

PI와 피드포워드 제어를 이용한 공작기계용 오일쿨러의 핫가스 바이패스 방식 정밀 온도 제어

정 석 권[†], 변 종 영, 김 상 호, 윤 정 인
부경대학교 냉동공조공학과

Precise Temperature Control of Oil Coolers with Hot-gas Bypass Manner for Machine Tools Based on PI and Feedforward Control

Seok-Kwon Jeong[†], Jong-Yeong Byun, Sang-Ho Kim, Jung-In Yoon

Dept. of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

(Received October 25, 2010; revision received December 9, 2010)

ABSTRACT: Recently, the performances of speed and accuracy are enhanced in machine tools. The high speed of the machine tools usually causes harmful thermal displacements on the objects. To reduce the thermal displacements, machine tools generally adopt oil coolers with precise temperature control function. This study aims at precise control of oil outlet temperature in the oil coolers with hot-gas bypass manner based on PI control logic. The control system was designed for obtaining steady state error within $\pm 0.1^\circ\text{C}$ and maximum overshoot with 0.8% even though abrupt disturbances are added to the system. We showed that the PI gains could be easily decided by numerical simulations using practical transfer function which got experiments. Also, transient characteristics could be improved significantly by reflecting the inlet temperature of an evaporator to the output of a controller feedforwardly considering periodic abrupt disturbances. Through some experiments, excellent control performances were established by the suggested control.

Key words: Hot-gas bypass(핫가스 바이패스), Oil cooler(오일쿨러), Electronic expansion valve(전자팽창밸브), PI control(PI 제어), Feedforward control(피드포워드 제어)

기 호 설 명

<p>c : 비열 [$\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$]</p> <p>$E$: 열량</p> <p>G : 전달함수</p> <p>K : 이득상수</p> <p>K_i : 적분게인</p> <p>K_p : 비례게인</p>	<p>\dot{m} : 오일의 질량유량 [kg/sec]</p> <p>M : 오일탱크 내부의 오일질량 [kg]</p> <p>s : 복소기호</p> <p>T : 온도 [$^\circ\text{C}$]</p>
---	--

하첨자

h : 핫가스 바이패스 밸브

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-629-6181; fax: +82-51-629-6181

E-mail address: skjeong@pknu.ac.kr

1. 서 론

오일쿨러는 공작기계의 공작물 가공 부위에서 발

생하는 열 부하를 오일을 이용하여 냉각시키는 장치이다. 최근의 공작기계는 절삭속도 20,000 rpm, 이송속도 120 m/min 등 매우 고속으로 가동되기 때문에 공작물의 가공 부위에 상당한 열이 발생한다.⁽¹⁾ 열은 공작기계의 특정 부품과 공작물의 열 변형을 초래하고 이로 인해 공작물의 가공 정밀도와 공작기계의 신뢰성이 저하된다. 따라서 공작기계에서의 과도한 발열을 억제, 가공 정밀도를 향상시키기 위해 공작기계의 가공 부위에 냉각된 오일을 공급하는 오일쿨러가 필수적이다. 오일쿨러의 출구 오일 온도가 일정할 경우, 공작 과정에서의 공작물의 열 변형을 방지할 수 있다. 따라서 오일쿨러에서는 출구 오일의 온도를 일정하게 유지할 수 있는 온도 제어 시스템의 설계가 매우 중요하다.

오일쿨러에 가장 널리 사용되고 있는 제어는 압축기의 on-off 제어 방식이다.⁽¹⁾ 이 방식은 정교한 온도 제어가 어렵고, 빈번한 기동 및 정지 동작으로 소비전력이 증가하며, 압축기의 수명이 단축되는 단점이 있다. 보다 정밀한 온도 제어 방식으로는 핫가스 바이패스(Hot-gas Bypass; HB) 방식과 압축기 가변속 제어 방식이 있다.⁽²⁾

HB 방식은 소비전력 절감 효과는 없지만 구조가 간단하면서도 비교적 정밀한 온도제어가 가능하며, 제어 범위가 넓은 장점을 갖고 있다. 압축기 회전수 제어 방식은 매우 정밀한 온도제어가 가능하며 소비전력을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 제어 범위가 좁고 가격이 고가이며 압축기의 회전수에 따라 팽창밸브의 개도(opening angle) 또한 제어해야 하므로 제어 시스템 구조가 복잡한 단점이 있다.

본 논문에서는 이 두 방식 가운데 비교적 저가 범용 모델인 HB 방식에 의한 공작기계용 오일쿨러의 정밀 온도 제어기 설계에 대해서 검토한다.

이 방식은 핫가스 바이패스 밸브(Hot-gas Bypass Valve; HBV)인 전자팽창밸브(Electronic Expansion Valve; EEV)의 개도(opening angle)량을 오일의 출구 온도를 기준으로 PI(Proportional, Integral) 로직에 의해 피드백으로 제어한다. 제어기 설계 시의 핵심은 제어변수인 오일 출구 온도가 적절한 과도상태(transient state) 특성 및 정상상태(steady state) 특성을 갖도록 PI 제어기의 게인(gain)을 설계하는데 있다. 제어기의 게인은 일반적으로 제어 입력과 제어변수 사이의 관계를 규정하는 전달함수 모델을 기반으로 하여 요구되는 설계 사양과 전체 제어계의 안정성을 동시에 만족하는 조건으로부터 설계된다.

