

GA를 이용한 오일쿨러시스템의 최적 PI제어기 설계 Optimum PI Controller Design for an Oil Cooler System Using GA

정영미** · 정석권*†

Young-Mi Jung** and Seok-Kwon Jeong*†

(접수일 : 2014년 6월 10일, 수정일 : 2014년 9월 10일, 채택확정 : 2014년 9월 11일)

Abstract: This paper deals with optimum PI controller design using genetic algorithm to improve control performance and robustness for an oil cooler system. The optimum PI gain was found to minimize an object function, integrated absolute error, and to satisfy control design specifications such as overshoot and settling time based on practical transfer function of the oil cooler system. The control performance and robustness were investigated by comparing indicial responses and Bode diagram analysis with respect to three kinds of PI gains obtained from different gain decision manners. Moreover, the robustness against to input disturbances, sinusoidal wave form and abrupt single pulse, was evaluated. The computer simulation results showed that the suggested optimum gain can establish desirable control performance and strong robustness with easy design process.

Key Words : Oil Cooler System, Optimum PI Controller, Genetic Algorithm, Control Performance and Robustness

1. 서 론

최근 기계장치의 고성능, 고효율화 추세에 따라 오일쿨러의 압축기 가변속 제어 방식이 주목받고 있다.¹⁻³⁾ 이 방식은 오일출구온도와 과열도를 제어하기 위해 압축기의 회전수와 전자팽창밸브(EEV)의 개도를 동시에 제어한다. 제어기로는 현대제어 이론에 근거한 LQR, LQG 등의 고급 제어 적용도 검토되고는 있으나 실제 산업 현장에서는 설계 및 실현의 간편성과 제어의 효용성 측면에서 PID제어기가 널리 사용되고 있다.⁴⁻⁶⁾

PID제어기의 개인 결정법으로는 Maltab(이하 매트랩)의 PID튜너에 의한 시행착오법,³⁾ IAE와 같

은 평가함수를 이용한 최적화 방법,⁷⁾ 포화함수를 이용한 주파수 영역 결정법,⁸⁾ 유전자 알고리즘을 이용한 방법⁹⁾ 등 다양한 방법이 있다. 이들 가운데 매트랩 튜너는 설계의 용이성, IAE 최적화 방법은 개인의 최적성으로 인해 현장의 엔지니어에게 매우 유용하다. 그러나 매트랩 이용법은 개인의 최적성을 보장할 수 없을 뿐만 아니라 설계 단계에서 예상되는 특정 외란의 제거 성능을 검증하기도 용이하지 않다. IAE 이용법은 전달함수를 바탕으로 조작량을 구하고, 오차를 계산하는 프로그램을 엔지니어가 직접 작성해야 하는 번거로움과 최적해의 검색 영역이 제한될 수 있는 문제점이 존재한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 유전자 알고리즘(이하 GA)을 이용한 최적화 기법

*† 정석권(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과

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

**정영미 : 부경대학교 냉동공조공학과

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

Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University. E-mail : skjeong@pknu.ac.kr Tel : 051-629-6181

**Young-Mi Jung : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

이 시도되고 있다. GA는 고차의 전달함수에도 대응이 가능하며 프로그램 작성의 번거로움을 피하고 내부에 다양한 평가함수를 설정하는 기능을 가지며, 광대한 탐색 영역으로부터 최적해를 도출할 수 있다는 장점을 가진다. GA를 이용한 기존의 선행 연구들은 대다수가 GA를 응용한 알고리즘 개발 또는 최적 PID튜닝법에 관한 연구들이 대부분이다.⁹⁻¹¹⁾ 비선형성이 강하고 모델의 불확실성이 큰 오일쿨러 시스템을 대상으로 하여 GA를 이용한 최적 계인의 탐색 및 제어계의 강인성을 구체적으로 검토한 연구 사례는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 우선 실험을 통해 얻어진 오일쿨러 시스템의 실용적인 전달함수를 바탕으로 GA를 적용하여 GA에 내장된 목적함수를 최소화하고 설계사양인 오버슈트와 정착시간을 동시에 만족하는 최적 PI제어기 계인 값을 구한다. GA 계인의 최적성을 확인하기 위해 매트랩 PID튜너 및 평가함수 IAE 방법¹²⁾으로 얻어진 계인을 적용, 인디셜 응답과 보드선도를 통해 제어기의 성능과 안정성을 비교 분석한다. 뿐만 아니라 모델의 불확실성 및 외란에 대한 강인성을 확인하기 위해 모델 파라미터가 20% 변동하는 경우 및 정현파와 펄스 외란이 인가되는 경우를 상정한 시뮬레이션을 수행하였다. 이들 결과를 종합적으로 분석, 고찰하여 본 논문에서 제안한 GA가 오일쿨러 시스템의 설계사양을 만족하는 최적 계인 설계에 유용함을 확인하고자 한다.

