

토출가스 바이패스제어에 의한 산업용 냉각기의 온도제어

변종영, 주우진, 최준혁, 문춘근*, 윤정인**, 정석권***
 부경대학교 대학원 냉동공조공학과, *(주)대일, **부경대학교 기계공학부

Temperature Control of Oil Cooler with Hot-gas Bypass

Jong-Yeong Byun, Woo-Jin Joo, Jun-Hyuk Choi
 Choon-Geun Moon*, Jung-In Yoon**, Seok-Kwon Jeong***

ABSTRACT: This paper presents precise temperature control of oil outlet in an oil cooler with hot-gas bypass control as an industrial refrigerator. The control system was designed for obtaining precise temperature control performance even though abrupt disturbances based on flow rate control of hot-gas bypass. PID controller was adopted in feedback control system. We showed that the gain of PID could be easily determined by using gain-tuning methods without any numerical model. Through some experiments, excellent control performances such as overshoot within 1.7%, steady state temperature error within $\pm 0.1^\circ\text{C}$ were established by a simple PI controller. We expect that the system can control the target temperature within error of 0.33°C under abrupt disturbances.

Key words: Hot-gas bypass(토출가스 바이패스), Oil cooler(오일 냉각기), PID control(PID 제어), Electronic expansion valve(전자팽창밸브), Gain tuning(게인 튜닝)

기 호 설 명

- T : 온도 [$^\circ\text{C}$]
- e : 오차 [$^\circ\text{C}$]
- u : 조작량
- K_p : 비례계수
- K_i : 적분계수
- K_d : 미분계수
- K_{cr} : 임계이득
- P_{cr} : 임계주기
- K_u : 한계이득, $K_u = \frac{4A_r}{\pi A_o}$
- T_u : 한계주기
- A_r : 입력진폭
- A_o : 출력진폭

1. 서 론

산업기계는 공작기계, 정밀가공기계 등과 같이 각종 산업의 생산 공정에 사용되는 기계를 말한다. 산업용 냉각기는 이들 산업기계의 가공 부위에 발생하는 열 부하를 오일을 이용하여 냉각시키는 장치이다. 최근 산업기계는 고속화, 자동화와 더불어 정밀화가 요구되고 있으며, 가공 정밀도를 향상시키기 위해서는 가공 부위 온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 산업용 냉각기의 필요성이 대두된다. 이는 가공부의 열 발생 시 재료의 열 변형이 수반되므로 이를 억제해야 하기 때문이다.

기존의 산업용 냉각기의 온도제어 방식은 압축기 on-off 운전 방법이 주로 사용되고 있다. 이 방법은 정교한 온도제어가 불가능하고, 가동 및 정지를 반복함으로써 소비전력의 증가와 압축기 수명을 단축시킨다. 보다 정밀한 온도제어 방법

† Corresponding author
 H.P. : 010-5195-8924
 E-mail address: skjeong@pknu.ac.kr

으로는 토출가스 바이패스 밸브에 의한 유량제어법(토출가스 바이패스 방식)과 압축기의 회전수 제어에 의한 유량제어법이 있다.

토출가스 바이패스 방식은 구조가 간단하면서도 비교적 정밀한 온도제어가 가능하다. 압축기 회전수 제어 방식은 정밀한 온도제어가 가능하며 소비전력도 줄일 수 있는 장점이 있으나 제어장치인 인버터를 필요로 하기 때문에 가격이 고가이고 구조가 복잡한 것이 단점이다.⁽¹⁾

본 논문에서는 위에서 거론한 두 가지 방식 가운데 토출가스 바이패스 방식 냉각기의 정밀온도제어기 설계에 대해서 검토한다.

이 방식은 토출가스 바이패스 밸브인 전자팽창밸브(Electronic Expansion Valve; EEV)의 개도량을 PID(Proportional Integral Derivative)로직에 의해 피드백제어 한다. 제어기 설계 시의 핵심은 제어량(제어변수)인 오일 출구온도가 적절한 과도특성 및 정상특성을 갖도록 PID 계인을 설계하는 것이다. 제어기 계인은 일반적으로 전달함수 모델에 의한 다양한 응답에 기반 하여 설계사양과 안정성을 동시에 만족하는 조건으로부터 설계된다. 본 연구의 제어대상은 수학적 모델링이 매우 어려우므로 모델 기반의 설계가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 계인 튜닝법에 의한 PID설계를 검토하고, 실험을 통하여 그 성능을 확인한다.

