

## 냉매압축기 성능시험장치의 제어 특성

이진영\* · 이대영\*\* · 김광호\*\* · 남평우\*

### Control characteristics of a refrigerant compressor test facility

J. Y. Lee\*, D. Y. Lee\*\*, K. H. Kim\*\*, P. W. Nam\*

Key Words: Model Based Predictive control(예측제어, MPC), PID control(비례-적분-미분 제어), Dead time(시간지연), Time constant(시상수)

#### ABSTRACT

This paper describes the control characteristics of thermal/flow systems. In thermal/flow systems, the transport lag plays as a dead time causing a deterioration of the controllability. Besides this, such many parameters including the temperature, pressure, and flow rate affect the system response that a control scheme which can deal with multi-input is required. Particularly in a refrigerant compressor test facility, the evaporator and condenser interact each other so that the change in the evaporator pressure cause the condenser pressure to change or vice versa. Therefore, to control the evaporator pressure, not only the cooling water flow rate in the evaporator but also the coolant flow rate in the condenser is considered. Meanwhile, the conventional PID controllers, which is suitable for a single input system, shows a large overshoot for a disturbance input. In this work, the predictive control scheme is introduced and its applicability is discussed for thermal/flow systems.

#### 1. 서 론

현재 산업현장에서 널리 적용되고 있는 PID 제어방법은 최적화 방법이 잘 알려져 있으며, 제어에 대한 특별한 지식 없이도 적용하기 쉬운 장점이 있다. 반면에 PID 제어방법은 시간지연 요소가 있을 경우 제어 특성이 나빠지는 경향이 있으며, 여러 가지 인자에 의하여 응답결과가 영향을 받는 시스템에는 부적합하다.<sup>(1-3)</sup> 일반적으로 열유동시스템에는 유한한 유동속도로 인한 시간지연 효과가 있으며, 온도, 압력, 유량 등 여러 가지 요소가 시스템에 영향을 미치므로, PID 제

어를 적용하기에 부적절한 면이 있다.

한편 예측제어방법은 시간지연 보상 기능과 다중입력을 고려할 수 있는 장점이 있으므로<sup>(4)</sup> 열유동시스템의 제어에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 2차유체 열량계법의 냉매압축기 성능시험장치를 대상으로 하여, 열유동시스템의 제어특성을 논의한다. 냉매압축기의 성능 측정을 위해서는 압축기의 입출구 압력, 즉 증발기와 응축기의 압력을 설정값으로 일정하게 제어하여야 한다. 본 연구에서는 증발기와 응축기의 과도응답 특성을 시험하고, 이를 이용하여 PI 제어기를 설계 적용하여 제어특성을 시험한다. PI 제어 적용시의 문제점을 파악하여 이를 해결할 수 있는 예측제어방법의 적용에 대하여 논의한다.

\* 한양대학교 기계공학과  
\*\* 한국과학기술연구원

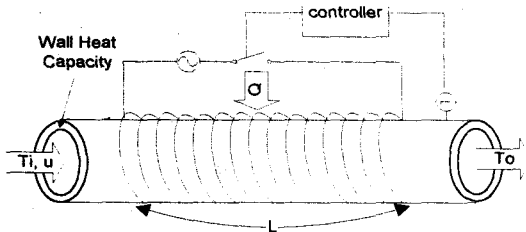


Fig. 1 Schematics of a heater controller.

## 2. 열유동시스템의 제어특성

열유동시스템은 일반적인 동적시스템과 비교하여 온도, 유량, 압력 등 여러 가지 인자가 제어에 영향을 미치며, 유동에 의한 응답지연이 있다. 이러한 특성이 열유동시스템의 제어에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 1과 같이 관내부로 흐르는 유체를 전기 발열체로 가열하여 초기 입구온도  $T_i$ 를 출구온도  $T_o$ 로 제어하는 PID 제어기의 특성을 시뮬레이션 한다. 열유동시스템의 모델링에는 일반적으로 검사영역 내의 유체가 완전한 혼합되어 균일한 온도분포를 갖는다고 가정하는 총합열용량법(lumped thermal method)이 적용되는데, 이러한 모델링 방법은 실제시스템의 특성을 정확히 모델화하지 못한다. 본 연구에서는 모델링의 오차와 시간지연 및 외란의 효과가 PID 제어특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

PID 제어기의 최적설계는 Corripio<sup>(3)</sup>가 제안한 방법에 의하여 이루어 졌다. Fig. 2는 총합열용량법에 의한 모델과 실제 시스템의 단위응답을 나타낸 것이다.

