

오일쿨러시스템의 특성근과 영점 조절에 의한 고성능 PI 제어기 설계 PI Controller Design Based on Characteristic Parameters and Zero Position Adjustment for an Oil Cooler System

최도경* · 정석권**

Do-Kyung Choi* and Seok-Kwon Jeong**

(Received 8 July 2016, Revision received 8 August 2016, Accepted 9 August 2016)

Abstract: This study proposes a high-performance PI controller design method for an oil cooler system in conjunction with zero position adjustment and the characteristic parameters in its closed loop control system. The characteristic parameters included PI gains are decided by design specifications such as settling time and overshoot. The fine tuning on decided gains was performed by adjustment the zero position to get more desirable control performances. The simulations and experimental results show that the proposed PI controller design for an oil cooler system was possible to accomplish good control performances and to satisfy the design specifications.

Key Words : Oil Cooler System, Characteristic Parameter, PI Controller, Zero Position Adjustment

1. 서 론

공작기계용 오일쿨러 온도제어시스템은 압축기 회전수를 가변시켜 오일출구온도를 일정하게 유지하는 가변속 압축기 방식이 에너지 절약 면에서 더욱 효과적이다. 이 시스템의 정밀 온도제어 및 고효율 제어를 위한 다양한 PID 제어기 설계 방법들이 제안되어 왔다.¹⁻⁵⁾ 그러나 대부분의 연구가 반복 시행을 통한 게인 설계 및 우수한 제어 성능 확보에 초점을 맞춘 이상적인 게인 설계법 일 뿐 체계적이고 확정적인 게인 결정과 실제 시스템 적용시의 성능 최적화를 고려한 게인의 미세 조정 방안에 대한 검토는 불충분하다.^{4,5)} 따라서 본 연구에서는 확정적 게인 결정 과정과 더불어

어 제어계의 특성근과 영점의 위치 조절을 통해 원하는 설계사양을 만족시킬 수 있도록 제어기의 게인을 미세 조정하는 방안에 대해 상세히 검토한다. 이 방법은 오일쿨러시스템이 1차계, PI제어기를 포함한 전체 폐루프 제어시스템이 영점을 갖는 2차계로 모델링되어 시스템의 동특성이 사실상 2차계의 특성 파라미터에 의해 지배되는 원리를 이용한다. 영점의 위치는 시스템의 과도응답에 영향을 미치므로 그 위치를 미세 조절함으로써 시스템의 과도응답 특성을 개선할 수 있음을 보인다.

우선, 오일쿨러시스템이 섭동법을 통해 1차계로 모델링 되고, PI 로직으로 제어되며, 설계사양이 정착시간(t_s) 및 퍼센트오버슈트(M_p)로 주어지

* 정석권(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6181

*최도경 : 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

** Seok-Kwon Jeong(corresponding author) : Department of

Refrigeration and Air Conditioning Engineering, PKNU.

E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6181

*Do-Kyung Choi : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Graduate School, PKNU.

는 경우를 가정, 2차계의 표준형에 근거한 특성값을 유도하고 이로부터 확정적인 방법으로 PI 게인 값을 구한다. 다음, 실제 시스템은 영점을 가지므로 이 영점의 미세 조절을 통해 PI 제어기의 게인을 최종적으로 결정한다. 마지막으로, 제안된 방법은 컴퓨터 시뮬레이션과 GA(Genetic Algorithm)로부터 얻은 게인과의 비교 실험을 통해 그 유효성이 입증된다.

