 전달함수를 이용하여 부하 변동시의 과열도 응답에 대한 시뮬레이션을 하였으며, 이를 바탕으로 실험을 통해 예측제어기의 효용성을 검토하였다.

2. 비간섭 모델

Fig. 1은 제어하고자 하는 대상 실(chamber)의 온도 T_a ($^{\circ}\text{C}$)와 과열도(SH ; superheat)($^{\circ}\text{C}$)를 동시에 제어하기 위한 블록선도이다. T_a 를 제어하기 위한 조작량인 Δf 가 SH 에 영향을 미치고 있으며, SH 를 제어하기 위한 조작량 ΔVO 또한 T_a 에 간섭을 일으키고 있음을 알 수 있다. 여기서 $f[\text{Hz}]$ 는 압축기 구동 모터의 회전수를 제어하기 위한 인버터 지령 주파수, $VO(\%)$ 는 전자팽창밸브의 개도를 나타내며, $C_i(i=1, 2)$ 는 제어기, $G_i(i=1\sim4)$ 는 플랜트의 전달함수를 각각 나타낸다.

Fig. 2는 이러한 간섭문제를 해결하기 위한 비간섭 모델을 나타낸다.⁽⁴⁻⁷⁾ 이 모델에서는 Fig. 1의 점선 부분 속에 나타난 간섭항들이 제거되도록 조작량들의 변동으로 인한 간섭 영향을 사전에 연산하여 피드포워드적으로 각 지령값에 반영하고 있는 것이 주된 특징이다.

Fig. 2에서 G_i 는 시간지연을 갖는 1차지연 시스템으로 가정하여 실험적으로 구하였으며, 각 전달함수는 식 (1)~(4)와 같다.⁽⁴⁻⁵⁾

$$G_{1_T_a} = \frac{\Delta T_a}{\Delta f} = \frac{-0.42}{680s+1} \quad (1)$$

$$G_{1_SH} = \frac{\Delta SH}{\Delta f} = \frac{-0.47}{780s+1} - \frac{-0.15}{30s+1} e^{-25s} \quad (2)$$

$$G_{2_SH} = \frac{\Delta SH}{\Delta VO} = \frac{-0.38}{1+57s} e^{-16s} \quad (3)$$

$$G_{2_T_a} = \frac{\Delta T_a}{\Delta VO} \quad (4)$$

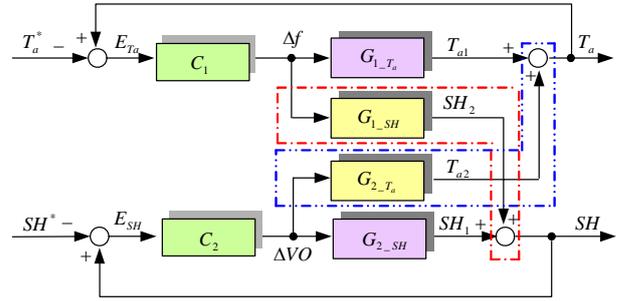


Fig. 1 Block diagram of variable speed refrigeration control system

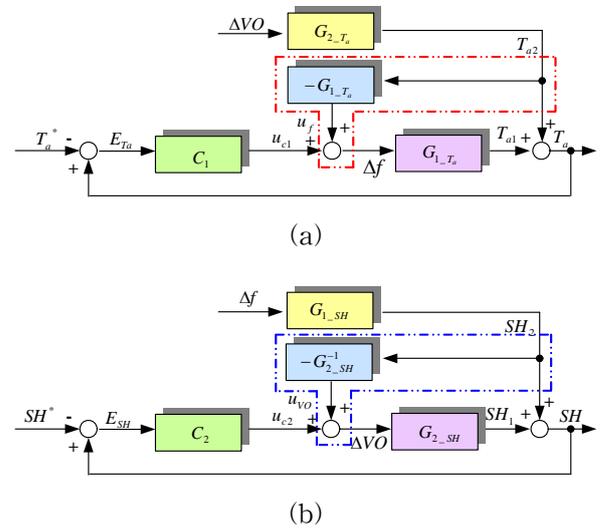


Fig. 2 Block diagram of decoupling control of VSRS

식 (2)와 (3)의 G_{1_SH} 와 G_{2_SH} 는 부동시간을 갖고 있다. 이 가운데 G_{1_SH} 는 간섭영향을 나타내지만, G_{2_SH} 는 실제 SH 를 제어하기 위한 조작량 ΔVO 와의 전달함수이므로 식 (3)의 부동시간의 영향 감소를 통한 과열도제어 성능 개선에만 주목하기로 한다.