본 연구의 제어대상인 오일쿨러는 고유의 비선형 특성으로 인해 실용적인 수학적 전달함수 모델을 얻기가 어렵기 때문에 모델 기반의 설계가 쉽지 않다. 이런 연유로 Byun 등은 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols)의 임계진동법을 이용하여 PI 게인을 직접 튜닝(tuning)하여 제어기를 설계하는 방법에 대해 연구하였다.⁽³⁾ 이 방법은 수학적 전달함수를 구하지 않고도 제어기의 게인을 실험을 통해 직접 구할 수 있다. 그러나 이 방법으로 구한 게인은 근사적인 값이어서, 실 시스템 적용 시에는 실제로 상당한 시행착오를 거쳐 게인 값을 다시 미세 조정해야 하는 번거로움이 있다. Li 등은 기본 냉동사이클에 대한 매우 엄밀한 실험을 통해 실용적인 전달함수 모델을 얻고 이에 기반한 비간섭 제어를 통해 제어대상의 온도와 과열도를 동시에 정밀하게 제어하는 방법을 제시하였다.^(4,5) 이 방법은 정밀한 온도 제어가 가능하고 투입 에너지를 최소화 하는 우수한 제어 성능을 보장하는 반면, 실용적인 전달함수를 얻는데 많은 시간과 노력을 필요로 한다는 단점이 있다.

HBV 제어를 통한 정밀한 온도 제어법에 대한 연구가 일부 발표되어 있으나, 제어를 위한 전단계 과정으로서 정특성 조사에 그치거나^(6,7) 제어기 설계 과정이 지나치게 단순하고 피상적으로 기술되어 있어 적용된 제어칙의 타당성 검토 및 타 시스템에로의 응용이 용이하지 않은 경우가 대부분이다.^(8,9) 따라서 본 논문에서는 HB 방식의 장점인 제어 구조의 간편성과 고정도의 제어 특성을 최대한 살려 제어 정도는 정상 온도 편차가 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이내로 비교적 정도 높게 유지하면서도 제어기를 보다 쉽게 설계하는 실용적인 방법에 초점을 맞춘다. 이를 위해 본 연구에서는 제어대상에 적당한 스텝함수를 인가하여 실험적인 방법으로 전달함수를 구한 후, 랩뷰(Lab VIEW)를 이용한 수치 시뮬레이션을 통해 특정 평가함수를 최소로 하는 PI 게인을 쉽게 설정하는 방법을 제시하고, 실험을 통해 설계한 게인의 제어 성능을 확인한다. 특히 제어기 설계 시에는 공작기계의 특성상, 최대 부하가 급격히, 그리고 주기적으로 인가된다는 점과 실용적으로 구한 제어대상 전달함수의 시정수가 매우 크다는 특징을 적극 고려한다. 이러한 특징으로 인한 제어 성능, 특히 과도 특성 열화를 막기 위해 오일 입구 온도를 제어기 출력 측에 피드포워드로 반영시켜 오일 출구 온도의 제어 성능을 개선하는 방법에 대해서도 검토한다.

2. 오일쿨러의 핫가스 바이패스 제어

2.1 핫가스 바이패스 방식의 오일쿨러 시스템

Fig. 1은 오일쿨러의 개념도이다. 오일쿨러에서 냉각된 오일은 공작기계로 공급되어 가공 부위의 열 부하를 제거한다. 열 부하를 흡수하여 온도가 상승된 오일은 탱크로 회수되고 펌프를 통해 오일쿨러로 보내져 냉각 과정을 거쳐 재사용하게 된다. 따라서 공작물의 열 변형을 막기 위해서는 공작기계로 공급되는 오일쿨러 출구 측의 오일 온도를 항상 일정하게 유지시켜 줄 필요가 있다.

HB 방식에는 압축기의 출구 냉매를 증발기 입구 또는 증발기 출구로 바이패스시키는 방식과 응축기의 출구 냉매와 혼합시켜 증발기 출구로 바이패스시키는 3가지의 방식이 가장 일반적이다. 이 가운데 첫 번째 방식이 압축기의 토출 온도가 낮아 안정적인 운전이 가능하며, 냉각능력의 변화가 커 제어 범위가 넓으므로 본 논문에서는 이 방식을 선정하였다.^(10, 11)

Fig. 2는 HB 방식의 오일쿨러 개략도이다. 이 방법은 압축기에서 압축된 고온·고압의 냉매를 증발기 입구로 바이패스시켜 응축기를 거친 저온·저압

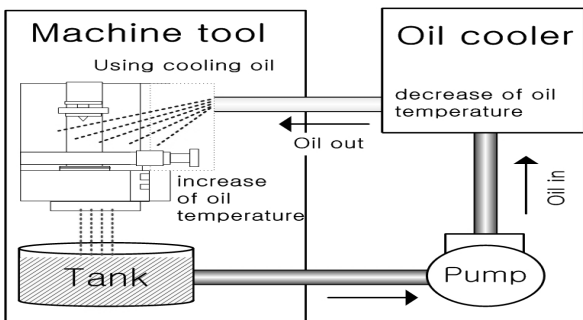


Fig. 1 Schematic diagram of an oil cooler.