2. 냉각기의 토출가스 바이패스 제어

2.1 토출가스 바이패스 냉각기

토출가스 바이패스 방식으로는 압축기 출구 냉매를 증발기 입구 또는 증발기 출구로 바이패스

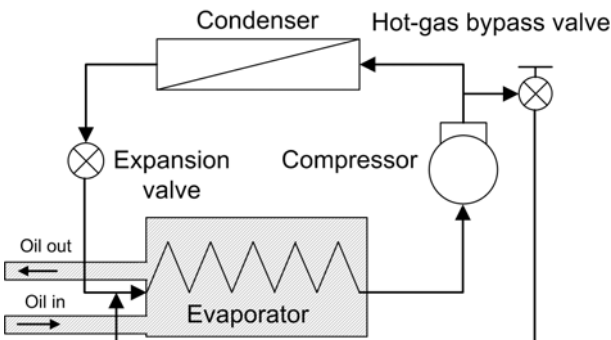
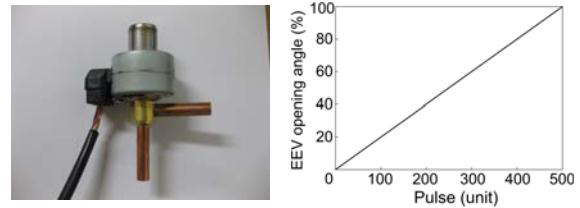


Fig. 1 Schematic diagram of hot-gas bypass

Table 1 Specifications of EEV

Operating range	0~500 [pulse]
Rated voltage	DC 12 [V]
Max working pressure	3.3 [Mpa]



(a) Appearance (b) Characteristic

Fig. 2 Appearance and characteristic of EEV

시키는 방식과 응축기 출구 냉매와 혼합시켜 증발기 출구로 바이패스시키는 3가지 방식이 일반적이다. 이 방식들 가운데 첫 번째 방식은 압축기의 토출온도가 낮아 안정적 운전이 가능하며, 냉각능력의 변화가 가장 커 제어 범위가 넓으므로 이 방식을 연구 대상으로 선정하였다.⁽²⁾

Fig. 1은 토출가스 바이패스 방식의 개략도를 보여준다. 이 방법은 압축기에서 압축된 고온·고압의 냉매를 증발기 입구로 바이패스시켜 입구측 저온·저압의 냉매와 혼합시킨다. 이로 인해 증발기의 온도는 상승하게 되고 냉각능력은 감소하게 된다. 그러므로 토출가스 바이패스 밸브인 EEV의 개도를 0~100%까지 제어함으로써 증발기의 냉각능력을 조절하여 결과적으로 산업기계의 냉각오일의 온도를 제어하게 된다.

Table 1은 제어대상인 EEV의 주요 사양을, Fig. 2는 EEV의 형상과 입력 펄스 수에 따른 개도 변화를 각각 나타낸다.

2.2 PID제어

PID제어는 원리가 간단하고, 제어기 계인 조정이 비교적 쉬워 산업현장에서 가장 널리 사용되는 제어기법이다. PID제어기는 일반적으로 비례제어, 적분제어, 미분제어를 단독 혹은 두 가지 이상을 결합한 형태로 사용한다.

Fig. 3은 산업용 냉각기의 오일 출구온도를 제어하기 위한 PID제어기를 갖는 피드백 제어시스템의 블록도이다. 온도편차 e 는 $e = T^* - T$ 로 구

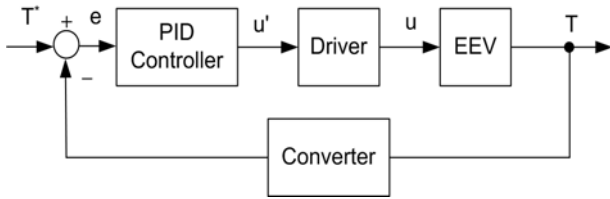


Fig. 3 Block diagram for EEV control

해지며 PID제어기는 이 값을 0으로 하는 조작량을 생성하여 드라이브에 보낸다.