3. 스미스예측기를 이용한 과열도제어

스미스 예측제어기는 부동시간이 존재하는 시스템의 제어에 적합한 방법으로서 모델링 기법을 사용하여 부동시간의 응답을 보완하는 방법이다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Fig. 3은 부동시간을 갖는 폐루프 시스템의 기본 블록선도이다. Fig. 4에서처럼 부동시간을 분리할 수 있다면 $b(s)$ 신호를 피드백시켜 그 영향

을 줄일 수 있다. 그러나 실제 플랜트에서는 두 부분의 분리가 불가능하므로 $b(s)$ 신호는 측정이 불가능하다.

따라서 Fig. 5와 같이 플랜트를 시간지연요소와 부동시간요소로 모델링 하여 신호 $b(s)$ 에 상응하는 $b_m(s)$ 를 추정할 수 있다. 또한, 모델의 파라미터 오차가 없다면 $y_m(s)$ 는 $y(s)$ 와 같게 되므로 $e_m(s) = 0$ 가 되어 $b_m(s)$ 를 피드백 신호로 사용할 수 있다. 만약, 오차가 발생하면, $y(s) - y_m(s)$ 만큼의 오차가 발생하지만 피드백루프를 통해 오차값 $e(s)$ 에 반영되어 컨트롤러에 입력되므로 오차를 보상할 수 있다. 그러나 오차의 범위가 크면 불안정한 응답이 발생하기 때문에 플랜트를 정확히 모델링을 하여 오차를 줄이는 것이 예측제어기 설계에 있어 가장 중요한 요소이다.

Fig. 4에서 $r(s)$ 로부터 $y(s)$ 까지의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)\tilde{G}_p(s)}{1 + G_c(s)\tilde{G}_p(s)}e^{-Ls} \quad (5)$$

또한 Fig. 5에서 $r(s)$ 로부터 $y(s)$ 까지의 전달함수를 구하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{G_c(s)\tilde{G}_p(s)e^{-Ls}}{1 + G_c(s)[\tilde{G}_m(s) + \tilde{G}_p(s)e^{-Ls} - \tilde{G}_m(s)e^{-L_m s}]} \quad (6)$$

만약, 모델이 플랜트와 일치하게 되면, $\tilde{G}_p(s) = \tilde{G}_m(s)$, $L = L_m$ 이 되므로 식 (7)과 같이 정리된다.

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)\tilde{G}_p(s)}{1 + G_c(s)\tilde{G}_p(s)}e^{-Ls} \quad (7)$$

식 (7)의 전달함수는 Fig. 4의 이상적인 시스템의 전달함수인 식 (5)와 같으며, Fig. 5를 이용하면 부동시간을 배제한 이상적인 제어기 구성이 가능하게 된다. 또한, Fig. 5에 블록선도를 간단한 형태로 등가변환하면 Fig. 6과 같이 된다.

본 논문에서는 Fig. 6의 스미스예측제어기를

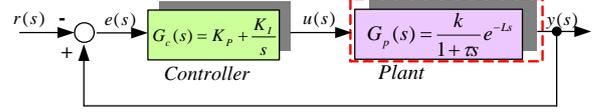


Fig. 3 Basic closed-loop control system with dead time

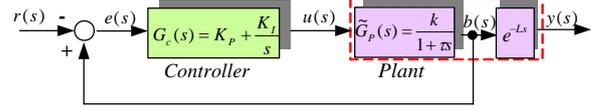


Fig. 4 Desired closed-loop control system to reduce the influence of dead time

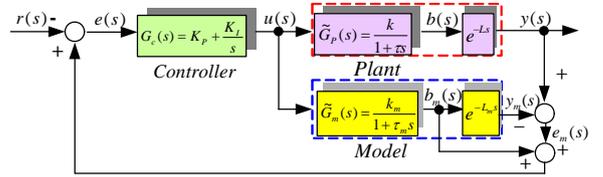


Fig. 5 Smith predictive controller design for reducing the influence of dead time

