

## 외란을 고려한 냉동시스템의 최적 PI 제어기 설계

정 석 권<sup>†</sup>, 홍 기 학<sup>\*</sup>

부경대학교 냉동공조공학과, <sup>\*</sup>부경대학교 대학원 냉동공조공학과

### Optimal PI Controller Design for Refrigeration System Considering Disturbance

Seok-Kwon Jeong<sup>†</sup>, Ki-Hak Hong<sup>\*</sup>

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University,  
Busan 608-739, Korea

<sup>\*</sup>Graduate school of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University,  
Busan 608-739, Korea

(Received September 18, 2012; revision received January 7, 2013)

**ABSTRACT:** The proportional plus integral(PI) feedback control manner has been used in many general industrial fields such as refrigeration system because of its simple design process and favorable control performance. This paper deals with optimized PI controller design of the refrigeration system based on evaluation functions such as integrated absolute error(IAE). The suggested optimal PI gains can be easily calculated by a simple program and the optimal controllability satisfying the evaluation function can be assured. Furthermore, at the initial step of controller design, the suggested optimal gain is able to reflect some noise disturbances caused by an inverter which drives variable speed compressors. The validity of the suggested optimal gain is investigated by some simulations and experiments to verify its efficiency. From the results of comparing control performance between the optimal PI controller based on the evaluation function and the PI controller designed by the Matlab tuner which was known as the most popular gain tuner, the optimal PI controller showed more desirable control performance especially in transient responses.

**Key words:** Optimal PI controller(최적 PI 제어기), Refrigeration system(냉동시스템), Evaluation function(평가함수), Noise disturbance(노이즈 외란)

#### 기 호 설 명

$C$  : 제어기  
 $G$  : 전달함수  
 $K$  : 이득상수  
 $K_I$  : 적분게인  
 $K_P$  : 비례게인

$s$  : 복소기호  
 $T$  : 온도 [°C]  
 $T^*$  : 설정온도 [°C]  
 $d$  : 외란  
 $e$  : 오차

#### 하첨자

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-51-629-6181; fax: +82-51-629-6174

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

$c$  : 압축기

$e$  : 전자팽창밸브

## 1. 서 론

증기 압축식 냉동시스템의 정밀한 온도 제어법으로 핫가스 바이패스 및 압축기 가변속 제어 방식이 널리 사용되고 있다. 전자는 단일 제어 변수 시스템으로 제어계의 설계 및 구성이 쉽지만 에너지 절약 효과가 없다. 후자는 목표 온도뿐만 아니라 과열도도 동시에 제어해야 하는 다변수 제어계로 제어기 설계 및 구성이 어려운 반면 에너지 절약 성능이 뛰어나다.<sup>(1-3)</sup>

냉동시스템의 온도 제어기 설계법으로는 모델 기반의 PID와 최적제어, 지글러-니콜스의 PID 동조법, AI 수법인 퍼지제어 등이 다수 제안되어 있다. 제어 정도 향상을 위해 PI 피드포워드 제어, 퍼지 PID 제어법 등도 제안되어 있지만 산업현장에서는 실용성과 설계의 용이성 측면에서 PID 단독 제어기가 가장 많이 적용되고 있다.<sup>(4-7)</sup>

PID 제어기 설계는 제어계의 안정성을 담보하고 설계사양을 만족하는 PID 게인 결정 문제로 귀착된다. 게인 결정법으로는 Matlab(이하 매트랩)의 PID 튜너에 의한 시행착오법,<sup>(3)</sup> IAE와 같은 평가함수를 이용한 최적화 기법,<sup>(8)</sup> 포화함수를 이용한 주파수 영역 결정법,<sup>(9)</sup> 근궤적의 활용,<sup>(10)</sup> 유전자 알고리즘을 이용한 방법<sup>(11)</sup> 등이 있다. 이들 가운데 현장의 엔지니어가 비교적 쉽게 접근할 수 있는 방법이 매트랩의 PID 튜너 이용법이다. 이 방법은 오버슈트, 정착 시간 등의 설계사양을 튜너 창에 입력함으로써 원하는 PID 게인들을 쉽게 얻을 수 있고, 매트랩 상에서 이 게인들을 반영한 시뮬레이션을 통해 설계사양 만족 유무를 직접 확인할 수 있다. 하지만 이 게인들이 최적의 제어 성능을 보장하는지 여부는 알기 어렵다. 뿐만 아니라 설계 단계에서 예상되는 특정 외란의 제거 성능을 검증하기도 용이하지 않다.