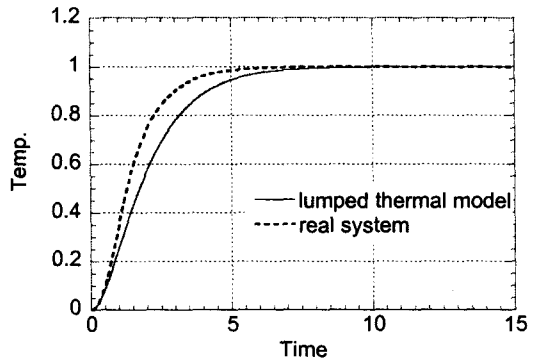


Fig. 2 Step response of the heater.

실제 시스템의 단위응답이 총합열용량법에 의한 모델보다 안정상태로 가는 시간이 짧은 것을 볼 수 있다. 총합열용량법 모델을 바탕으로 설계된 PID 제어기의 제어특성은 Fig. 3의 실선과 같이 예상되지만, 실제 시스템에 적용할 경우 점선과 같이 총합열용량법 모델에 의한 예측결과보다 온도진동이 크고 안정상태에 도달하는 시간이 오래 걸림을 볼 수 있다. Fig. 3은 모델리의 오차가 제어특성에 미치는 영향을 보여준다.

출구온도의 설정값이 변하는 경우의 응답특성과 입구온도가 변하는 경우의 응답특성을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. PID 제어기 설계에 입구온도의 변화가 고려되지 않았으므로, 입구온도의 변화는 외란으로 작용한다. 제어기 설계에 고려되지 않은 요소가 가해지는 경우의 제어특성이 설정값이 변화하였을 때의 제어특성보다 온도진동이 크고 안정상태에 도달하는 시간

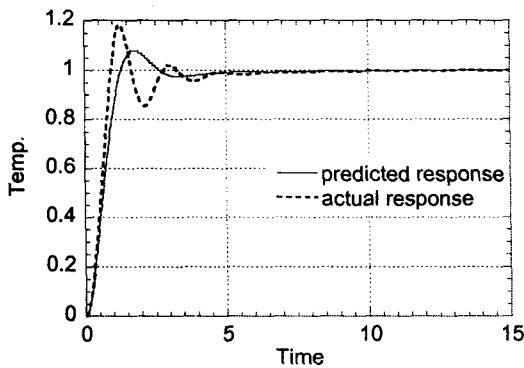


Fig. 3 Control response of the heater.

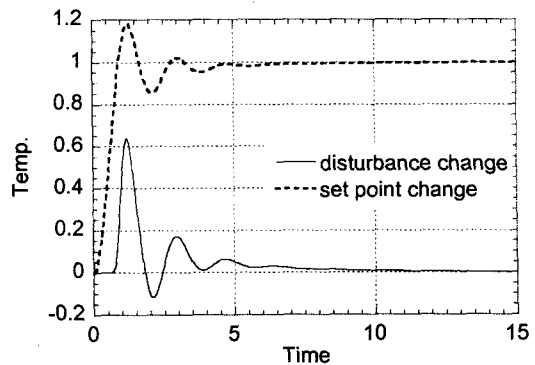


Fig. 4 Characteristics of the control response.

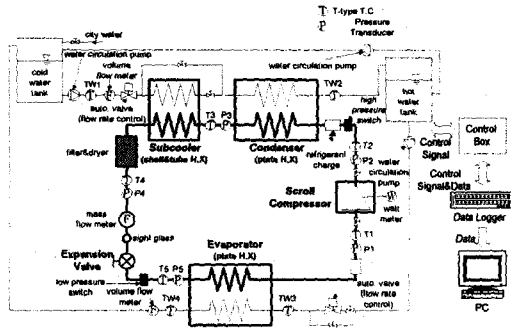


Fig. 5 Schematics of the refrigerant compressor tester.