2. 특성근과 영점을 고려한 PI제어기

오일쿨러시스템의 전달함수는 식 (1), PI 제어기를 포함한 오일쿨러 온도제어 폐루프시스템은 영점을 갖는 2차계로 식 (2), 특성 파라미터는 비례게인 K_p 와 적분게인 K_i 를 포함한 식 (3)으로 각각 유도된다.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

$$T(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{KK_p + 1}{2\sqrt{\tau KK_i}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{KK_i}{\tau}} \quad (3)$$

여기서 τ 와 K 는 시정수와 DC게인, ζ 와 ω_n 은 감쇄비 및 고유진동수이다. 식 (3)의 좌변 특성값들은 식 (4), 식 (5)와 같이 표현되는 설계사양 M_p 와 t_s 에 그 값을 대입하면 구해지므로 이로부터 식 (3)에 포함된 미지수인 PI 게인이 확정적으로 구해진다.

$$M_p \cong 100e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (4)$$

$$t_s \cong \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (0 < \zeta < 1) [2\%] \quad (5)$$

식(3)으로부터 구한 PI 게인은 식(2)의 폐루프시스템을 2차계 표준형으로 간주하여 구한 값이다. 실제로 식(2)는 영점을 갖는 2차계이므로 양호한 제어성능 확보를 위해 영점 위치를 미세 조절하

여 PI제어기 게인을 최종적으로 결정할 필요가 있다.

영점은 식 (2)에서 $s = -K_i/K_p$ 이므로 위에서 구한 PI 제어기의 게인 조절을 통해 영점의 크기를 감소시키는 방향으로 미세 조절한다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 영점의 위치를 조정하기 위해 비례게인 K_p 를 증가시키게 되면 정착시간이 감소하고 오버슈트가 감소하여 제어 성능이 향상되지만, 적분게인 K_i 를 감소시키게 되면 오버슈트는 감소하지만 정착시간이 증가하게 되어 만족할만한 제어 성능을 달성하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 비례게인 K_p 를 제약 조건 한계값까지 증가시켜 영점의 위치가 주극점을 반지름으로 하는 원 궤적 근처에 위치하게 설계한다. 이 때 주극점의 반지름 크기가 ω_n 이므로 비례게인은 $K_p \cong K_i/\omega_n$ 가 되고, 오일출구온도 제어를 위한 압축기 제어용 K_p 의 경우는 인버터의 실제 시스템 적용시의 한계값을 고려해 설계한다. 과열도 제어를 위한 EEV 제어의 경우에는 오일출구온도 제어용 압축기와 동일한 방법으로 설계하되 영점 위치를 주극점을 반지름으로 하는 원 위에 오도록 비례게인을 $K_p = K_i/\omega_n$ 가 되도록 설계한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

압축기 회전수 제어를 위한 전달함수 모델은 열평형 상태에서 압축기 회전수 f_i 와 EEV 개도 스텝 V_o 변화량에 따른 오일출구온도 T_o 와 과열도 T_s 의 응답 변화량으로 식 (6), 식 (7)과 같이 1차계로 각각 구해졌다. 음의 DC게인은 회전수와 개도 증가시 오일출구온도와 과열도가 감소함을 의미한다.

$$G_c(s) = \frac{\Delta T_o}{\Delta f_i} = \frac{-0.035}{58s + 1} \quad (6)$$

$$G_c(s) = \frac{\Delta T_s}{\Delta V_o} = \frac{-0.06}{27s + 1} \quad (7)$$

주어진 설계사양을 $t_s \leq 4\tau$ 초, $M_p \leq 10\%$ 로 하여 시스템의 특성값인 ζ, ω_n 을 식 (4)와 식 (5)로부

터 구한 후, 이 값들을 식 (3)에 대입, PI 계인을 구했다. 이러한 설계 프로세스는 2차계의 표준형에 근거한 설계이므로 실제 시스템인 식 (2)의 영점의 영향을 고려하여 제어계가 원하는 동특성이 얻어지도록 영점의 위치를 미세 조절하여 PI 계인 값을 최종적으로 결정하였다. 그리고 GA⁴⁾방법은 대표적인 최적화 기법의 평가함수인 ITAE와 IAE를 이용하여 주어진 설계사양을 만족하도록 최적 계인을 구하였다.

Table 1은 제안된 방법과 GA 방법으로 설계된 압축기와 EEV 제어용 PI 계인을 나타낸다. Case 1은 영점 위치에 대한 미세 조정 전의 계인, Case 2는 영점 조정 후의 계인, 그리고 GA의 두 가지 경우로 설계한 계인을 각각 나타낸다. 그리고 Table 2는 Table 1의 계인들을 컴퓨터 시뮬레이션에 적용하여 얻은 제어 성능을 상세히 분석한 표이다.