2. 오일쿨러 시스템의 PI제어기 설계

2.1 압축기 가변속 방식 오일쿨러 시스템

Fig. 1은 증기압축식 냉동 사이클에 기반한 오일쿨러 시스템의 개념도이다.

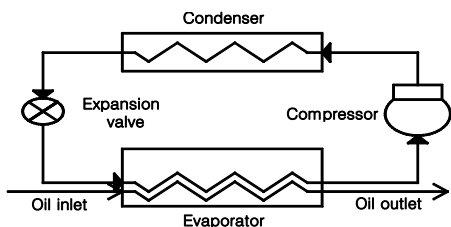


Fig. 1 Conceptual diagram of oil coolers

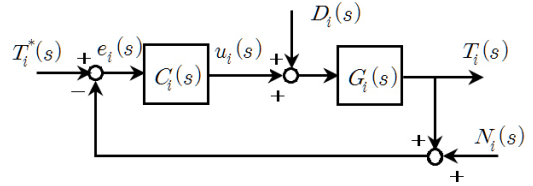


Fig. 2 Control block diagram of a compressor and an electronic expansion valve

압축기 가변속 방식은 압축기의 회전수 제어를 통해 오일의 질량유량을 가변시켜 냉각기의 오일출구온도를 일정하게 유지한다. 압축기 회전수 변화시 수반되는 COP(Coefficient Of Performance) 저하와 압축기의 손상을 방지하기 위해 EEV 개도를 가변시켜 과열도도 동시에 제어할 필요가 있다.

Fig. 2는 압축기와 EEV를 동시에 제어함으로써 오일출구온도 T_1 과 과열도 T_2 를 제어하는 오일쿨러 제어시스템의 블록선도이다. 위첨자 ‘*’는 지령값을 나타내며 피드백 루프를 통해 실시간으로 연산된 제어오차 $e_i(s) (i=1,2)$ 를 0으로 만들기 위해 제어기 $C_i(s)$ 로부터 조작량 $u_i(s)$ 가 연산되어 제어대상인 $G_i(s)$, 즉 압축기 및 EEV로 입력된다.

본 연구의 제어대상인 오일쿨러 시스템의 수학적 모델 $G_i(s)$ 는 실험적으로 구하였다. 실험에서는 전달함수를 압축기의 회전수와 EEV 개도를 스텝 상으로 변화시켜 각 입력에 대한 오일출구온도 및 과열도의 응답으로부터 구하였다. 응답은 식(1)과 같은 1차지연요소 형태로 나타났다.^{2,6)}

$$G_i(s) = \frac{T_i(s)}{u_i(s)} = \frac{K_i}{\tau_i s + 1} \quad (1)$$

여기서 특성 파라미터 값인 τ 와 K 는 시정수(time constant) 및 DC 계인을 각각 나타낸다.

오일쿨러 시스템의 특성상 부동작 시간(dead time)이 존재하고 큰 시정수를 가지므로 PID제어기에서 D제어기의 영향은 크지 않다. 그러므로 PI 제어기만을 이용하여 정밀한 온도제어가 구현 가능하다. 결국 GA를 이용한 PI 제어기의 최적 설

계는 식(2)의 각 게인값 K_{P_i} 와 K_{I_i} 를 특정 목적함수와 설계사양을 동시에 만족하는 최적의 값으로 결정하는 문제로 귀착된다.