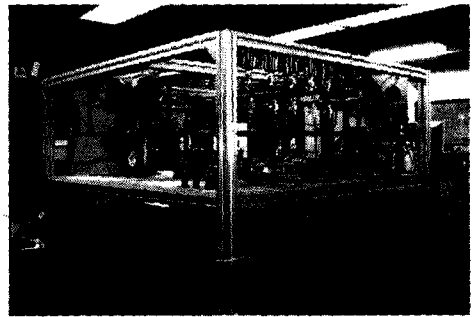


Fig. 6 Picture of the system.

도 더 긴 것을 볼 수 있다. 외란의 입력에 대한 제어 특성이 나쁜 것은 PID 제어가 설정값 변화와 외란 요소의 영향을 구별하지 못하기 때문에 나타난다. 따라서 열유동시스템의 제어를 위해서는 여러 가지 인자의 영향을 고려할 수 있는 제어시스템의 적용이 필요하다.

### 3. 냉매압축기 성능시험장치

본 연구에서는 열유동시스템에 적합한 제어를 개발하기 위하여 소비전력기준 3kW급의 냉매 압축기 성능시험장치를 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 냉매압축기 성능시험장치는 압축기 입출구 압력을 시험조건으로 유지할 수 있도록 하기 위하여, Fig. 5와 6에 나타난 바와 같이 응축기, 증발기, 팽창밸브 등으로 이루어진 냉동시스템과 2차유체 시스템, 각 구성요소의 상태를 측정하고 제어할 수 있는 제어시스템으로 구성된다.

#### 3.1. 냉동 시스템

냉매는 R22, 압축기는 3상 스크롤 압축기를 적용하였다. 응축기와 증발기로는 판형 열교환기를 적용하였으며, 열교환 용량을 여유 있게 선정하여 2차유체의 출구 온도가 응축기와 증발기의 냉매 입구온도와 거의 같아질 수 있도록 하였다. 응축기를 지난 냉매의 완전한 액화를 돕기 위하여 원통-판형 열교환기를 과냉각기로 사용하였으며, 팽창밸브는 수동나사형 밸브를 사용하였다.

#### 3.2. 2차유체 순환장치

2차유체 순환장치는 200리터의 냉각수, 냉수탱크와 냉각수와 냉수를 순환시킬 수 있는 2대의 펌프, 그리고 냉각수 온도를 일정하게 유지하기 위한 인버터에 의해 회전수가 제어되는 조온펌프로 구성되어있다. 조온펌프는 열평형에 의해 고온수통에서 버려지는 2차유체를 이용하여 저온수통의 온도가 일정하게 유지되도록 제어한다.

#### 3.3. 제어시스템 및 센서

제어시스템은 각종 센서 신호를 입력받고 기기의 운전신호를 출력하여 구성요소를 자동으로 기동/정지시킬 수 있는 안전차폐기, 릴레이, 스위치 등과 개인용 컴퓨터로 구성된 하드웨어 부분과, 입력신호를 분석하여 시스템의 운전상태를 판단하고 각 구성요소로의 출력값을 결정하는 소프트웨어 부분으로 구성된다. Fig. 5에 표시된 것과 같이 응축기측과 증발기측의 2차유체 유량제어를 위하여 자동밸브를 사용하였으며, 자동밸

Table 1 Specification of valve actuator and sensors.

Valve Actuator	Nominal Stroke	20mm
	Running Time	36sec
Inverter	출력주파수	400Hz
	최대출력	0.75kW
Turbine Flow Meter	Flow Range	0.15~13.0GPM
	Accuracy	±2%(min.flow)
Mass Flow Meter	Flow Range	0.6~6kg/min
	Accuracy	±0.2%(min.flow)
Pressure Transducer	Operating Range	100, 500psi
	Accuracy	±0.05%FS

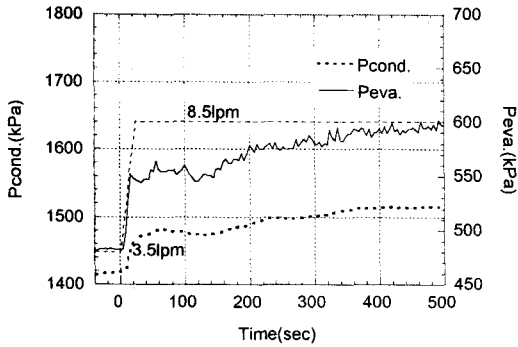


Fig. 7 Step response with the increase in the evaporator water flow rate.