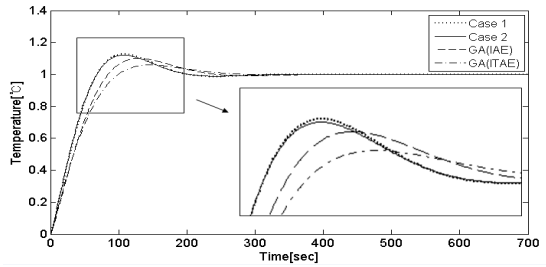
Table 1 PI gains designed by the proposed method and GA

Method	Compressor		EEV	
	K_p	K_i	K_p	K_i
Case 1	28.6	1.41	16.6	1.71
Case 2	30	1.41	28.22	1.71
GA(IAE)	24.2	1.06	20	1.75
GA(ITAE)	27.5	0.91	28.45	1.24

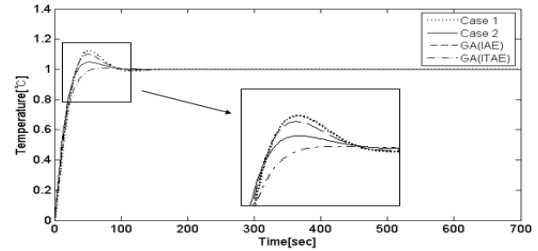
Table 2 Control performances from simulation

Component	Method	M_p [%]	t_s [sec]
Compressor	Case 1	12.83	182.14
	Case 2	12.11	181.43
	GA(IAE)	10.0	212.7
	GA(ITAE)	5.93	225.3
EEV	Case 1	12.2	86.9
	Case 2	4.74	80.6
	GA(IAE)	10.0	85.1
	GA(ITAE)	0.9	47.1

Fig. 1은 Table 1의 계인을 적용하여 구한 오일 출구온도와 과열도의 인디셜응답이다. Case 1은 특성파라미터에 의해 구한 PI 제어기 계인을 적용하였고¹⁾, Case 2는 Case 1에서 구한 계인에 대해 영점의 위치를 미세 조절한 경우의 응답이다.



(a) Oil outlet temperature



(b) Superheat

Fig. 1 Indicial responses by the gains of Table 1

Case 2는 Case 1에 대해 K_p 값을 조절하였는데 압축기의 경우에는 K_p 의 실 시스템 적용 한계 값인 30을 적용한 까닭에 큰 성능 차이를 보이지 않았지만 EEV의 경우에는 이러한 계인 조절을 통해 Case 2가 Case 1에 비해 주요 과도특성 지표인 정착시간과 오버슈트 값이 모두 감소하였다. 제어 성능은 GA의 두 경우가 Case 2와 비슷하지만 설계에 사용된 전달함수는 실제 시스템과는 다를 수 있으므로 이 점을 고려, 실제 적용시에는 제어기의 계인을 조절할 필요가 있다. GA의 경우는 계인의 미세 조절이 어렵지만, Case 2의 경우에는 영점 조절을 통해 원하는 동특성을 얻기 쉽다는 장점이 있다.

Fig. 2는 Case 2에 대한 영점과 극점의 위치를 나타내는 극영점도(pole-zero map)이다. 그림에서 보면 영점의 위치가 주 극점을 반지름으로 하는 원 궤적의 바깥쪽에 위치해 있다. 이 경우에는 제어기의 비례계인을 크게 할수록 영점의 크기가 감소, 시스템의 응답 특성이 개선되지만, 영점의 위치가 주 극점("x")을 반지름으로 하는 원 궤적 안쪽에 있을 경우에는 비례계인을 크게 할수록 출력 응답의 초과도 커지게 되므로 이를 동시에

고려해야 한다. 따라서 바람직한 영점("o")의 위치는 비례게인 K_p 의 한계값을 고려하여 원 궤적 근처에 위치하도록 설계한다.