$$C_i(s) = K_{P_i} + K_{I_i} \frac{1}{s} \quad (2)$$

2.2 GA를 이용한 PI제어기 설계

GA는 자연 진화 과정을 모방하여 컴퓨터로 모의 수행을 하는 최적화 알고리즘의 하나이다. GA는 교차와 변이 연산이 임의로 이루어지는 전역 탐색 방법으로써 방대한 문제 공간에 대한 우수한 탐색 능력을 가진다. 또한 내장된 목적함수의 설정에 의해 이미 만들어진 해들의 특징을 효율적으로 이용할 수 있는 장점도 있다.¹³⁾

Fig. 3은 본 논문에서 이용한 PI제어기의 최적 게인을 구하기 위한 GA의 순서도이다. 먼저 게인값 K_{P_i} 와 K_{I_i} 의 초기값을 설정하고 식(3)의 평가함수 IAE를 GA의 목적함수로 설정하였다.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3)$$

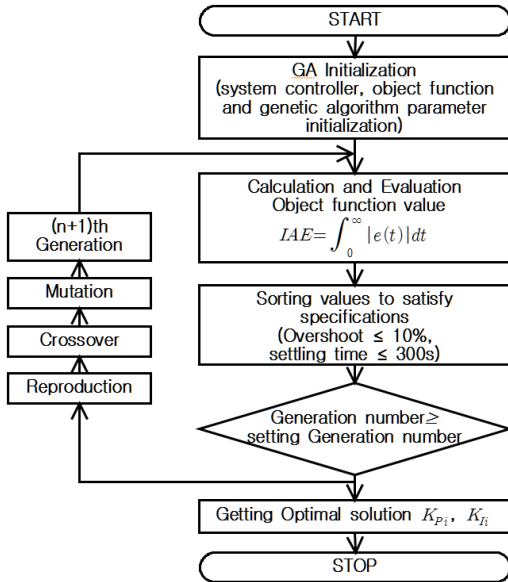


Fig. 3 Flowchart to obtain the optimal gains using genetic algorithm

대표적인 최적화 기법의 평가함수로는 ISE (Integrated Square Error), IAE(Integrated Absolute Error), ITAE(Integrated Time Absolute Error) 등이 있지만 이들 평가함수를 이용하여 오일쿨러 시스템의 온도제어 성능을 비교 분석한 선행 연구 결과, IAE가 가장 우수한 성능을 보인 것으로 나타났다.¹²⁾ 그러므로 본 논문에서는 IAE를 GA의 목적함수로 이용하여 최적 게인을 구한다. 또한 설계사양인 오버슈트 10%, 정착시간 300 sec 이하를 만족하도록 탐색조건을 부가하였다.

개체수(population size)는 50, 세대수(generation)는 100으로 설정하고, 선택 규칙으로는 목적함수에 의해 평가된 적합도에 비례하여 다음 세대에 선택될 확률이 높아지는 룰렛(roulette)을 채택하였다. 교차(crossover)는 식(4)의 Arithmetic 교차방법을 사용하였다.

$$o_j = \alpha P_j + (1 - \alpha) P_{j+1} \quad (4)$$

여기서 j 는 세대, o_j 는 자손(offspring), P_j 는 부모(parent), α 는 교차율(crossover rate)을 의미한다. 돌연변이(mutation)는 교배 결과 만들어진 두 개체의 근사도를 측정하여 거리가 가까울수록 높은 변이율로 변이하는 적응변이를 채택하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치 및 방법

Fig. 4는 오일쿨러 시스템의 전달함수 및 과열도 설정값을 구하기 위한 정특성 실험용 장치도이다. 제어장치로는 LabVIEW DAQ 시스템, EEV 개도 조작기로는 스텝모터드라이버, 압축기용 회전수 가변을 위해 “V/f = 일정” 제어 타입의 인버터를 각각 사용하였다. 공작기계를 대신한 열부하로는 전기히터(4kW)를 사용하였으며, 온도센서는 열전대(thermocouple)와 PT-100을 사용하였다.