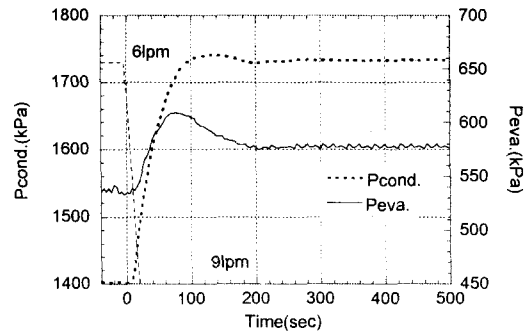


Fig. 8 Step response with the decrease in the condenser water flow rate.

브에 의해 조절된 2차유체의 유량은 터빈형 유량계에 의해 측정된다. 본 연구에서는 조온펌프의 회전수를 변화시켜 유량을 제어하기 위하여 교류 주파수를 자유롭게 변환할 수 있는 인버터를 사용하였다. 또한 냉매의 순환유량을 직접 측정하기 위해 질량유량계를 설치하였다. Fig. 5에 표시된 부분의 냉매압력과 온도를 측정하기 위하여 압력계와 T타입 써모커플을 설치하였다. 각 구성 요소들에 대한 사양은 Table 1과 같다.

### 3.4. 성능시험장치의 단위 응답 특성

Fig. 7과 8은 성능시험장치의 증발기와 응축기의 2차유체 유량을 증·감시켜 얻은 단위 응답 특성이다.

Fig. 7은 응축기의 냉각수 유량은 일정하게 유지시키고 증발기의 냉수유량을 증가시킨 경우이다. 증발기의 압력이 상승함에 따라 응축기의 압력이

따라서 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이는 증발기와 응축기가 서로 연결되어 상호작용을 주고 받기 때문이다. 따라서 증발기 압력을 변화시키고자 제어할 때, 응축기도 함께 제어하여야 함을 알 수 있다. Fig. 8은 증발기의 냉수유량을 일정하게 유지시키고 응축기의 냉각수 유량을 감소시킨 경우로 Fig. 7과 같은 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은 다른 유량범위에서도 유사하게 나타나며, 시스템의 특성이 주로 선형적인 형태임을 알 수 있다.

### 3.5. 성능시험장치의 PID 제어 응답 특성

Fig. 9에서 11은 PID 제어를 시험장치에 적용하였을 때의 제어 응답 특성이다. Fig. 9는 응축기의 냉각수 유량을 일정하게 유지시킨 상태에서 증발기만을 제어하면서 증발기의 압력 설정값을 변화시킨 결과 이

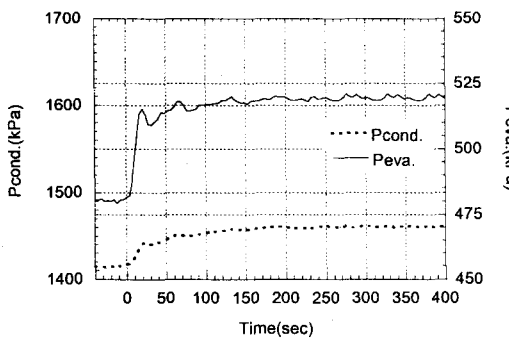


Fig. 9 Evaporator control response in case of holding the condenser water flow rate constant.

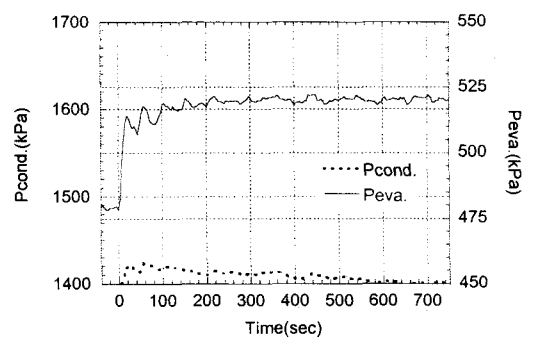


Fig. 10 Control response with an increase in the evaporator pressure set value.