PID제어기는 식 (1)과 같이 비례, 적분, 미분 보상기를 통해 조작량을 결정한다.

$$u(t) = \left\{ K_p + K_i \int dt + K_d \frac{d}{dt} \right\} e(t) \quad (1)$$

PID제어기의 설계는 식 (1)의 계수 K_p, K_i, K_d 를 주어진 설계사양을 만족하도록 결정하는 과정이다. 제어기 설계방법으로는 수학적 모델에 기반한 방법과 수학적 모델에 기반하지 않는 계인 튜닝법이 있다.

냉각기는 기본적으로 압축기, 팽창기와 열교환기로 구성되고 이들은 배관을 통해 상호 영향을 미치는 간접계를 이루고 있다. 또한, 시스템이 갖는 비선형성으로 인해 명확한 동특성 파악이 어려워 실용적인 수학적 선형모델을 얻기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 모델에 기반하지 않는 계인 튜닝법으로 PID제어기의 계수를 결정하는 방법에 대해 검토한다.

계인 튜닝법으로는 계단응답법, 임계진동법, 계전기동조법 등이 대표적이다.

계단응답법은 S자 응답 특성이 나타나는 시스템에 대해 정해진 특성값들을 구하고 이 값들로부터 PID 계인을 결정한다.

임계진동법은 P제어기만을 이용하여 임계진동이 일어날 때까지 K_p 값을 증가시킨다. 임계진동을 유발하는 계인 K_{cr} 과 임계주기 P_{cr} 을 이용하여 계인을 결정한다.

계전기동조법은 오차신호의 부호를 식별하여 양이면 출력을 0, 음이면 최대값으로 출력하여 이때 나타나는 진동으로부터 소정의 특성값들을 구하고 이 값들로부터 계인을 결정한다.

본 연구에서는 이 3가지 방법으로 PID계수를 결정하고 실험을 통해 성능을 각각 비교한 후 토출가스 바이패스 방식에 가장 적합한 튜닝방법을

탐색한다.

D제어기는 외란을 신속히 억압할 수 있는 역할을 하지만, 샘플링 주기의 영향 등에 매우 민감하다. 따라서 PI로써 설계사양을 만족시킬 수 있다면 가급적 D제어기는 사용하지 않는 것이 바람직하다.