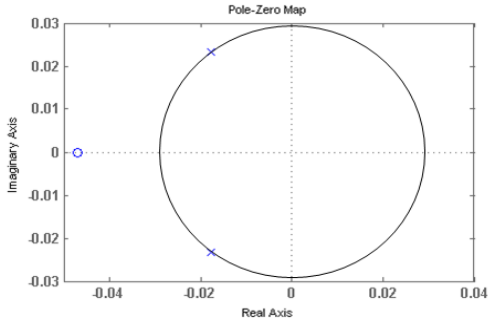


Fig. 2 Pole-zero map for zero adjustment

4. 실험 장치 및 실험 결과

4.1 실험장치

Fig. 3은 오일쿨러 온도제어시스템의 개략도이다. 제어장치로는 Labview DAQ system, 압축기용 회전자 가변을 위해 “V/f=일정”제어 타입의 인버터, EEV 개도 조작기로는 스텝모터 드라이브를 각각 사용하였다. 공작기계를 대신한 열부하로는 전기히터(1.5 kW)를 사용하였으며, 온도센서는 열전대(thermocouple)와 측온저항체 PT-100을 함께 사용하였다.

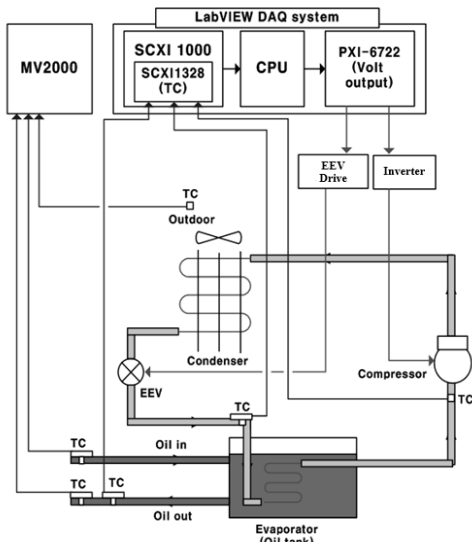


Fig. 3 Oil cooler control system for experiments

Table 3은 실험장치의 주요 사양을, Table 4는 실험 조건을 각각 나타낸다. 오일출구온도는 공작기계의 특성을 고려해 25°C, 과열도는 정특성 실험으로 구한 Fig. 4를 바탕으로 최적의 COP 조건에서 액압축을 방지할 수 있는 11°C를 목표값으로 설정하였다. 따라서 설계된 온도제어시스템은 항상 최적의 COP를 갖는 운전점에서 동작하게 된다.

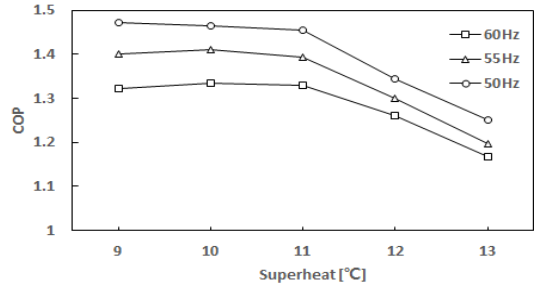


Fig. 4 Relationship between COP and superheat

Table 3 Specifications of the test unit

Component	Note
Compressor	Rotary type, 3[HP]
Condenser	Air-cooled fin and tube type
Evaporator	Bare tube type
Refrigerant	R-22

Table 4 Experimental conditions

Item	Note
Oil flow rate	22.5 [ℓ / min]
Ambient air temperature	27[°C]
Sampling time	1[sec]
Target temperature	25[°C]