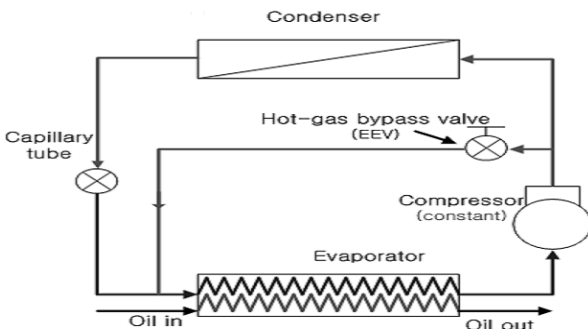


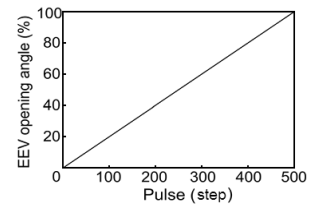
Fig. 2 Schematic diagram of an oil cooler system with hot-gas bypass manner.

Table 1 Specifications of a HBV

Item	Note
Model	ESX-32
Port size	Φ32
Operating pulse range	0~500 [pulse]
Rated voltage	DC 12 [V]



(a) Appearance



(b) Characteristic

Fig. 3 Appearance and characteristic of HBV.

의 냉매와 혼합시킨다. 혼합된 냉매는 온도가 상승하게 되고 결과적으로 냉각능력은 감소하게 된다. 그러므로 원하는 출구 온도가 얻어질 수 있도록 HBV인 전자팽창밸브의 개도를 적절히 제어함으로써 증발기의 냉각능력을 조절하여 공작기계로 공급되는 오일의 온도를 제어할 수 있게 된다.

Table 1은 제어대상인 HBV의 주요 사양을, Fig. 3은 HBV의 외관과 입력 펄스 수에 따른 HBV의 개도량 변화를 각각 나타낸다.

2.2 오일 출구온도 제어를 위한 PI 제어기 설계

Fig. 4는 오일쿨러의 오일 출구 온도를 제어하기 위한 PI 제어기를 갖는 피드백제어시스템의 블록선도이다. 온도 편차 $e(s)$ 는 $e(s) = T_o^* - T_o$ 로 구해지며, PI 제어기인 $C(s)$ 는 PI 로직에 의해 외란 $d(s)$ 가 인가되는 상황 하에서도 이 편차 값을 0으로 수렴하도록 만드는 조작량 $u(s)$ 를 생성하여 제어대상 $G_h(s)$ 에 보낸다.

PI 제어 로직은 식(1)과 같이 편차에 대한 비례·적분 보상을 통해 조작량 $u(s)$ 를 결정한다.

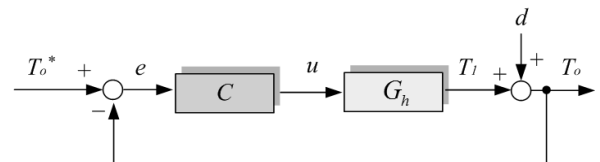


Fig. 4 Block diagram for HBV control.

$$u(s) = \left\{ K_p + \frac{K_i}{s} \right\} e(s) \quad (1)$$

PI 제어기의 설계는 식(1)의 계수인 K_p, K_i 를 주어진 설계 사양과 제어계의 안정성을 만족하도록 결정하는 과정이다.

제어대상인 오일쿨러는 압축기, 팽창기, 열교환기로 구성되고, 이들은 배관(pipe)을 통해 상호 영향을 미치는 간섭계를 이루고 있다. 또한, 시스템이 갖는 비선형성으로 인해 명확한 동특성 파악이 어려워 수학적 모델링이 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실험을 통하여 실용적인 전달함수를 구한 후, 랩뷰 시스템을 이용한 시뮬레이션을 통해 적절한 외란 인가 시 누적에러가 가장 적은 PI 제어기의 계수 결정 방법에 대해 검토한다.

2.3 외란을 고려한 피드포워드 제어기의 설계

정밀한 온도 제어를 위해서는 급격한 외란 인가 시에도 요구되는 제어 정도를 만족하도록 과도 특성이 양호한 제어기를 설계해야 한다. 특히 동작기계에서는 아이들(idle) 운전 상태에서 공작물이 투입되는 시점에 급격한 최대 외란이 순간적으로 가해지는 운전 형태를 주기적으로 반복하게 되므로 이에 대한 검토와 대응이 필요하다.