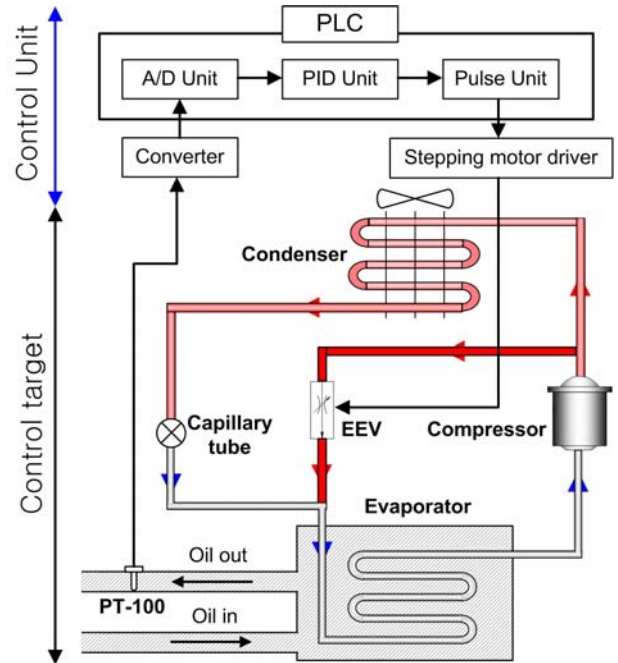


Fig. 4 Control system of industrial refrigerator

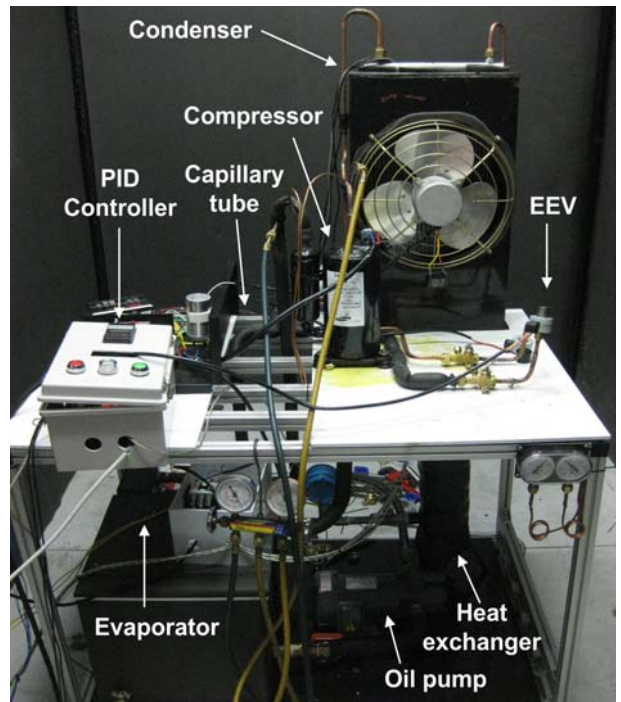


Photo. 1 Experimental equipments

3. 실험방법

Fig. 4는 실험장치의 구성도를, Photo. 1은 실험장치를 나타낸다. Table 2는 실험에 사용된 장치의 구체적인 사양을, Table 3은 실험조건을 각각 나타낸다.

제어대상인 산업용 냉각기는 증발기, 압축기, 응축기, 모세관과 EEV로 구성되어 있다. 제어장치는 PLC(Programmable Logic Controller)와 스테핑모터 드라이버로 구성된다. 또한 온도센서인 PT-100, 온도/전압 신호변환기(converter)가 온도 검출 및 신호변환을 위해 사용된다.

PT-100을 통해 측정된 오일 출구온도는 컨버터를 통해 전압으로 변환되어 PLC로 전송된다. PLC에서는 전송된 오일의 출구온도와 설정온도를 비교하게 되고, 그 편차가 PID제어기에 의해 0이 되도록 펄스 지령신호를 출력한다. 스테핑모터 드라이버는 이 펄스 신호에 대응하는 정·역전 신호 및 회전수에 상응하는 펄스를 출력하여 EEV의 개도를 제어한다. 산업용 냉각기의 운전상황 파악을 위해 주요 부분의 온도는 T-type 열전대(thermocouple)를 이용하여 측정하였다. 온도, 전력, 밸브개도, 오일유량 등의 각종 시스템 정보는 데이터 수집장치(Agilent사, 34970A)로 모아져 PC로 전송, 메모리에 저장된다.

제어대상인 산업용 냉각기는 외기조건 35℃에서 약 3kW의 냉동능력을 갖도록 설계, 제작되었다. 이 시스템에 실제 상황을 재현하기 위한 열부하를 인가하기 위해 전기히터(electrical heater)를 장착하였다.

Table 2 Specification of test unit

Compressor	Rotary type, 1RT
Condenser	Air-cooled Fin and Tube type
Evaporator	Plate heat exchanger
Expansion device	Capillary tube
Bypass valve	EEV
Refrigerant	R-22

Table 3 Experimental conditions

Oil flow rate	25 [l/min]
Air temperature	35 [℃]
Control period	1 [sec]

4. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 오일 출구온도는 산업기계의 특성을 고려하여 35℃로 설정하였고, 이 값은 운전 중 가변되지 않는 것으로 가정하였다.

제어기는 정상상태(steady state) 하에서 외란이 인가되더라도 오일 출구온도를 항상 적정 편차 이내로 유지할 것이 요구된다.

Fig. 5는 무부하 운전 상태에서 EEV 개도량이 0%와 100%일 때의 오일 출구온도 변화를 각각 나타낸다. 이 그림에서 개도량이 100%일 경우, 오일 출구온도는 25℃로 고정됨을 알 수 있다. 즉, 무부하 상태에서는 EEV의 개도 제어를 통해 오일 출구온도를 설정온도인 35℃로 유지할 수 없게 된다. 따라서 개인 튜닝시에는 적절한 부하를 인가한 상태에서 행해야 함을 알 수 있다.

Fig. 6은 시스템에 2kW의 부하를 인가한 상태에서 EEV의 개도량을 0%와 100%로 조절하였을 때의 오일 출구온도 변화를 각각 나타낸다.