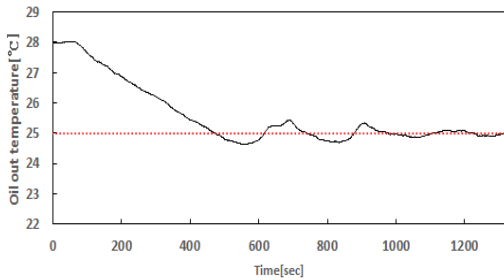
4.2 실험결과

본 연구에서 제안한 방법으로 구한 PI 게인의 제어 성능을 평가하기 위해 오일쿨러를 대상으로 기동실험, 부하변경실험을 실시하였다. 기동실험은 0.79 kW의 열부하를 인가한 상태에서 오일출구온도 초기값이 28°C일 때 제어를 시작하여 목표값 25°C로 수렴하기까지의 오일출구온도와 과열도 응답을 각각 구하였다. 부하변경실험은 열부하 0.79 kW, 목표값 25°C인 정상상태에서 열부하

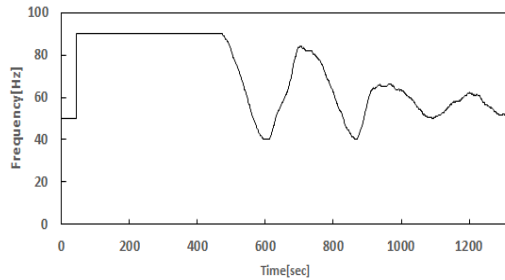
를 0.79 kW에서 0.84 kW로 스텝상으로 변경시켰을 때의 제어량의 응답을 구하였다.

Fig. 5는 적분포화로 인한 제어성능의 열화를 막기 위해 안티 와인드업(Anti-windup) 제어를 설계하지 않았을 경우의 기동실험시 오일출구온도 응답 및 주파수 조작량 변화를 나타낸다. 설정값 부근에서 적분 포화로 인한 하향 초과가 발생하고 있음을 볼 수 있다. 그림에서 가로 점선은 목표값을 나타낸다.

Fig. 6은 안티 와인드업 제어를 추가하였을 경우의 기동실험 결과로 제어량인 T_o 와 T_s 및 대응하는 조작량들을 각각 나타낸다. Fig. 5와 같은 하향 초과 발생 없이 설정값에 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 안티 와인드업의 계인은 $3/K_p$ 으로 설계하였다. Fig. 5와 Fig. 6의 적분 포화시간을 비교해 보면 후자가 전자의 1/2에 해당함을 확인할 수 있다.