본 논문에서는 이러한 문제점에 착안하여 외란과 특정 평가함수를 고려한 냉동시스템의 PI 제어기 최적 설계 방안을 제안한다. 오일쿨러와 같은 냉동시스템은 전달함수가 대부분 시정수가 큰 1차 지연요소이므로 1차 지연요소로 간주한다.

우선, 제어기의 최적성을 평가하는 대표적인 평가함수들을 제시하고, 주기 함수 또는 펄스 함수와 같은 특정 형태의 외란이 동시에 인가되는 상황을 고려한 PI 게인 결정법을 보인다. 다음으로 결정된 PI 게인들을 이용한 시뮬레이션을 통해 각 평가함수별 PI 게인의 제어 성능을 상호 비교한다. 또한 이들 제어기의 제어 성능을 매트랩 PID 튜너(매트랩 튜

너)를 통해 설계된 제어기의 성능과도 상호 비교한다. 제어 성능 비교 시 주파수 영역 응답 지표(차단 주파수, 위상여유)와 시간 영역 응답 지표(정상상태 오차, 오버슈트, 정착시간)를 동시에 평가한다.

오일쿨러 실험 시스템을 구축하고 3종류의 평가함수 가운데 가장 양호한 제어 성능을 보인 평가함수의 PI 게인과 매트랩 튜너 상에서 구한 PI 게인을 적용한 실험을 수행한다. 냉동시스템의 온도 제어법으로는 압축기 가변속 제어 방식을 이용하여 오일 출구 온도와 과열도를 동시에 제어한다. 실험은 기동 실험, 지령값 변경 실험, 부하 변경 실험을 통해 본 논문에서 제안한 평가함수 기반의 PI 제어기와 매트랩 튜너 상에서 구한 PI 제어기의 성능을 비교 고찰한다. 시뮬레이션 및 실험 결과 분석을 통해 본 논문에서 제안한 평가함수 기반의 제어기 설계법이 설계가 쉬우면서도 우수한 제어 성능을 보임을 입증한다.

## 2. 냉동시스템의 PI 제어기 최적 설계

### 2.1 오일쿨러 시스템의 PI 제어

Fig. 1은 증기압축식 냉동사이클에 기반한 오일쿨러 시스템의 개념도이다. 압축기 가변속 방식은 압축기의 회전수 제어를 통해 냉매의 질량유량을 변화시킴으로써 증발기를 통과한 오일의 출구 온도를 일정하게 유지한다. 압축기 회전수 변화 시 과열도 변화로 인한 COP 저하와 압축기 손상을 막기 위해 전자팽창밸브(EEV) 개도를 제어함으로써 과열도도 동시에 제어한다.

Fig. 2는 압축기와 EEV를 제어함으로써 오일 출구 온도  $T_1$ 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 제

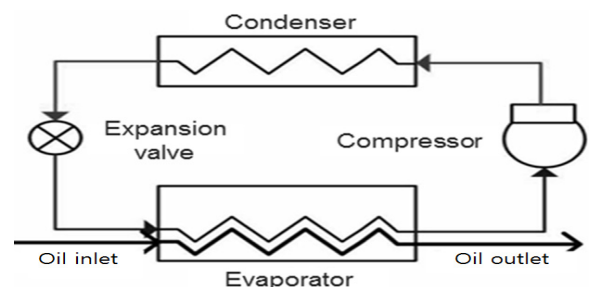


Fig. 1 Conceptual diagram of oil coolers.