Table 1은 실험장치의 주요 사양을, Table 2는 실험 조건을 나타낸다. 오일출구온도는 공작기계의 특성을 고려해 25℃, 과열도는 정특성 실험을 바탕으로 14℃를 목표값으로 설정하였다.¹²⁾

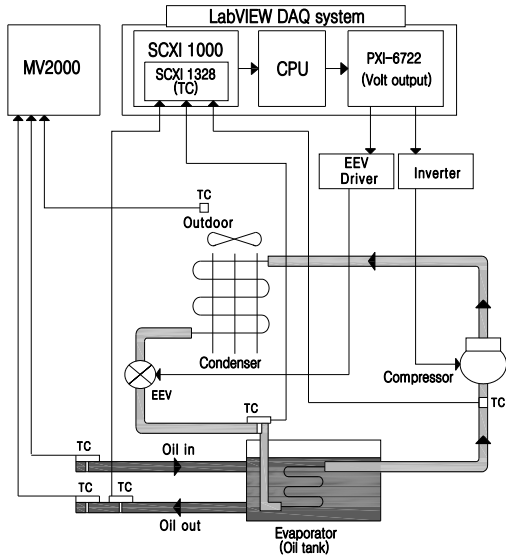


Fig. 4 Oil cooler control system for experiments

Table 1 Specifications of the test unit

Component	Note
Compressor	Rotary type, 2.2[kW]
Condenser	Air-cooled fin and tube type
Evaporator	Bare tube type
Refrigerant	R-22

Table 2 Experimental conditions

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

따라서 설계된 온도제어 시스템은 항상 최적의 COP를 갖는 운전점에서 작동하게 된다.

실용적인 전달함수는 실험으로부터 압축기 회전 수 변화에 따른 오일출구온도 응답과 EEV 개도 변화에 따른 과열도 응답을 구하고, 이를 분석함으로써 얻어졌다. 식(5)와 식(6)은 실험으로 구한 오일쿨러 시스템의 압축기 및 EEV 전달함수를 나타낸다.

$$G_1(s) = \frac{-0.0307}{55s + 1} \quad (5)$$

$$G_2(s) = \frac{-0.1}{25s + 1} \quad (6)$$

3.2 PI제어기의 최적 게인 설계

전달함수 식(5)와 식(6)을 바탕으로 Fig. 3과 같이 GA를 적용하여 식(2)의 PI제어기 최적 게인을 구하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 이 게인의 최적성과 타당성을 검증하기 위해 매트랩 튜너로 설정한 PI게인과 자체 프로그래밍한 평가함수 IAE를 이용하여 구해진¹²⁾ PI게인도 Table 3에 함께 나타내었다.

Table 3 Optimal PI gains

Method	Compressor		EEV	
	K_P	K_I	K_P	K_I
GA	28.59	0.76	12.29	0.82
Matlab	5.6	0.58	1.7	0.39
IAE	30	1.2	21	0.5

이들 게인들을 오일쿨러 시스템에 적용하여 얻은 인디셜응답을 통해 제어기의 성능을 비교 검토한다. 매트랩 PID 튜너를 이용한 PI게인은 일반적으로 위상여유값을 먼저 고정시킨 후, 정착시간과 오버슈트를 원하는 값이 되도록 조절하여 게인을 구한다. 본 논문에서는 위상여유를 60°, 오버슈트는 10% 이내로 되는 PI게인을 구하였다. 또한 식(3)의 평가함수 IAE를 이용한 PI게인은 식(7)의 제어입력에서 누적오차 $e(t)$ 가 최소가 되도록 하여 구한 게인이다. 이 방법은 먼저 임의의 K_P 와 K_I 값들을 초기값으로 설정하고 이 값들에 의한 제어 입력값을 구하여 그 입력값을 시스템에 적용하고 출력과의 오차를 비교한다. 그리고 K_P 와 K_I 값들을 조금씩 변화시키면서 동일한 과정을 반복한다. 이렇게 구한 게인값들 가운데 식(3)의 값이 최소가 되는 게인을 최적게인으로 채택하는 방법이다.

$$u_i(t) = K_{P_i} e_i(t) + K_{I_i} \int_0^{\infty} e_i(t) dt \quad (7)$$

압축기 제어용 K_P 는 시스템의 동작 한계 및 인버터의 수명을 고려해 30으로 그 값을 제한하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

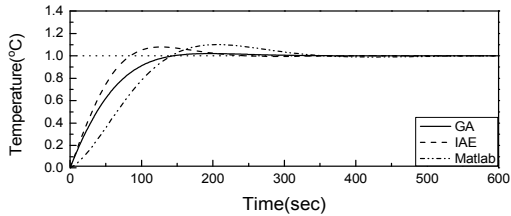
Fig. 5는 식(5)와 식(6)의 전달함수 $G_i(s)$ 에 Table 3의 최적 계인을 적용하여 매트랩 상에서 시뮬레이션한 페루프 시스템의 인디셜 응답이다.