오일쿨러의 경우, HBV의 개도량 변화에 따른 오일쿨러 출구 온도의 전달함수는 일반적으로 시정수(time constant)가 매우 큰 특징을 갖는다. 따라서 오일쿨러 출구 온도의 과도 특성 개선을 위해서는 증발기로 유입되는 오일의 온도를 미리 검출하여 이를 PI 제어기의 출력 즉 조작량에 피드포워드로 반영하는 방법이 효과적이다.

Fig. 5는 Fig. 4에 피드포워드 제어 기능을 부가한 블록선도이다. 증발기의 입구로부터 출구까지의 오일 온도에 대한 전달함수 $G_o(s)$ 를 구한 후, $G_h(s)$ 의 역(inverse) 전달함수를 통해 제어기 $C(s)$ 의 출력 측에 피드포워드로 반영한다. 이렇게 하면, 순간적으로 가해지는 최대 외란 등으로 인해 증발기 입구 측 온도가 급상승할 경우, 이 영향을 미리 제어기의 출력에 반영시킴으로써 증발기 출구 측 온도만을 보고 피드백 제어하는 경우보다 제어 성능을 향상시킬 수 있다.

Fig. 5에서 오일 출구 온도 $T_o(s)$ 는 전향루프 출력 $T_1(s)$ 와 급격한 외란 $x_1(s)$ 의 영향인 $T_2(s)$ 의

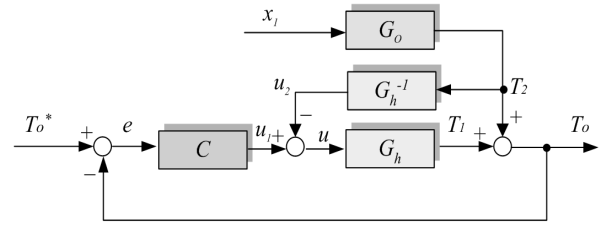


Fig. 5 Block diagram of feedforward control.

합으로 식(2)와 같이 주어진다.

$$T_o(s) = T_1(s) + T_2(s) \quad (2)$$

$T_1(s) = u(s)G_h(s)$, $T_2(s) = x_1(s)G_o(s)$ 이고, $u(s) = u_1(s) - u_2(s)$ 이므로 $u_1(s)$, $u_2(s)$ 를 구해 식(2)에 대입하면, Fig. 5의 출력 $T_o(s)$ 는 식(3)과 같이 구해진다.

$$T_o(s) = e(s)C(s)G_h(s) \quad (3)$$

Fig. 4의 출력 $T_o(s)$ 는 외란 $d(s)$ 를 고려하지 않을 경우, 식(3)과 같음을 알 수 있다. 이는 피드포워드 루프에 의해 급격한 외란의 영향이 상쇄될 수 있음을 보여준다. 피드포워드 루프가 없을 경우, 외란 $x_1(s)$ 의 영향으로 인한 출력 $T_o(s)$ 는 식(4)와 같이 되어 외란이 출력에 악영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

$$T_o(s) = e(s)C(s)G_h(s) + x_1(s)G_o(s) \quad (4)$$

3. 실험 방법

Fig. 6은 실험장치의 구성도를, 그리고 Fig. 7은 실제 실험장치의 모습을 각각 나타낸다. 본 실험은 정밀한 제어 성능 및 결과의 재현성 확보를 위하여 항온항습실에서 실시하였다.

Table 2는 실험 장치의 각 요소의 구체적인 사양을, Table 3은 실험 조건을 각각 나타낸다.

제어대상인 오일쿨러는 증발기, 압축기, 응축기와 2개의 EEV로 구성되어 있다. 2개의 EEV 가운데 하나는 HBV로 사용되고, 다른 하나는 팽창밸브로써 항상 일정한 개도를 유지한다.

제어장치는 랩뷰 시스템과 스텝모터 드라이브로 구성된다. 랩뷰 시스템은 온도 센서인 PT-100으로

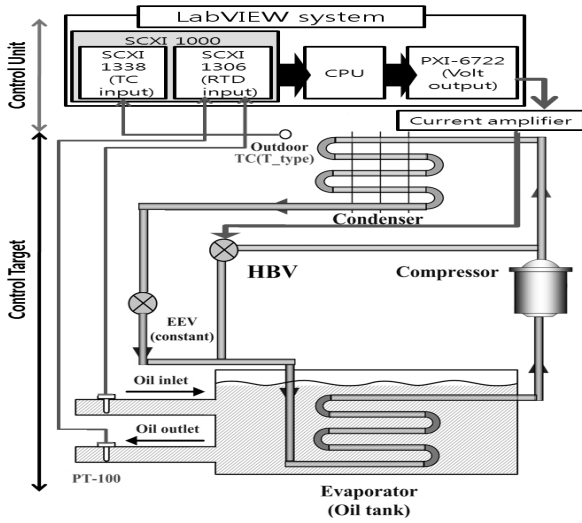


Fig. 6 Control system of an oil cooler.