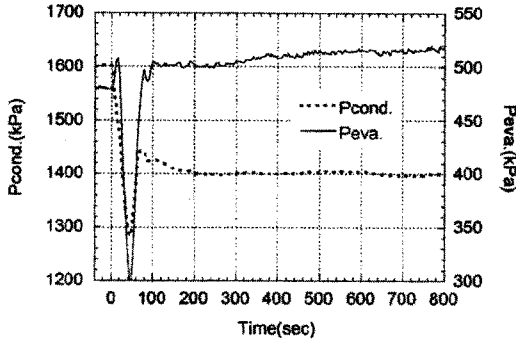


Fig. 11 Control response with an increase in the evaporator pressure set value and a decrease in the condenser pressure set value.

다. Fig. 7에 나타난 단위 응답 특성과 유사하게 증발기 압력이 변화에 따라 응축기의 압력이 변화하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 증발기 설정값만을 변화시키고 증발기와 응축기 모두를 제어한 결과이다. 증발기의 압력변화가 응축기에 영향을 주며 응축기는 제어기 설계시 고려되지 못한 증발기의 영향을 극복하고 설정값을 유지하는데 Fig. 9보다 압력진동이 크고 정착시간이 오래 걸림을 볼 수 있다. 이는 PID 제어기가 단일입력만을 고려할 수 있기 때문에 나타나는 문제점으로 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 응축기 입장에서 증발기의 변화에 의한 영향을 하나의 입력으로 고려할 수 있는 다중입력의 처리가 가능한 제어방법이 필요하다.

Fig. 11은 증발기 압력은 상승, 응축기의 압력은 감소하도록 증발기와 응축기 모두를 제어한 결과이다. 반응초기에 상당히 큰 과도응답이 나타나는데, 이는 PI

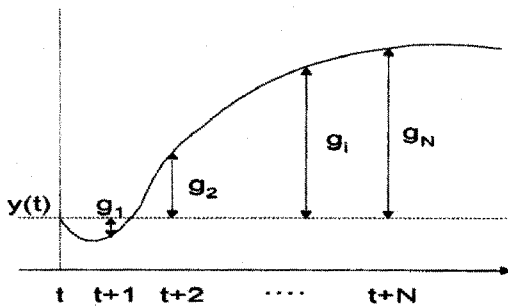


Fig. 13 Step response.

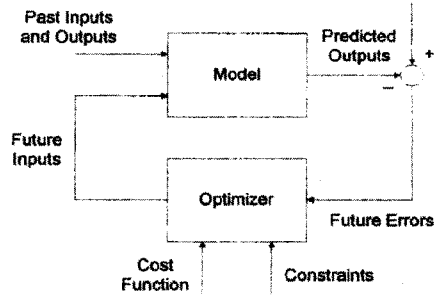


Fig. 12 Basic structure of MPC.

제어기가 증발기와 응축기의 상호작용을 고려하지 못하기 때문이다.

#### 4. 예측제어에 의한 열유동 시스템의 제어

앞에서 증발기와 응축기의 상호작용으로 인해 PI 제어기의 제어특성이 나빠짐을 보였다. 증발기와 응축기의 상호작용은 증발기 냉수유량 변화의 영향을 응축기 제어에 고려하고, 응축기 냉수유량의 변화를 증발기 제어에 고려함으로써 해결할 수 있으며, 이를 위해서는 다중입력을 처리할 수 있는 제어기가 필요하다.

본절에서는 냉매압축기 성능시험장치에 적합한 예측제어기의 설계 방법을 보이고자 한다. PID 제어기 단일입력 시스템에만 적용 가능한 반면 예측제어는 다중입력이 가능한 제어방법으로 앞서 언급한 응축기 압력의 제어에 증발기측의 변화를 하나의 입력으로 취급할 수 있어 Fig. 10, 11에서 나타난 문제점을 해결할 수 있다. 예측제어는 물리적 근거에 바탕을 둔 모델을 적극 활용함과 동시에 과거의 정보 및 미래에 대한 예측결과를 이용하여 제어를 수행한다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 12과 같다.

개념적으로 예측제어를 자동차를 운전할 때 전방의 상황을 보고 운전하는 것에 비유한다면, PID는 후방과 측방만을 보며 운전하는 것과 같다.