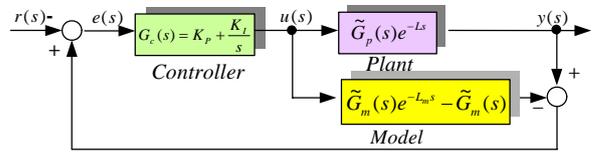


Fig. 6 Modified Smith predictive controller

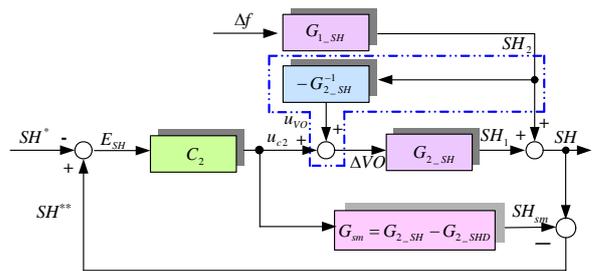


Fig. 7 Block diagram of superheat control with the smith predictive controller

비간섭 모델의 전달함수 G_{2_SH} 에 적용하여 밸브 개도 변화에 따른 과열도 응답의 개선효과를 시뮬레이션 및 실험으로 검증하고자 한다.

Fig. 7은 스미스예측기(G_{sm})를 갖는 과열도 제어 알고리즘의 블록선도이다. 여기서 G_{2_SHD} 는 무응답시간 e^{-Ls} 를 제외한 전달함수이다. PI제어

기 C_2 의 출력값인 밸브 개도를 모델링으로 구해진 스미스예측제어기의 값(G_{sm})과의 연산을 통해 과열도(SH_{sm})를 구한다. 그리고 시스템의 출력인 SH 으로부터 구해진 과열도 값과의 차(\overline{SH})를 피드백시켜서 과열도 설정값(SH^*)과의 차(E_{SH})를 PI제어기의 입력으로 하여 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다.

4. 실험장치

Fig. 8은 실험장치의 구성도를 나타내고, Table 1은 실험에 사용된 각 장치의 구체적인 사양을 나타낸다. 실험장치는 기본 냉동사이클, 제어장치와 데이터 수집 장치로 구성되었다. 제어장치는 인버터, 스텝밸브 제어 인터페이스와 PLC로 구성되었다.

압축기는 범용 $V/f=constant$ 타입의 인버터로 구동되며, 전자팽창밸브의 스텝모터는 스텝밸브 제어 인터페이스로 구동된다. 인버터와 스텝밸브 인터페이스의 제어 입력 신호는 PLC의 D/A 유닛으로부터 얻는다. PI제어 로직은 PLC의 PID 유닛에서 연산되며, 온도는 열전대(T-type)로 측정하였고 측정된 온도 신호는 PLC의 TC(ThermoCouple) 유닛에 실시간으로 보내진다.

5. 시뮬레이션 및 실험결과

Fig. 9는 모델링과정에서 오차가 존재할 경우 발생하는 현상을 예측하기 위하여, 식 (3)의 각

Table 1 Specification of a test unit

Compressor	Type	Vertical, Reciprocating
	Power	220[V], 60[Hz], 1.5[kW]
Condenser	Type	Fan fin type
	Condensing capacity	3450[kcal/h]
Evaporator	Type	Fin-tube type
	Cooling capacity	680[kcal/h]
Expansion Valve Device	Type	EEV
	Model	JHEV 14A
	Port size	Φ14
	Operating pulse range	0~506[pulse]
	Rated voltage	DC 12[V]
Refrigerant	Type	R22
Inverter	Type	PWM
	HP	2
Step valve control interface	Input voltage	DC 12[V]
	Input control signal	DC 1~5[V] or 4~20[mA]
	Output	0~400[step]
Chamber	Size	1200×700×1650[mm]