Table 2 Specifications of the test unit

Category	Note
Compressor	Rotary type, 1 [HP]
Condenser	Air-cooled fin and tube type
Evaporator	Plate heat type exchanger
Refrigerant	R-22

Table 3 Experimental conditions

Item	Note
Oil flow rate	0.228 [Kg/sec]
Ambient air temperature	35 [°C]
Control period	1 [sec]
Target temperature	25 [°C]

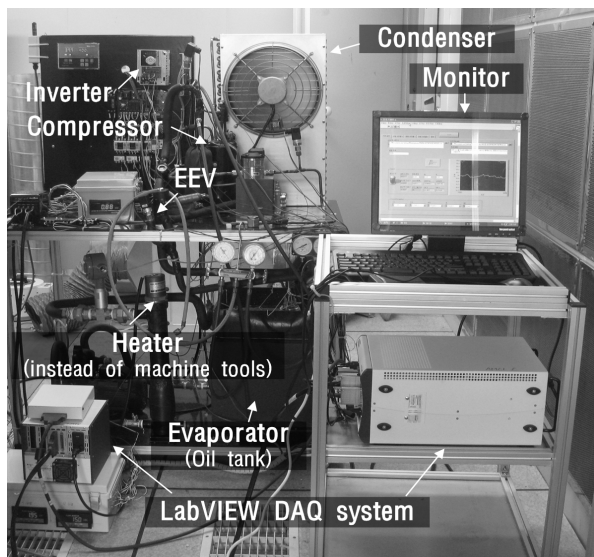


Fig. 7 Experimental equipment.

부터 온도 정보를 받고, 피드백 및 피드포워드 제어에 따른 조작량을 계산하며, 계산 결과에 따라 필요한 펄스 스텝 수를 출력한다. 오일쿨러의 운전 상황 파악을 위해 주요 부분의 온도는 T-type 열전대(thermocouple)를 이용하여 측정하였다. 온도, 전력, 밸브 개도, 오일 유량 등의 각종 정보는 랩뷰 DAQ 시스템을 통하여 PC로 전송, 메모리에 저장된다. 공작기계의 열 부하를 대신하기 위해 전기 히터를 실험 시스템에 부가적으로 설치하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 8은 제어대상의 전달함수를 구하기 위한 정특성 실험 결과의 한 예이다. 실험에서는 HBV의 스텝 개도 변화에 따른 오일쿨러 출구 온도까지의 전달함수를 구하였으며, 이 때 압축기의 회전수는 90 Hz로 일정하게 설정하였다. 이 응답을 이용하여 구한 전달함수는 식(5)와 같고, 전형적인 1차 지연요소 형태로 나타났다.

$$G_h(s) = \frac{0.017}{48.3s + 1} \quad (5)$$

Fig. 8에서 계단 모양의 점선은 HBV의 계단함수 입력이고, 실선은 실제의 온도 응답이다. 1차 지연 형태의 점선은 식(5)의 전달함수로부터 계산한 온도 응답을 나타내고 있다. HBV의 개도량을 0 스텝부터 50 스텝씩 증가시키기에 따라 오일의 출구 온도는 1차 지연 형태로 변함을 알 수 있으며 그 값은 전체 단계에 걸쳐 규칙적으로 나타났다.

Fig. 9는 본 논문에서 사용한 핫가스 바이패스 밸브의 스텝 변화에 따른 COP 변화량을 나타낸다. 이로부터 핫가스 바이패스 방법으로는 에너지 절감의 거의 불가능함을 알 수 있다.

PI계인 설계법으로 여러 방법이 존재하지만, 설계 단계에서 시스템의 동작 한계, 제어 주기, 외란 요소 등을 고려하여 그 값을 정하기는 쉽지 않다. 이 요소들을 고려한 계인 결정을 위해 Fig. 10과 같은 순서도에 따라 시뮬레이션을 하였다. 계인 결정 시 평가함수로는 식(6)과 같은 오차 절대값의 누적 값인 IAE(Integral of the Absolute Magnitude of the Error)를 최소로 하는 값으로 정하였다.

$$IAE = \int |e| dt \quad (6)$$

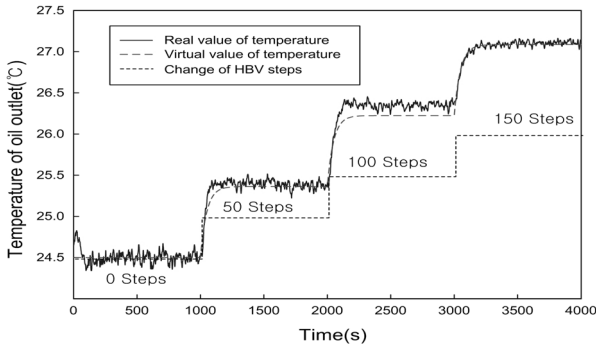


Fig. 8 Temperature responses of oil outlet versus HBV stepwise input.