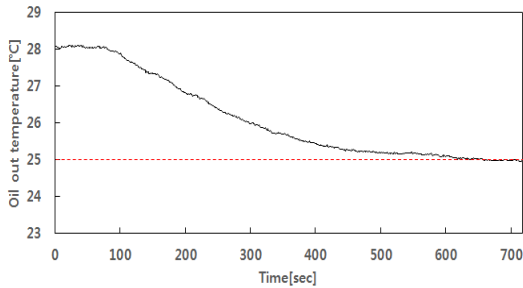


(a) Oil outlet temperature response

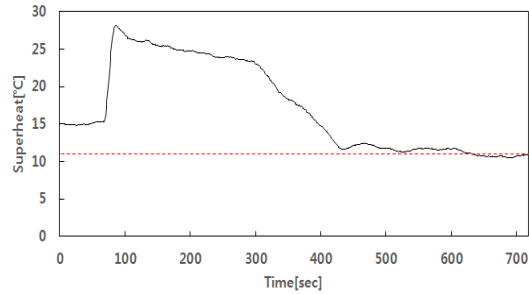


(b) Reference frequency

Fig. 5 Experimental result of starting without anti-windup



(a) Oil outlet temperature and manipulated variable



(b) Superheat and manipulated variable

Fig. 6 Experimental results of starting considering anti-windup

오일쿨러시스템의 특성근과 영점 조절에 의한 고성능 PI 제어기 설계

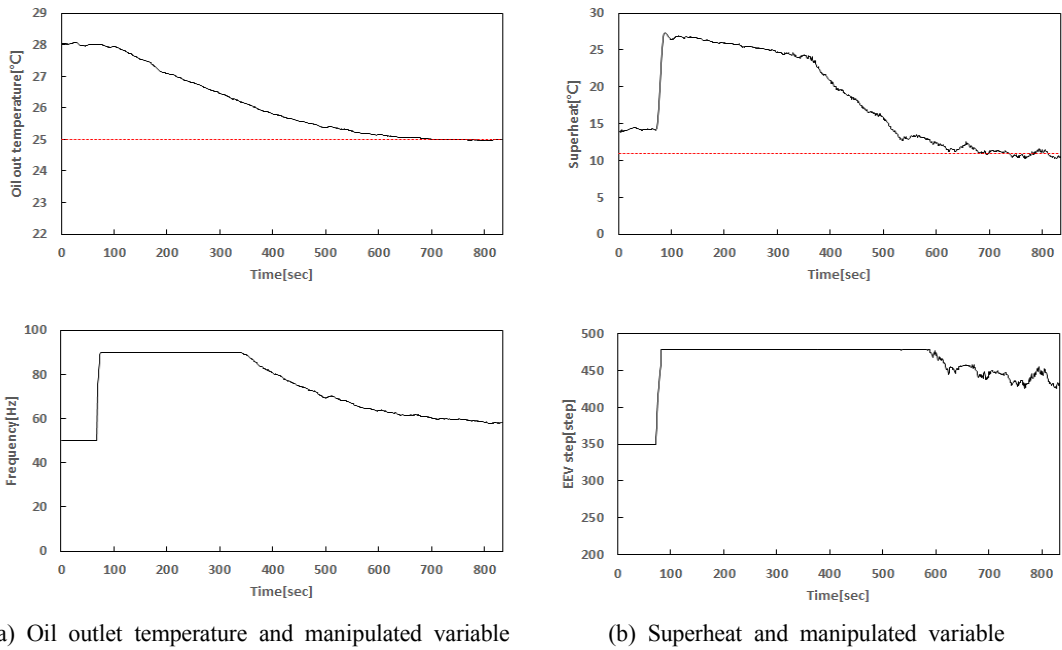


Fig. 7 Experimental results of starting using GA gains based on IAE

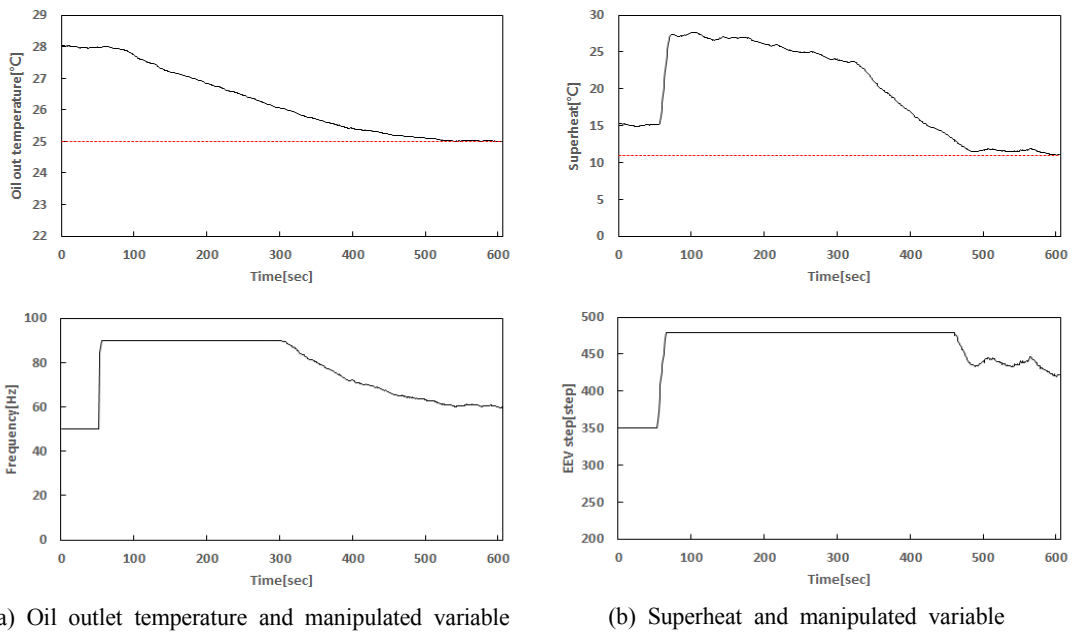


Fig. 8 Experimental results of starting using GA gains based on ITAE

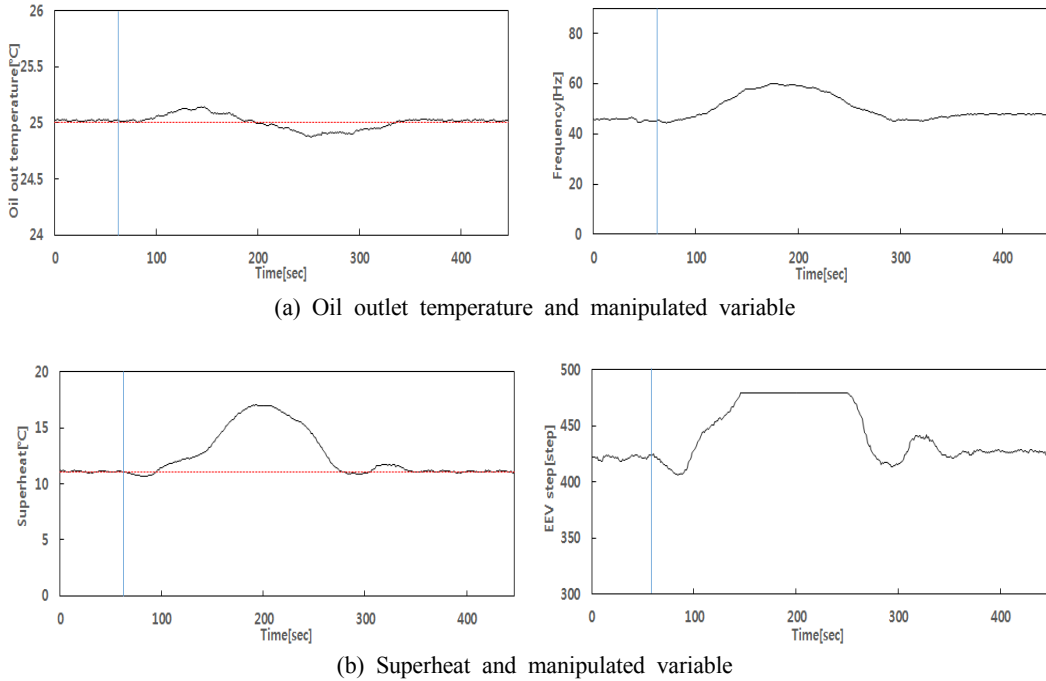