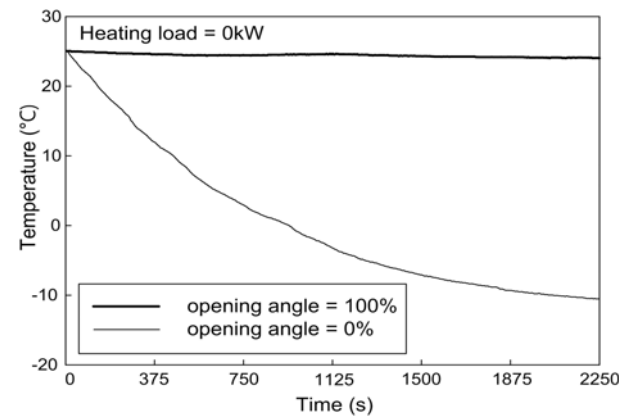


Fig. 5 Temperature response under no load

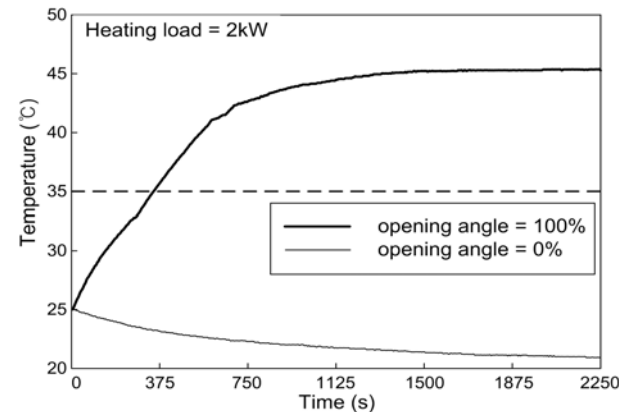


Fig. 6 Temperature response under 2kW load

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 계단응답법, 임계진동법, 계전기동조법의 적용을 위한 실험결과를 각각 나타낸다. 우선 Fig. 7은 S자형 응답이 아니므로 임계진동법 적용이 불가능하다. 반면에 Fig. 8과 Fig. 9는 진동형 응답이므로 임계진동법과 계전기동조법 적용이 가능함을 알 수 있다.

Table 4는 Fig. 8과 Fig. 9를 이용하여 구한 PID계수 값들이다.

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 Table 4의 PID계인 값으로 오일 출구온도를 제어한 결과를 각각 나타낸다.

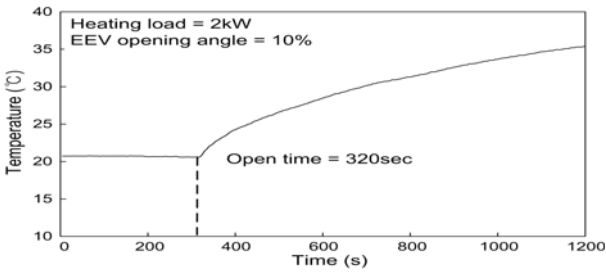


Fig. 7 Step response

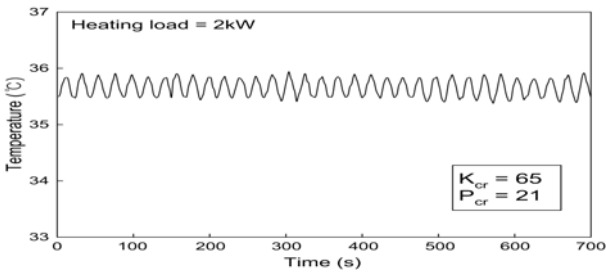


Fig. 8 Critical oscillation response

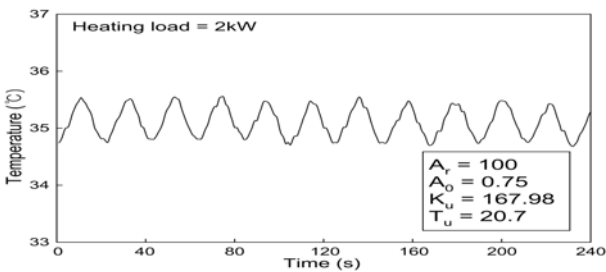


Fig. 9 Relay auto-tuning response

Table 4 PID gain according to tuning method

Tuning method	Controller	K_p	K_i	K_d
Critical oscillation	PI	29.3	1.67	0
Critical oscillation	PID	39.0	3.71	102
Relay auto-tuning	PID	84.9	13.8	131

Table 5는 위 실험의 결과로 얻어진 과도특성 및 정상특성 값들을 나타낸다. 자료 분석 결과 임계진동법으로 구한 PI제어기가 가장 좋은 제어성능을 보였다.