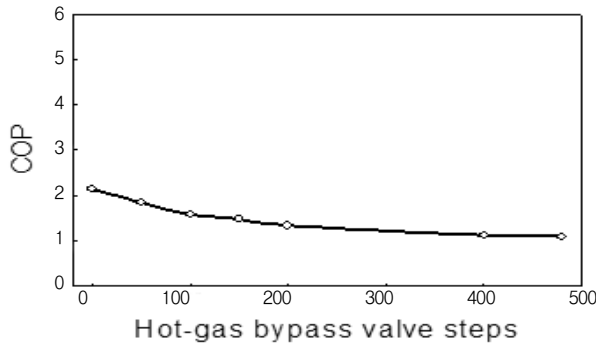


Fig. 9 COP variation according to the change of hot-gas bypass valve step.

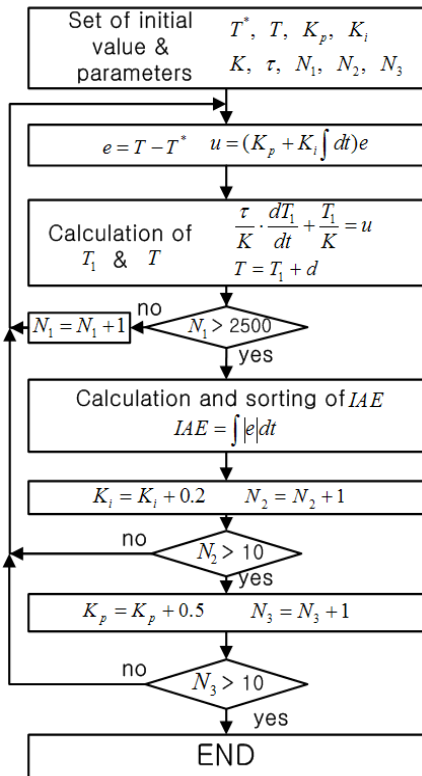


Fig. 10 Simulation flow chart.

우선 Fig. 4의 제어기 $C(s)$ 가 식(1)의 제어 로직을 갖는 것으로 가정하여 K_p 와 K_i 의 초기값을 설정한다. 오일의 출구 온도와 설정 온도의 차 $e(s)$ 와 K_p, K_i 의 초기값에 따른 조작량 $u(s)$ 를 계산하고, 이를 통해 초기 $T_1(s)$ 를 구한다. 여기에 외란 $d(s)$ 를 인가하면 초기 출력 값 $T(s)$ 가 구해진다. K_p 와 K_i 를 단계적으로 증가시키는 과정을 반복적으로 시행하면서 $e(s)$ 의 누적값을 구한다. 이때 1초 주기로 시스템을 제어하여 IAE 값이 가장 작으면서 시스템의 동작 한계에 맞는 K_p 와 K_i 의 조합을 최적계인으로 설정한다. 이 때, 인가된 외란은 Fig. 11과 같다.

시뮬레이션의 결과로부터 K_p 값이 60보다 큰 경우가 제어 성능 면에서는 더 우수하였으나, 이 값은 1초에 200 step 이상의 급격한 제어 동작을 수반하게 되므로 HBV의 안전과 수명을 고려하여 그 값을 60으로 설정하였다. K_i 값의 경우, 0.4일 때 IAE가 가장 작았으므로 이 값을 적분 계인으로 정하였다.

Fig. 12는 부하 2 kW를 인가한 상태에서 오일쿨러가 초기 기동하는 상황을 가정하여 위에서 설정한 PI 계인으로 제어한 결과의 한 예를 나타낸다. 실험에서 초기 환경 온도는 35°C, 목표 온도는 25°C로 각각 설정하였다.

그림에서 정상상태 오차는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 매우 우수한 응답을 보임을 알 수 있다. 과도 오차는 시스템의 기동 초기 온도가 목표 온도보다 매우 높았고, 오일쿨러가 갖는 냉동 능력의 한계로 인해 매우 크게 나타났다. 이는 기동시에나 볼 수 있는 특별한 경우의 응답으로서 정상상태의 제어 특성에만 주목하였다.

Fig. 13은 오일쿨러가 정상적으로 가동된 상태

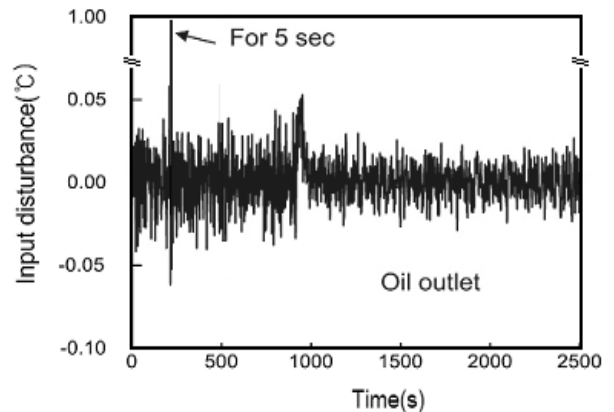


Fig. 11 Input disturbances for simulation.