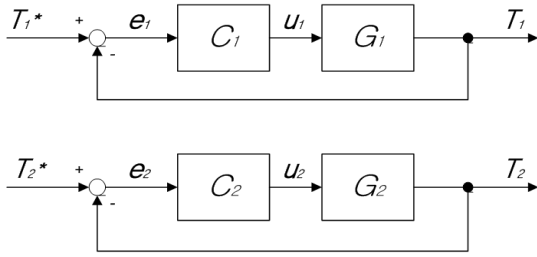


Fig. 2 Control block diagram of a compressor and an expansion valve.

여기  $C_i(s)$ 로부터 조작량  $u_i(s)$ 가 연산되어 제어 대상인 압축기 및 EEV의 전달함수  $G_i(s)$ 로 입력된다.

제어기 설계를 위해 우선 제어대상인 오일쿨러 시스템의 수학적 모델이 필요하다. 본 연구에서는 조작량  $u_i(s)$ 와 오일 출구 온도  $T_1$  및 과열도  $T_2$ 와의 관계를 실험적으로 구한 실용적인 전달함수 모델을 사용한다. 열평형 상태에서 압축기 회전수 및 EEV 개도의 스텝 입력에 대한 오일 출구 온도 및 과열도의 전달함수 모델은 모두 식(1)의 1차 지연요소 형태로 나타난다.<sup>(2,8)</sup>

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

여기서 특성 파라미터 값인  $\tau$ 와  $K$ 는 시정수(time constant) 및 DC 게인을 각각 나타낸다.

## 2.2 PI 제어기의 최적 설계

PI 제어기는 식(2), 조작량  $u(t)$ 는 식(3)과 같다. 따라서 PI 제어기의 최적 설계는 결국 식(2)의 각 게인값  $K_P$ 와  $K_I$ 를 특정 평가함수를 만족하는 최적의 값으로 결정하는 문제로 귀착된다.

$$C(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} \quad (2)$$

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (3)$$

최적화 기법의 평가함수 가운데 본 논문에서 검토한 평가함수를 식(4)~식(6)에 나타내었다.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (4)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (5)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (6)$$

일반적으로 ISE(Integrated Square Error)는 큰 오차의 강력한 억제 시, IAE(Integrated Absolute Error)는 작은 오차의 억제 시, ITAE(Integrated Time Absolute Error)는 긴 시간 동안 지속되는 오차를 억제할 때 적합하다.

최적화 기법에 의한 게인(최적 게인)  $K_P$ ,  $K_I$ 는 우선 오차  $e_i(t)$ 를  $T_i$ 의 각 설정값과 초기값  $T_i(0)$ 로부터 계산한다. 다음, 오차  $e_i(t)$ 와  $K_P$ ,  $K_I$ 의 초기 설정값을 식(3)에 입력해 조작량  $u_i(t)$ 를 계산한다. 이 조작량  $u_i(t)$ 에 의한 시스템의 출력  $T_i(t)$ 는 식(7)에 의해 계산된다.

$$\frac{\tau_i}{K_i} \cdot \frac{dT_i(t)}{dt} + \frac{T_i(t)}{K_i} = u_i(t) \quad (7)$$

식(7)은 식(1)을 식(8)과 같이 역라플라스 변환함으로써 유도되었다.

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\tau_i}{K_i} s T_i(s) + \frac{1}{K_i} T_i(s) = u_i(s) \right\} \quad (8)$$

외란  $d(t)$ 를 고려한 최종 출력  $T_i(t)$ 는 식(7)의 출력  $T_i(t)$ 에 인가 외란  $d(t)$ 를 더함으로써 구해진다. 이와 같은 과정을  $e_i(t)$ 가 0이 될 때까지 반복적으로 계산하면서 식(4)~식(6)의 값들을 평가하고,  $K_P$ 와  $K_I$  값들을 증가시켜 가면서 동일한 과정을 반복하여 식(4)~식(6)의 값이 최소가 되는 최적 게인을 구한다.