외란이 예측구간에 대해 일정하다면 실험장치의 단위 응답 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_e(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u_e(t-i) + \sum_{i=1}^{\infty} d_i \Delta u_e(t-i) + \hat{n}(t|t) \quad (1)$$

여기서,  $g_i, d_i$ 는 Fig. 13에서 보는 것과 같이 증발기, 응축기의 단위입력에 대한 표본 출력값이다. 하첨자  $e, c$ 는 각각 증발기와 응축기를 나타낸다.  $\Delta u(t)$ 는 현재의 단위입력과 과거의 단위입력의 차이이다. 미래의 출력 예측값은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{y}_e(t+k) = & \sum_{i=1}^k g_i \Delta u_e(t+k-i) \\ & + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u_e(t+k-i) \\ & + \sum_{i=k+1}^{\infty} d_i \Delta u_c(t+k-i) + \widehat{n}(t+k) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)의 오른쪽 항은 현재의 time step에 대하여  $k$  step 만큼 앞선  $t+k$  step에 대한 출력 예측값이다. 오른쪽 첫항은 증발기 냉수의 미래 입력에 관련된 항이며, 두 번째 항은 과거의 증발기 냉수의 입력이 미래의 출력에 미치는 영향을 나타내며, 세 번째 항은 과거의 응축기 냉각수의 입력이 증발기에 미치는 영향을 하나의 입력처럼 표현한 것이다. 마지막 항은 외란 항이다. 두 번째, 세 번째항과 마지막항은 현재의 입력에 의해 제어될 수 있는 요소들이 아니기 때문에 이들을 하나의 free response로 묶어 생각할 수 있다. 따라서 식(2)는 식 (3)과 같이 미래에 관련된 항과 free response에 관련된 두 항으로 나타낼 수 있다.

$$\widehat{y} = Gu + f \quad (3)$$

예측제어는 시스템에 영향을 미치는 요소들이 측정 가능한 경우 이들을 입력으로 취급하여 쉽게 보상할 수 있으며, 이 경우 free response는 다음과 같이 표현된다.

$$f = f_u + D u_c + f_d \quad (4)$$

여기서,  $f_u$ 는 식(2)에서 두 번째와 마지막 항에 대한 응답이고, 두 번째 항은 응축기가 증발기에 미치는 영향을 고려한 부분이며, 마지막항은 측정 불가능한 외란의 영향이다.

식(3)에서 구하고자하는 것은 예측된 제어입력인  $u$ 인데 최적화된  $u$ 는 식(5)<sup>(4)</sup>와 같이 쓸 수 있다.

$$u = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f) \quad (5)$$

여기서,  $w$ 는 reference trajectory이고,  $\lambda$ 는 가중치로 값이 작을수록 시스템 응답이 안정상태에 빨리 도달하지만 제어 입력의 변동이 커지며, 이 값을 크게 하면 시스템의 과도응답 특성이 느려지지만 제어 입력의 변동을 작게 할 수 있다.

이와 같이 예측제어는 다중입력이 가능하여 시스템에 영향을 미치는 요소들을 각각의 입력으로 취급하여 고려해 줄 수 있어 PID 제어에서 나타난 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 복잡한 시스템에도 적용이 가능하다.

## 5. 요약

시스템에 영향을 미치는 여러 가지 인자와 시간지연의 영향에 민감한 열유동 시스템에 적합한 제어를 설계하여 실제 시스템에 적용하여 보고자 압축기 성능 시험조건을 자동으로 제어할 수 있는 냉매압축기 성능 시험장치를 제작하였다. 성능시험장치 응답특성에서 시간지연은 그리 크게 나타나지 않았지만 응축기와 증발기의 상태변화가 다른 쪽의 변화에 크게 영향을 미치므로 이러한 상호간의 영향을 입력으로 취급하여 보상할 수 있는 제어방법이 요구된다.

PID 제어를 열유동시스템에 적용할 경우, 외란에 대한 제어특성이 상대적으로 취약한 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 증발기와 응축기의 상호작용을 고려하기 위하여 시간지연 보상과 다중입력 처리가 용이한 예측제어방법을 소개하였다. 현재 냉매압축기 성능시험장치용 예측제어를 설계 중에 있다.

## 참고 문헌

- (1) Ogata, K. 1990, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall International Inc.
- (2) Smith, O. J. M., 1957, "Closer control of loppers with dead time", Industrial & engineering chemistry process design and development., Vol. 21, pp. 308~323.
- (3) Camacho, E. F. and Bordons, C., 1998, "Model Predictive Control", Springer-Verlag, London.
- (4) Corripio, A. B., 1990, "Tuning of Industrial Control Systems", Instrument Society of America, U.S.A.