Table 4는 각 계인들에 의한 제어성능을 비교하기 위해 Fig. 5의 인디셜 응답을 분석하여 과도상태의 주요 지표인 오버슈트와 정착시간을 나타내었다. 3종류의 PI계인 가운데 IAE와 GA는 매트랩에 비해 상대적으로 우수한 응답 성능을 보이지만, GA가 IAE에 비해 상대적으로 응답속도도 빠르고 오버슈트도 적게 나타났다.

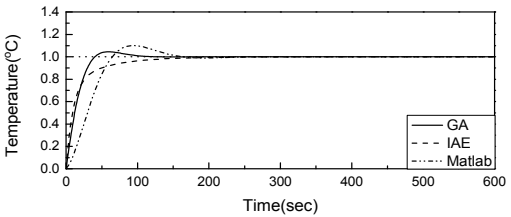
Fig. 6은 Fig. 5의 결과에 대한 상대안정도를 분석하기 위해 Table 3의 계인을 적용한 출구온도와 과열도 제어 시스템의 보드선도이다. 각 제어기가 모두 충분한 안정 여유를 가지고 있지만 GA와 IAE의 경우가 매트랩의 경우보다 위상여유 및 대역폭이 모두 크게 나타나므로 응답 속도 면에서 더 빠르고 안정한 제어시스템임을 알 수 있다.

Table 4 System characteristics

System	Characteristic	GA	Matlab	IAE
Compressor	Overshoot (%)	2.0	10.1	7.9
	Settling time (s)	196.9	319.3	205.9
EEV	Overshoot (%)	4.5	10.0	0.0
	Settling time (s)	87.7	145.5	129.9

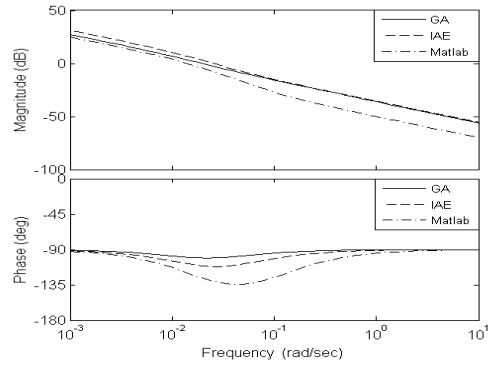


(a) Oil outlet temperature

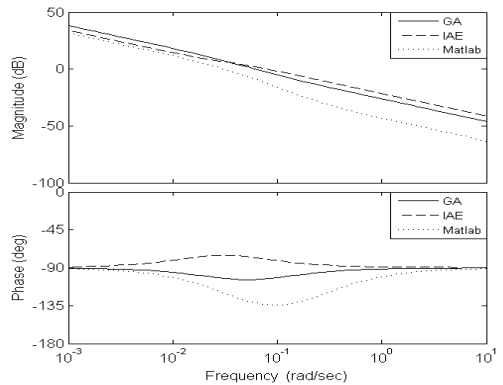


(b) Superheat

Fig. 5 Indicial responses applied PI gains using GA, IAE, and Matlab tuner

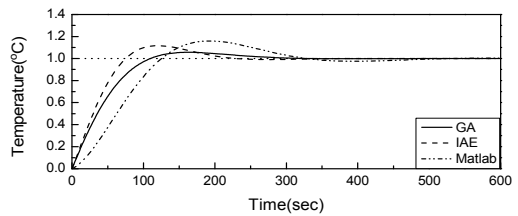


(a) Oil outlet temperature

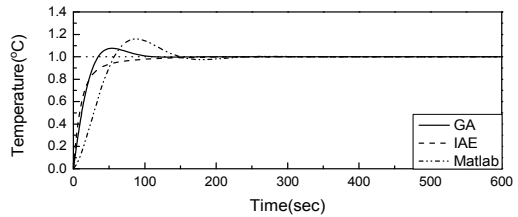


(b) Superheat

Fig. 6 Bode diagram of oil cooler system applied PI gains using GA, IAE, and Matlab tuner