Fig. 9 Experimental results under stepwise thermal load variation

Fig. 7은 GA의 IAE 평가함수 기준, Fig. 8은 ITAE 평가함수를 각각 적용하여 설계한 PI 게인으로 기동실험을 한 결과를 나타낸다. 이 경우에도 안티 와인드업 제어를 추가하였다. 두 경우 모두 유사한 응답 특성을 보였고, ITAE에 의한 과도응답 특성이 IAE에 의한 응답보다 다소 양호하게 나타났으며 이는 Fig. 1의 시뮬레이션 결과와도 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 본 논문에서 제안한 방법인 Case 2의 게인을 적용하여 부하변경실험을 한 결과를 나타낸다. 세로 실선은 부하변경 시점을 나타낸다. Fig. 9의 결과로부터 부하가 극단적으로 스텝상으로 변동하는 조건 하에서도 제어량인 출구온도와 과열도 모두 목표값으로 수렴하여 양호하게 제어가 됨을 확인하였다. 이 경우에 정상상태오차는 오일출구온도의 경우 $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$, 과열도의 경우 $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 이내로 나타났다.

Table 5는 본 연구에서 제안한 방법과 GA로 설계한 경우의 PI 게인으로 수행한 실험을 토대로 제어성능을 분석한 결과를 나타낸다.