파라미터에 대한 감도분석 결과를 보여준다. 식 (3)의 모델에는 DC게인, 시정수, 부동시간의 세 종류의 파라미터가 존재한다. 우선 모델링된 전달함수로 인디셜응답을 구하였으며, 각각의 파라미터에 $\pm 30\%$ 오차를 주어 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과로부터 각 파라미터 $\pm 30\%$ 오차 내에서는 예측제어기 적용이 가능함을 알 수 있다. 왜냐하면 $\pm 30\%$ 파라미터 오차범위 내에서도 인디셜응답의 최대 오차값이 실제응답에 $\pm 10\%$ 내에 존재하기 때문이다. 또한 부동시간

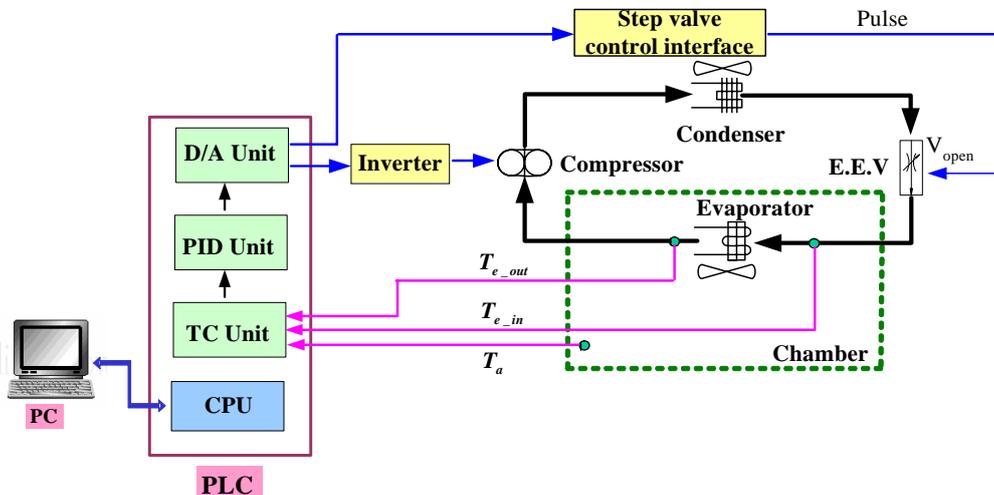
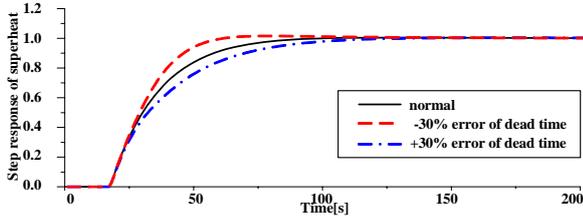
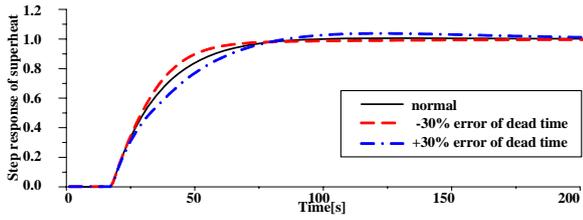


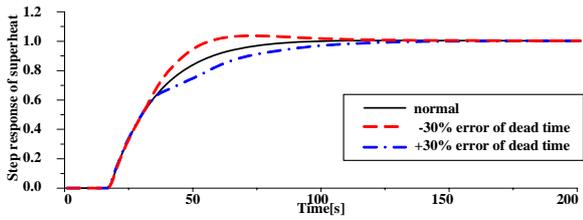
Fig. 8 Schematic diagram of the experimental system