Fig. 3은 본 논문에서 설정한 1차 지연요소의 PI 최적 게인을 구하는 순서도이다. LabVIEW 또는 상용 계산 프로그램을 이용하여 프로그래밍하면 비교적 쉽고 빠르게 최적 게인을 구할 수 있다.

## 3. 실험장치 및 실험 방법

### 3.1 실험장치

Fig. 4는 오일쿨러 온도제어시스템의 개략도이며,

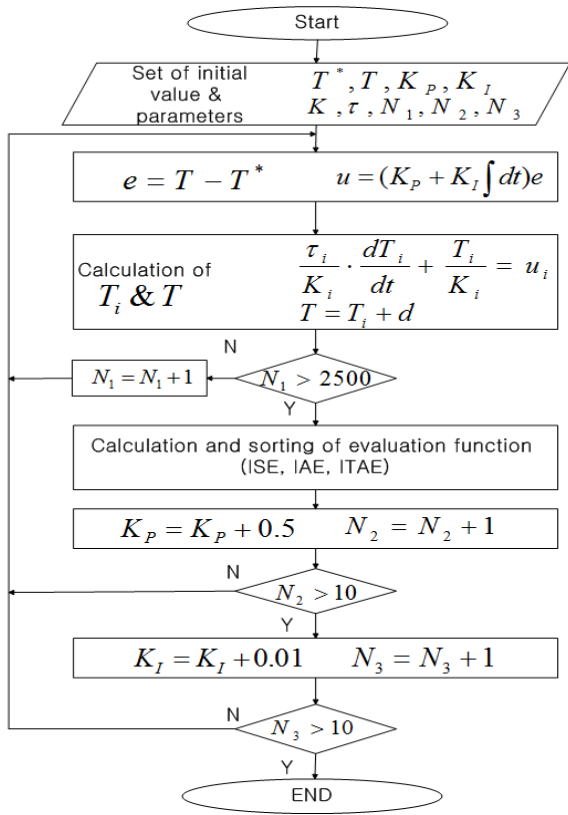


Fig. 3 Flow chart to obtain the optimal gain from evaluation functions.

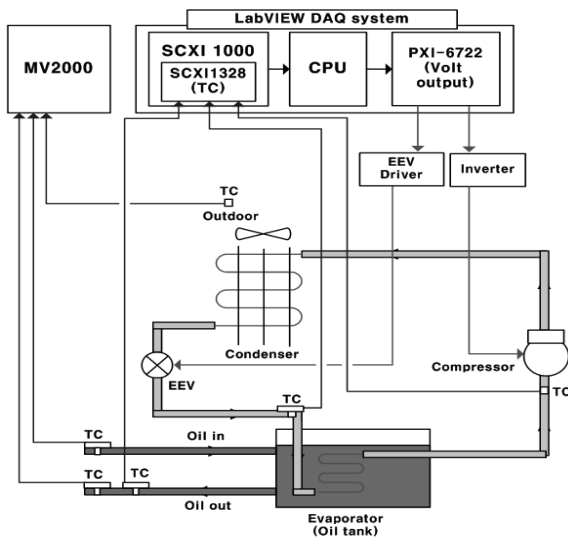


Fig. 4 Oil cooler control system for experiments.

Fig. 5는 실험장치의 주요 구성 요소이다. 제어장치는 LabVIEW DAQ 시스템, EEV 개도 조작기로는 스텝모터드라이버, 압축기용 회전자 가변을 위해  $V/f = \text{일정}$  제어 타입의 인버터를 각각 사용하였다.

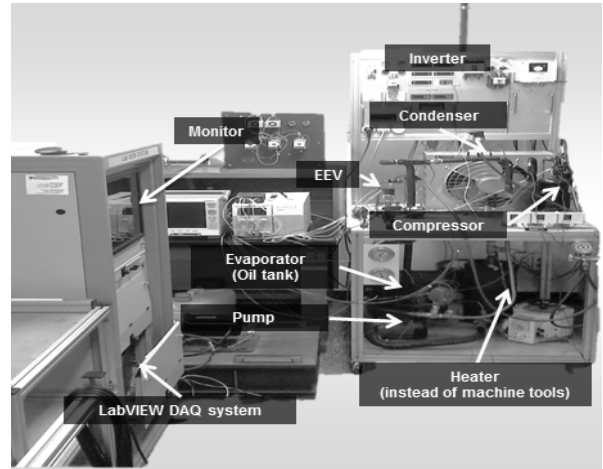


Fig. 5 Experimental equipment.