Fig. 13은 순간적으로 외란이 인가된 상태에서 임계진동법으로 구한 PI제어기에 의한 온도 제어 응답을 나타낸다. 외란 하에서도 양호한 제어특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

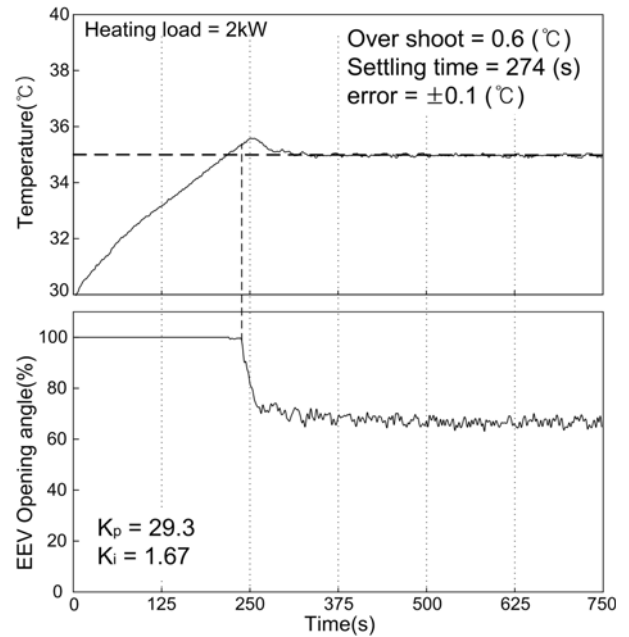


Fig. 10 PI control response by critical oscillation

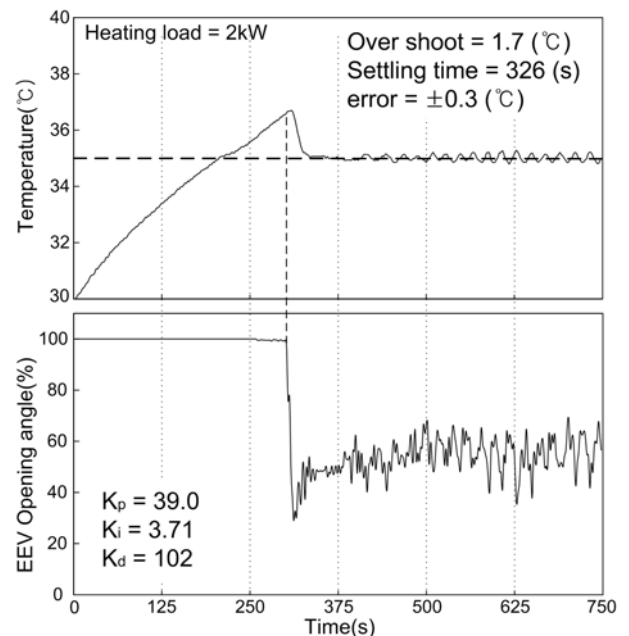


Fig. 11 PID control response by critical oscillation

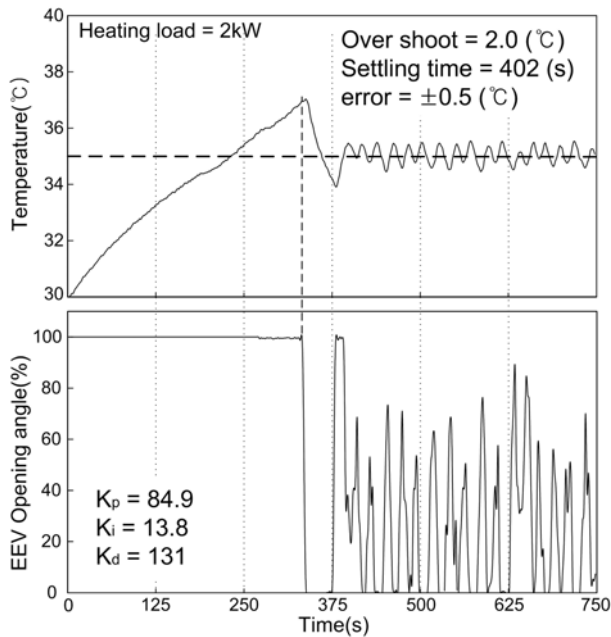


Fig. 12 PID control response by relay auto-tuning

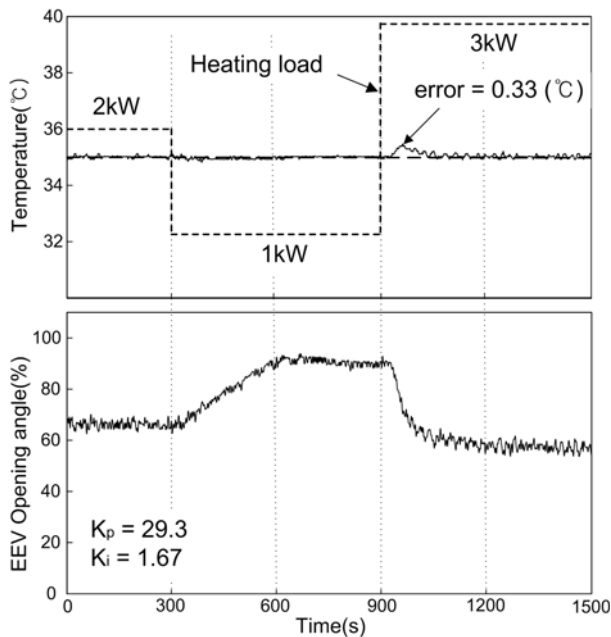


Fig. 13 PI control response by critical oscillation under abruptly added disturbance

Table 5 Results of control performance with PID

PID gain	Overshoot	Settling time	Error
$K_p 29.3, K_i 1.67$	1.7[%]	274[s]	$\pm 0.1 [^\circ\text{C}]$
$K_p 39.0, K_i 3.71, K_d 102$	4.9[%]	326[s]	$\pm 0.3 [^\circ\text{C}]$
$K_p 84.9, K_i 13.8, K_d 131$	5.7[%]	402[s]	$\pm 0.5 [^\circ\text{C}]$

5. 결론

본 연구에서는 산업용 냉각기의 토출가스 바이패스 방식에 의한 정밀 온도제어를 위해 PID제어를 설계하였다. 임계진동법에 의한 계인 튜닝으로 PI제어를 쉽게 결정할 수 있었고 제어 결과 오버슈트가 1.7%, 정상상태오차가 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 로 우수한 제어성을 보였다. 