(a) sensitivity with regard to DC gain

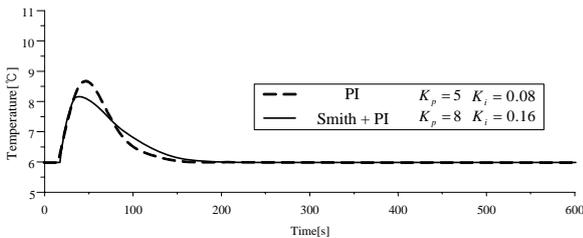


(b) sensitivity with regard to time constant

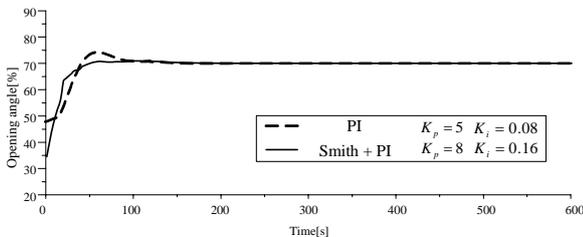


(c) sensitivity with regard to dead time

Fig. 9 Parameter sensitivity analysis



(a) superheat response



(b) EEV opening angle

Fig. 10 The simulation result under the change of thermal load based on PI with and without the smith predictive controller

오차에 감도가 가장 민감함을 알 수 있다.

Fig. 10은 스미스예측제어기를 사용하였을 때와 일반 PI제어기만 사용하였을 때의 챔버 내의 부하변동에 따른 과열도 응답의 비교 시뮬레이션이다. 부하변동 시 5(°C)의 과열도 변화를 모사한 것으로써, 결과는 예측제어기를 사용하였을 경우 COP를 최대로 유지할 수 있는 온도범위 내에 과열도 값이 유지되었으나 일반 PI제어기는 그 온도범위를 초과하는 영역이 존재하였다. 또한 예측제어기 사용 시 비례 및 미분계인은 일반 PI제어기의 값과 다르게 재설정해야함을 알 수 있다.

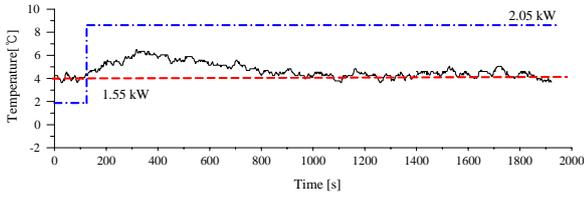
Fig. 11과 Fig. 12는 예측제어기의 성능 개선 효과를 검증하기 위한 실험 결과를 보여준다.

Fig. 11은 일반 PI제어기만 사용하였을 때 챔버내 부하변동에 따른 챔버 내의 온도 및 과열도 응답을 보여준다. 이때 C_1 의 비례계인(K_P)은 38이고, 적분계인(K_I)은 0.21로 각각 설정하였으며 C_2 의 비례계인(K_P)은 4이고, 적분계인(K_I)은 0.05로 각각 설정하였다.

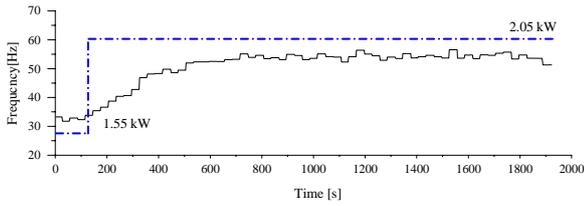
부하는 120[sec] 시점에서 2점쇄선으로 표시된 1.57kW에서 2.05kW로 스텝상의 변화를 주었다. 이때 챔버 내의 온도는 400[sec]시점까지 6(°C)로 상승 후 지령치인 4(°C)로 수렴하였다. 그때 조작량인 압축기 회전수는 Fig. 11(b)에 보여준다. 이때 과열도는 일정 시간 상승 후, 최대 온도값을 유지하다가 950[sec]에서 설정값인 6(°C)로 수렴함을 보였다. 이 실험으로부터 COP를 최대로 유지할 수 있는 온도범위인 8(°C)를 초과하는 영역이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 11(d)는 챔버 내의 부하 변동에 따른 밸브 개도의 변화량을 보여준다. 부하 변동 이후 밸브 개도는 과열도가 증가함에 따라 일정 시간 상승하다가 과열도가 6(°C)로 수렴하기 직전에 일정 개도로 수렴함을 보였다.