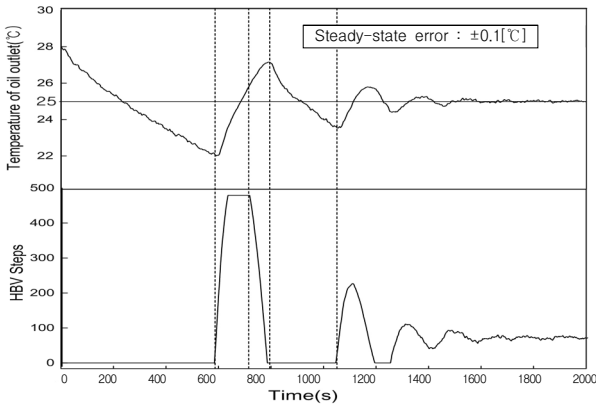


Fig. 12 Experimental results of control performance with PI.

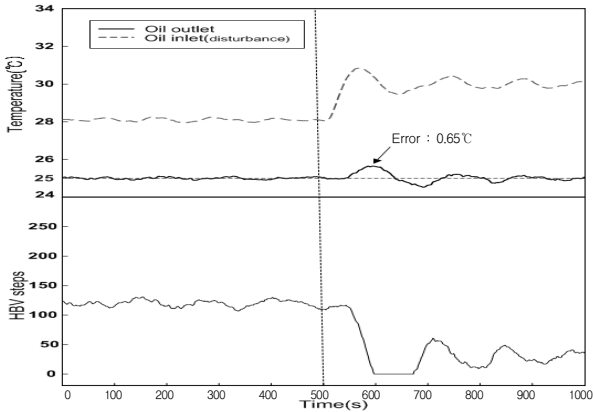


Fig. 13 PI control responses under abrupt disturbance addition.

에서 500초 부근에서 급격한 외란을 인가했을 경우의 제어 응답이다.

이 실험에서 오일쿨러 출구온도의 최대 과도 오차인 퍼센트 오버슈트(percentage overshoot)는 약 2.6%로 나타났다. 인가된 열 부하로 인해 600초 부근에서 HBV가 완전히 닫힌 상태로 제어됨을 알 수 있다. 외란 인가시의 과도 특성 향상을 위해 오일 입구 온도를 측정하여 이를 PI 제어기 출구의 조작량에 피드포워드로 반영하는 실험을 수행하였다.

이를 위해 우선 증발기의 입구로부터 출구까지의 오일 온도의 전달함수 $G_o(s)$ 를 이론적으로 구한 후, 이를 역 전달함수 $G_h^{-1}(s)$ 에 곱하여 Fig. 5와 같이 제어기 출구 측에 피드포워드로 반영한다. 이론적인 계산시에는 증발기를 통과하는 오일 유량은 일정하며, 오일쿨러 주위의 열손실과 펌프의 열이 오일에 미치는 영향은 무시하고, 증발기 내부의 온도와 오일의 출구 온도는 동일한 것으로 가정하였다.

증발기의 유·출입 열량의 차는 증발기 내부의 열 변화량과 같으므로 이를 수식으로 표현하면 식(7)과 같고, 이를 열량으로 환산하여 나타내면 식(8)과 같다.

$$dE_i - dE_o = dE \quad (7)$$

$$c\dot{m}x_1 - c\dot{m}T_2 = cM\frac{dT}{dt} \quad (8)$$

여기서 x_1 과 T_2 는 증발기 입력과 오일쿨러 출구 측 온도를 각각 나타낸다. 가정에 의해 증발기 내부의 온도와 오일 출구 온도는 같으므로 식(9)와 같이 유도되며, 이를 라플라스 변환하면 식(10)과 같다.

$$c\dot{m}x_1 - c\dot{m}T_2 = cM\frac{dT_2}{dt} \quad (9)$$

$$c\dot{m}x_1(s) - c\dot{m}T_2(s) = cMsT_2(s) \quad (10)$$

식(10)으로부터 증발기 입·출력 오일의 전달함수는 식(11)과 같이 표현된다.

$$G_o(s) = \frac{T_2(s)}{x_1(s)} = \frac{1}{Ms/\dot{m} + 1} \quad (11)$$

실제 시스템에서 $M = 24.85\text{kg}$, 오일의 질량유량 $\dot{m} = 0.228\text{kg/sec}$ 이므로 오일의 전달함수는 식(12)와 같이 최종적으로 얻어진다.

$$G_o(s) = \frac{1}{109s + 1} \quad (12)$$

식(12)를 이용하여 피드포워드로 반영하면 급격한 외란의 영향을 원천적으로 상쇄 가능하다. 하지만, 실제 시스템에서는 역 전달함수를 적용하는 것이 쉽지 않기 때문에 제어의 용이성을 위해 식(12)를 식(13)과 같이 근사하여 피드포워드 제어의 효과를 검증해 보기로 한다.

$$\tilde{G}_o(s) = \frac{1}{48.3s + 1} \quad (13)$$

근사화된 식(13)을 이용하면, 입구 온도가 x_1 일 때 제어기 $C(s)$ 의 출력 측에 피드포워드로 반영되는 조작량 $u_2(s)$ 는 식(14)와 같이 구해진다.