또한, 열 부하의 급격한 변동 시에도 목표 온도의 오차를 0.33°C 이내로 정밀하게 제어할 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Lee, S. W., Yeom, H. K., 2008, Performance of thermal error controller to minimize thermal deformation of machine tools(in Korean), Proceeding of Korean Society for Precision Engineering(spring), pp. 376-380.
2. Yaqub. M, Zubair S. M., Jameel-ur-Rehman Khan, 2000, Performance evaluation of hot-gas bypass capacity control scheme for refrigeration and air-conditioning systems, Energy, Vol. 25, pp. 543-561.
3. Yaqub. M, Zubair S. M., Khan S. H., 1995, Second-law-based thermodynamic analysis of hot-gas by pass, capacity-control schemes for refrigeration and air-conditioning systems. Energy-The International Journal, Vol. 20, No. 6, pp. 483-93.
4. Choi, J. H., Beak, S. M., Jin, B. J., Choi, W. J., Moon, C. G., Lee, H. S., Yoon, J. I., 2009, Performance Characteristics of Cooler Controlled Capacity Using Hot-gas Bypass, Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy, Vol. 2, pp. 502-505.
5. Lee, S. W. and Lee, C. W., 2007, Assessment capability of oil cooler with hot-gas(in Korean), Proceeding of Korean Society for Precision Engineering, No. 6, pp. 459-460.