Table 5 Control performances of experimental results

Component	Method	t_s [sec]	e_{ss} [$^{\circ}\text{C}$]
Compressor	Proposed method	546	± 0.07
	GA(IAE)	576	± 0.05
	GA(ITAE)	466	± 0.04
EEV	Proposed method	542	± 0.8
	GA(IAE)	459	± 0.9
	GA(ITAE)	423	± 0.8

표에서 기호 e_{ss} 는 정상상태오차를 나타낸다. Table 5를 보면 본 연구에서 제안한 방법이 제어 성능 면에서 광대역 탐색 기법인 GA를 적용한 결과와 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법은 오일쿨러와 같이 부동작시간이 무시 가능할 정도로 짧아 1차계로 모델링 되고, 시정수가 커 PI 제어기만으로 제어를 할 경우, 확정적이고 체계적인 방법으로 양호한 제어성능을 달성할 수 있는 제어기 설계법임이 확인 되었다. 특히 실제 적용 단계에서

원하는 제어성능이 얻어지지 않을 경우, 극·영점도를 통해 계인의 합리적 미세 조정이 가능함도 본 논문에서 제안한 설계법의 장점이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 오일쿨러시스템의 PI 제어기 설계시 특성근과 영점 조절을 통해 PI 제어기의 게인값을 조정하여 제어 성능을 향상시키는 방법을 검토하였다. 주어진 설계사양으로부터 특성 파라미터 값을 구하고 그에 따른 PI 제어기 게인값을 확정적으로 구하였다. 그리고 영점에 대한 미세 조정을 통해 제어 성능을 향상시켰다. 오일쿨러시스템의 전달함수 모델을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어 성능의 변화를 검토하고 우수한 제어성능을 갖는 GA방법을 적용한 계인과의 비교실험을 통해 제안 방식의 유효성을 입증하였다. 본 논문에서 제안한 PI 제어기 설계법은 체계적이고 쉬운 프로세스로 설계가 용이하다. 또한 실제 시스템 적용시 계인의 미세 조정으로 소정의 제어 성능을 확보할 수 있으므로 향후 현장의 엔지니어에게 오일쿨러 고정밀 온도제어시스템의 유용한 설계법이 될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Y. M. Jung, S. K. Jeong and J. H. Yang, 2013, "PI Controller Design of the Refrigeration System Based on Dynamic Characteristic of the Second Order Model", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 200-206.
2. Y. M. Jung, J. Y. Byun, J. I. Yoon and S. K. Jeong, 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.
3. M. F. Golnaraghi and B. C. Benjamin, 2009, "Automatic Control System", John Wiley & Sons, 9th Edition.
4. Y. M. Jung and S. K. Jeong, 2014, "Optimum PI Controller Design for an Oil Cooler System Using GA", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No.5, pp. 28-34.
5. S. K. Jeong and K. H. Hong, 2013, "Optimal PI Controller Design for Refrigeration System Considering Disturbance", SAREK, Vol. 25, No. 2, pp. 085-093.
6. H. Li, S. S. You, S. K. Jeong, 2009, "Feedforward Control of Capacity and Superheat for a Variable Speed Refrigeration System", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 1067-1074.
7. S. K. Jeong and S. H. Kim, 2011, "Optimum Controller Design of a Water Cooler for Machine Tools Based on the State Space Model", SAREK, Vol. 23, No. 12, pp. 782-790.
8. Jeong, S. K., Lee. D. B., Yoon. J. I., 2012, "Comparison of System Performances of Hot-gas Bypass and Compressor Variable Speed Control of Water Coolers for Machine Tools", SAREK, Vol. 1, pp. 1-8.
9. S. R. Oh, 2009, "The Design of PI Controller Using a Saturation Function in Frequency Domain", Information and Control Symposium, pp. 326-328.
10. S. K. Jeong, J. Y. Byun, S. H. Kim, and J. I. Yoon, 2011, Precise Temperature Control of Oil Coolers with Hot-gas Bypass Manner for Machine Tools Based on PI and Feedforward Control, SAREK, Vol. 23, No. 2, pp. 111-119.