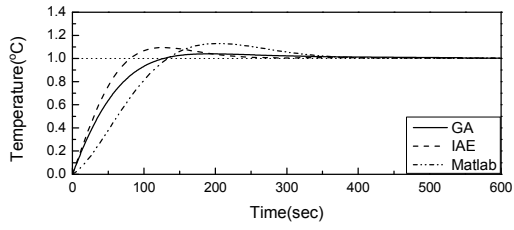


(a) Oil outlet temperature

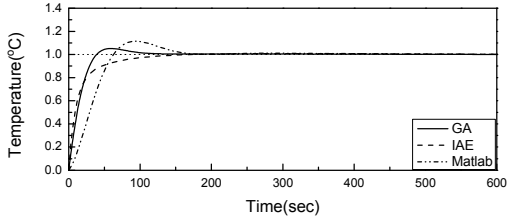


(b) Superheat

Fig. 7 Indicial response considering model uncertainty



(a) Oil outlet temperature



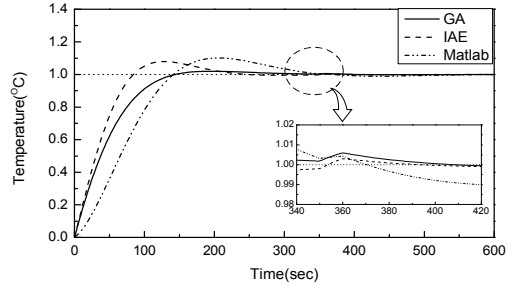
(b) Superheat

Fig. 8 Indicial response considering sinusoidal disturbance

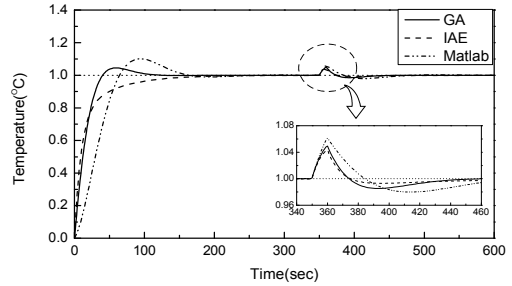
Fig. 7은 이 GA 계인이 외란이나 시스템의 불확실성에 대해서도 강인함을 확인하기 위해, 식(5)와 식(6)의 전달함수의 특성값인 시정수와 DC계인을 각각 20% 변동하여 시뮬레이션한 결과이다. 이 경우에도 GA의 응답속도가 상대적으로 빠르고 오버슈트도 크지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 압축기의 회전수 가변용 인버터에 의한 주기성 잡음 $N_i(s)$ 의 혼입을 가정하여 정현파 함수를 인가한 시뮬레이션 결과이다. 정현파 함수의 주파수는 0.0025Hz, 진폭은 0.2로 가정하였다. 주기성 외란에 대해서도 GA와 IAE는 매트랩에 비해 상대적으로 우수한 응답 성능을 보이지만, GA가 IAE에 비해 상대적으로 오버슈트가 적으면서 응답속도도 빠르게 나타났다.

Fig. 9는 주기성 잡음 $N_i(s)$ 와 펄스 외란 $D_i(s)$ 를 동시에 고려한 시뮬레이션 결과이다. 주기성 외란의 정현파 주파수는 0.03Hz, 진폭은 0.02로 가정하였고 펄스 외란은 350초 시점에서 10초간 크기 2인 단일 펄스를 인가하였다. 주기성 잡음이 인가되고 있는 상태에서 큰 외란이 인가되었지만 GA에 의해 설계된 계인은 제어량인 출구온도와 과열도를 오버슈트도 적으면서 외란에 대해서도 크게 변동하지 않고 빠르게 수렴시킴을 확인할 수 있었다.