Table 1 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 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]

공작기계를 대신한 열부하로는 전기히터(3 kW)를 사용하였으며, 온도센서는 열전대(thermocouple)를 사용하였다.

Table 1은 실험장치의 주요 사양을, Table 2는 실험 조건을 각각 나타낸다. 오일 출구 온도는 공작기계의 특성을 고려해 25°C로 설정하였고, 과열도는 과열도와 COP 정특성 실험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 COP가 감소하지 않는 최고 온도 14°C를 목표값으로 설정하였다. 따라서 설계된 온도제어시스템은 항상 최적의 COP를 갖는 운전점에서 작동되게 된다.

### 3.2 실험 방법

오일 출구 온도와 과열도 제어기 설계를 위해서는 압축기와 EEV의 전달함수  $G_i(s)$ 를 구해야 한다. 본

논문에서는 열평형 상태에서 압축기 회전수 스텝 변화량에 따른 오일 출구 온도 응답과 EEV 개도 스텝 변화량에 따른 과열도 응답을 통해 실험적으로 실용적인 전달함수를 구하였다.

식(9), 식(10)은 실험을 통해 구해진 오일쿨러 시스템의 압축기 및 EEV 전달함수를 나타낸다.

$$G_1(s) = \frac{-0.0307}{55s + 1} \quad (9)$$

$$G_2(s) = \frac{-0.1}{25s + 1} \quad (10)$$

전달함수는 전형적인 1차 지연요소이며 시정수는 압축기가 EEV에 비해 크게 나타남을 보인다.

### 3.2.1 평가함수별 최적 게인 결정

외란을 고려한 각 평가함수별 최적 게인은 식(4)~(6)을 Fig. 3에 따라 계산함으로써 구해진다. 이때  $G_i(s)$ 는 식(9)와 식(10)을 이용하고, 외란은 실제 운전 상황을 고려하여 정현파와 펄스가 동시에 입력되는 것으로 가정하였다. 정현파는 주파수 0.0025 Hz, 진폭 0.02를 갖는 주기 함수를, 그리고 펄스성 외란은 10초간 크기 4가 인가되는 단일 펄스를 각각 가정하여 시뮬레이션 하였다.

Table 3은 계산된 평가함수별 압축기 및 EEV 제어용 PI 제어기의 최적 게인을 나타낸다.

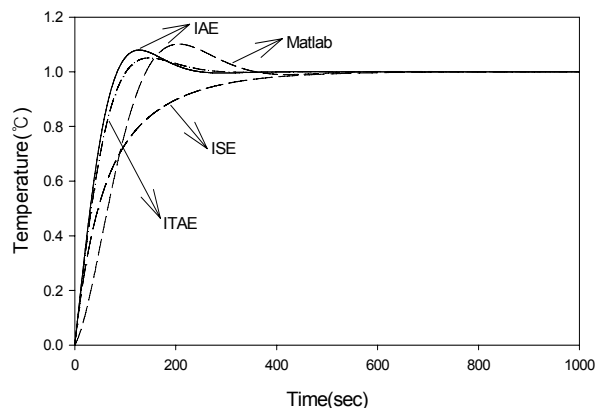
압축기 제어용  $K_P$ 는 시스템의 동작 한계 및 인버터의 수명을 고려해 30으로 값을 제한하였다.