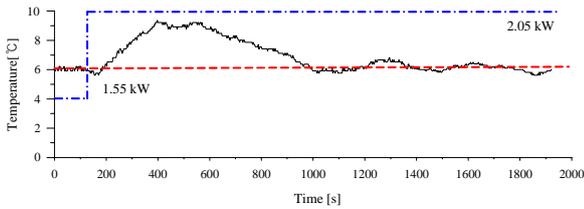
Fig. 12는 스미스예측제어기를 사용하였을 때 챔버 내의 부하 변동에 따른 챔버 내의 온도 및 과열도의 응답을 보여준다. 부하 변동 시점 및 C_1 의 계인은 일반 PI제어기 실험과 동일하며, C_2 의 비례계인(K_P)은 8이고, 적분계인(K_I)은 0.1로 각각 설정하였다. 부하 변동 후 챔버 내의 온도와 압축기 회전수는 일반 PI제어기만 사용하였을 경우와 유사하였으며, 과열도는 일정 시간 상승 후 500[sec] 근방에서 하강하면서 800[sec]에서 설정값인 6(°C)에 수렴함을 보였다. 이 결과를



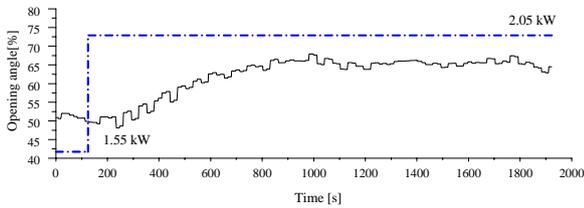
(a) response of chamber temperature



(b) compressor frequency ($K_P=38, K_I=0.21$)



(c) superheat response

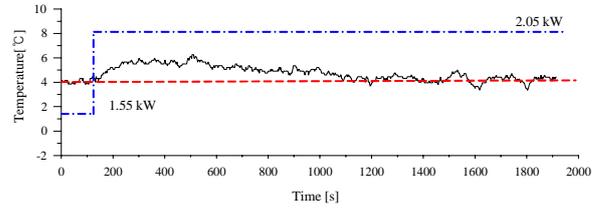


(d) opening angle of EEV ($K_P=4, K_I=0.05$)

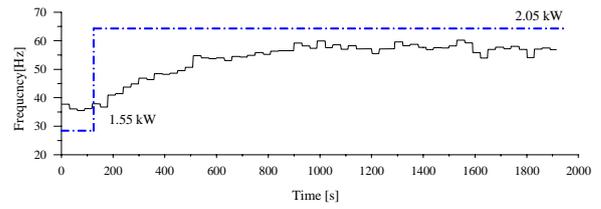
Fig. 11 The response under the change of thermal load based on PI without the smith predictive controller

Fig. 11(b)와 비교하면 과열도 상승폭이 부하 변동의 전 영역에 걸쳐 작게 나타나며, 설정값에 더 빨리 수렴하는 특성을 보임을 알 수 있다. 또한 COP를 최대유지할 수 있는 온도범위 8 (°C)를 초과하는 영역이 존재하지 않았다.

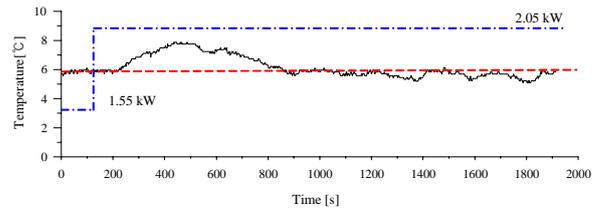
Fig. 12(d)는 스미스예측제어기를 사용하였을 때 챔버 내의 부하 변동에 따른 밸브 개도의 변화를 나타낸다. Fig. 11(d)와 유사하게 일정 시간 상승 후 과열도가 수렴하기 전에 일정 개도를 유지함을 알 수 있다. 그러나 예측제어기를 통해 과열도 변화를 미리 예측하여 밸브 개도를 빨리