(a) Oil outlet temperature



(b) Superheat

Fig. 9 Indicial response considering sinusoidal and pulse disturbance

이 결과들로부터 GA를 이용하여 구한 PI계인이 매트랩 튜너나 IAE를 이용하여 구한 계인과 동등하거나 그 이상의 양호한 과도특성을 나타내면서 빠른 응답뿐만 아니라 외란이나 모델링 오차에 대해서도 강인한 제어 성능을 가지는 최적 계인임을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 오일쿨러의 출구온도와 과열도를 최적으로 제어할 목적으로 PI제어기의 최적 계인 결정법에 대해 검토하였다. 우선 실험을 통해 얻어진 오일쿨러 시스템의 실용적인 전달함수를 바탕으로 GA를 적용하여 GA에 내장된 목적함수인 IAE 지표를 최소화 하고 설계사양인 오버슈트와 정착시간을 동시에 만족하는 최적 PI제어기 계인 값을 구하였다. 이렇게 구한 GA 계인의 최적성을 확인하기 위해 매트랩 PID튜너 및 자체 프로그래밍한 평가함수 IAE 방법으로 얻어진 계인들을 적용, 인디셜 응답과 보드선도를 통해 제어기의 성능과 안정성을 비교 분석하였다. 뿐만 아

나라 모델의 불확실성 및 외란에 대한 강인성을 확인하기 위해 모델의 특성 파라미터들이 각각 20% 변동하는 경우 및 정현과잡음과 펄스 외란이 인가되는 경우를 상정한 시뮬레이션을 수행하였다. 이들 결과를 종합적으로 분석, 고찰한 결과, 본 논문에서 제안한 GA에 의한 PI제어기 설계가 오일쿨러 시스템의 설계사양을 만족하는 최적의 제어를 구하는 데 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다. 특히 GA에 의해 설계된 PI제어기가 모델의 불확실성 및 주기성, 스텝성 외란이 인가된 경우에도 강인한 제어 성능을 발휘할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 향후 정밀한 온도제어가 필요한 냉동시스템의 최적 PI제어기 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

Reference

1. S. W. Lee, H. K. Yeom and K. J. Park, 2009, "Performance of Hot Gas Bypass Type Oil Cooler System", Journal of Korea Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 73-80.
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. S. K. Jeong, D. B. Lee and J. I. Yoon, 2012, "Comparison of System Performances of Hot-gas Bypass and Compressor Variable Speed Control of Water Coolers for Machine Tools", KJACR, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8.
4. H. Li, S. K. Jeong and S. S. You, 2009, "Feedforward Control of Capacity and Superheat for a Variable Speed Refrigeration System", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 1067-1074.
5. S. K. Jeong and S. H. Kim, 2011, "Optimum Controller Design of a Water Cooler for Machine Tools Based on the State Space Model", KJACR, Vol. 23, No. 12, pp. 782-790.
6. S. K. Jeong and J. Y. Byun, 2010, "Design of PI and Feedforward Controller for Precise Temperature Control of Oil Cooler System", KSPSE, Vol. 14, No. 6, pp. 89-95.
7. 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", KJACR, Vol. 23, No. 2, pp. 111-119.
8. S. R. Oh, 2009, "The Design of PI Controller Using a Saturation Function in Frequency Domain", Information and Control Symposium, pp. 326-328.
9. M. J. Kim, Y. H. Lee, M. O. So, Y. S. Ha, S. W. Hwang and G. K. Jin, 2007, "Tuning Rules of the PID Controller Using RCGAs", Journal of the Korea Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 448-454.
10. D. H. Park, S. J. Ji and J. T. Lee, 2004, "Attitude Control of Helicopter Simulator System using A Hybrid GA-PID Wavenet Controller", The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, D, Vol. 53 No.6, pp. 433-439.
11. A. Tsukahara and A. Kanasugi, 2009, "Genetic Algorithm with Dynamic Variable Number of Individuals and Accuracy", International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 1-6.
12. S. K. Jeong and K. H. Hong, 2013, "Optimal PI Controller Design for Refrigeration System Considering Disturbance", KJACR, Vol. 25, No. 2, pp. 85-93.
13. D. E. Goldberg, 1989, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley, ISBN 978-0-201-15767-3.