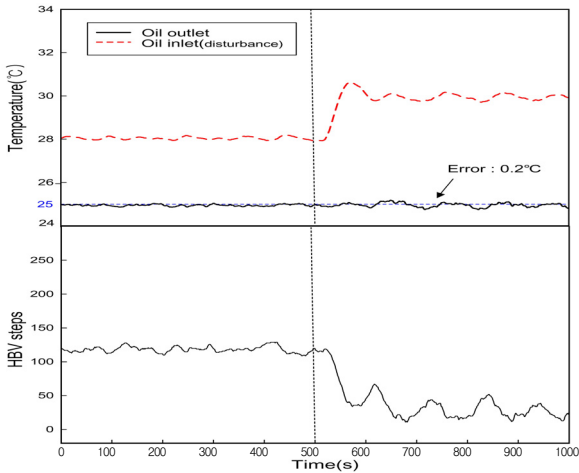


Fig. 14 PI and feedforward(25%) control responses under abrupt disturbance addition.

$$u_2(s) = \tilde{G}_o(s) G_{fi}^{-1}(s) x_1(s) = 58.8x_1(s) \quad (14)$$

피드포워드 제어량을 25%로 반영하여 실험한 제어 결과의 한 예를 Fig. 14에 보인다. Fig. 13으로부터, 급격한 외란 인가 시에도 과도 특성의 지표인 최대 퍼센트 오버슈트가 0.8% 이내로 매우 정밀하게 제어됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 핫가스 바이패스 방식 오일쿨러의 정밀 온도 제어를 위해 PI 제어를 설계하였다. 실험을 통하여 실용적인 전달함수를 구한 후, 랩뷰를 이용한 시뮬레이션으로 IAE를 최소로 하는 PI 게인을 쉽게 결정할 수 있음을 보였다. 또한 최대 외란이 주기적으로 급격하게 인가되는 제어대상의 특성을 고려한 과도 특성 개선을 위해, 증발기 오일의 입구 온도를 측정하여 제어기의 조작량에 피드포워드로 반영하는 피드포워드 제어 기능을 추가하였다. 이러한 제어 결과, 열 부하의 급격한 변동 하에서도 오일쿨러의 출구 온도를 정상상태 오차 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내, 최대 퍼센트 오버슈트를 0.8% 이내로 매우 정밀하게 제어할 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Lee, S. W., Yeom, H. K. and Park, K. J., 2009, Performance of Hot Gas Bypass Type Oil Cooler System, Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 73-80(in Korean).
2. Beak, S. M., Choi, J. H., Byun, J. Y., Moon, C. G., Lee, H. S., Jeong, S. K., and Yoon, J. I., 2009, Characteristics of Temperature Control by Hot-gas Bypass Flow Rate on Industrial Water Cooler, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 8, pp. 1129-1136(in Korean).
3. Lee, S. W. and Yeom, H. K., 2008, Performance of Thermal Error Controller to Minimize Thermal Deformation of Machine Tools, Journal of Korean Society for Precision Engineering, pp. 376-380(in Korean).
4. Li, H., You, S. S., Yoon, J. I., and Jeong, S. K., 2008, An Empirical Model for Independent Control of Variable Speed Refrigeration System, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1918-1924.
5. Li, H., You, S. S. and Jeong, S. K., 2008, Feedforward Control of Capacity and Superheat for a Variable Speed Refrigeration System, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 1067-1074.
6. Beak, S. M., Moon, C. G., Kim, H. W., Jeong, S. K., and Yoon, J. I., 2010, Characteristics of Capacity Control of Variable Speed Water Cooler with the Electronic Expansion Valve Open/Close Degree, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 282-288(in Korean).
7. Jung, Y. M., Byun, J. Y., Yoon, J. I., and Jeong, S. K., 2009, A Study on High Precision Temperature Control of an Oil Cooler for Machine Tools Using Hot-gas Bypass Method, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 7, pp. 1003-1011(in Korean).
8. Yeom, H. K. and Lee, S. W., 2008, Performance Test of Gasby-pass Type Thermal Error Controller, ICCAS.

9. Ahn, J. H., Joo, Y. J., Cho, I. Y., Kang, H., Kim, Y. C., and Choi, J. M., 2009, An Experimental Study on the Performance Characteristics of a Heat Pump System in the Heating Operation Mode with the Hot Gas Bypass, SAREK, pp. 539-543.
10. Yaqub, M., Zubair, S. M. and 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.
11. Yaqub, M., Zubair, S. M. and Khan, S. H., 1995, Second-law-based Thermodynamic Analysis of Hot-gas Bypass, Capacity-control Schemes for Refrigeration and Air-conditioning Systems, Energy, Vol. 20, No. 6, pp. 483-493.