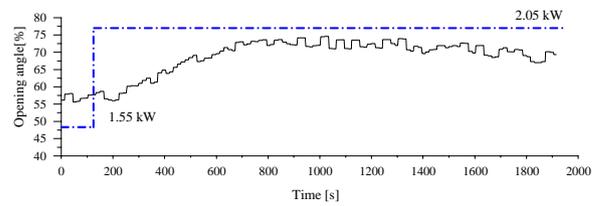
(a) response of chamber temperature



(b) compressor frequency ($K_P=38, K_I=0.21$)



(c) superheat response



(d) opening angle of EEV ($K_P=8, K_I=0.1$)

Fig. 12 The response under the change of thermal load based on PI with the smith predictive controller

열리게 함으로써 과열도를 정상상태로 빨리 도달하게 하는 특성을 보였다.

Fig. 11과 Fig. 12의 결과를 비교해 보면 챔버 내의 온도는 큰 차이가 없으며, 스미스예측제어기를 이용한 PI제어는 단순 PI제어기만을 이용한 경우보다 과열도 제어에서 정상특성 및 속응성이 개선됨을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션 결과에서도 나타났듯이 스미스예측제어기를 설계하였을 때, 비례 및 적분계인도 일반 PI와 다르게 재설정해야 됨을 실험을 통해서도 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 용량 및 과열도의 동시독립적인 제어가 가능한 비간섭모델을 이용하여 가변속 냉동시스템에서 급격한 부하변동으로 인한 과열도 상승으로 인한 COP 향상에 부정적 영향을 끼치는 부동시간의 영향을 스미스예측제어기를 이용하여 개선하였다. 그리고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제어특성을 고찰하였다. 실험 및 시뮬레이션 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 예측제어기는 단순 PI제어기보다 과열도 제어에서 양호한 제어특성을 보였다.
- (2) 효율적인 과열도제어를 위해 예측제어기를 설계하더라도 챔버내 온도에는 큰 영향을 주지 않았다.
- (3) 예측제어기 설계 시 PI제어기의 게인은 단순 PI게인과는 다른 재설정이 필요하다.
- (4) 예측제어기를 이용할 경우 응답에서 큰 효과를 얻기 위해서 정확한 모델링이 선행되어야 한다.

스미스예측기를 갖는 PI제어기를 설계함으로써 냉동기 제어시 COP향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Koury, R. N. N., Machado, L. and Ismail, K. A. R., 2001, Numerical simulation of a variable speed refrigeration system, *Int. J. Refrig.* Vol. 24, pp. 192-200.
2. Outtagarts, A., Haberschill, P. and Lallemand, M., 1997, The transient response of an evaporator fed through an electronic expansion valve, *International Journal of Energy Research*, Vol. 21, pp. 793-807.
3. Choi, J. M., Kim, Y. C. and Ha, J. H., 2001, Experimental study on superheat control of a variable speed heat pump, *SAREK*, Vol. 13, No. 4, pp. 233-241(in Korean).
4. Li, H. and Jeong, S. K., 2006, An experimental model for decoupling control of a variable speed refrigeration system, *KSPSE*, Vol. 10, No. 3, pp. 81-87(in Korean).
5. Li, H. and Jeong, S. K., 2007, The control of superheat and capacity for a variable speed refrigeration system based on PI control Logic, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 15, No. 2, pp. 54-60.
6. Li, H. and Jeong, S. K., 2007, Design and analysis of fuzzy control in a variable speed refrigeration system, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 15, No. 2, pp. 61-69.
7. Li, H., Jeong, S. K. and Yoon, J. I., 2007, Fuzzy control with feedforward compensator of superheat in a variable speed refrigeration system, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 252-262.
8. Huang, J. J. and DeBra, D. B., 1997, Predictor Type Temperature Control Design Parameter Mismatches, *Proc. American Control Conf.*, pp. 1054-1057.
9. Brosilow, A., 1979, The structure and design of Smith predictors from the view-point of inferential control, *JACC*.
10. Choi, J. P., Li, H., Jeong, S. K. and Yang, J. H., 2007, Design of PI control with Smith predictive Control for variable speed refrigeration system, *Proceedings of ICCHT*, pp. 67-73.