### 3.2.2 최적 게인과 매트랩 튜너 게인의 성능 비교

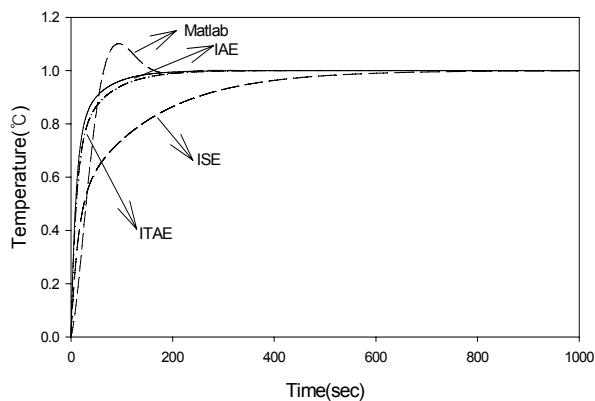
Fig. 6은 각 평가함수별 최적 게인 Table 3과 식(9), 식(10)의  $G_i(s)$ 를 적용하여 매트랩 상에서 시뮬레이션한 페루프 시스템의 인디셜 응답이다. 3종류의 최적 게인 가운데 IAE와 ITAE는 응답이 매우 유사하고 ISE에 비해서는 상대적으로 응답속도가 빠르다. 따라서 본 논문에서는 매트랩 튜너로 설

Table 3 Optimal PI gains depend on evaluation function

Evaluation function	Compressor		EEV	
	$K_P$	$K_I$	$K_P$	$K_I$
ISE	30	0.4	10	0.12
IAE	30	1.2	21	0.5
ITAE	30	1	18	0.4



(a) Response of outlet temperature



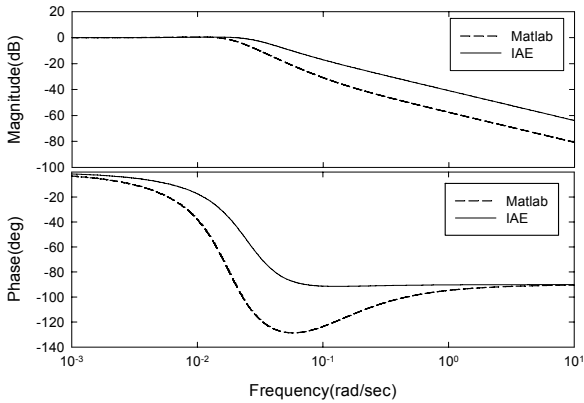
(b) Response of superheat

Fig. 6 Indicial responses applied optimal PI gains and Matlab gain.

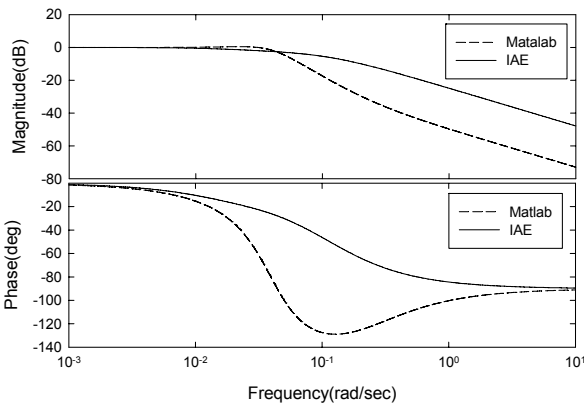
정한 게인과의 제어 성능 비교 대상으로 평가함수 IAE에 의한 게인을 이용한다.

매트랩 PID 튜너는 현장의 엔지니어가 가장 쉽게 PI 게인을 결정할 수 있는 설계 툴이다. 일반적으로 위상여유값을 먼저 고정시킨 후, 정착시간과 오버슈트를 원하는 값이 되도록 대역폭을 조절하여 게인을 구한다. 본 논문에서는 위상여유를 60°, 오버슈트는 10% 이내로 되는 PI 게인을 구하였다. 압축기 회전수 제어용 게인은  $K_P = 5.6$ ,  $K_I = 0.58$ , EEV 개도 제어용 게인은  $K_P = 1.7$ ,  $K_I = 0.39$ 로 각각 얻어졌다. 매트랩 튜너로 얻은 PI 게인에 의한 인디셜 응답도 Fig. 6에 동시에 나타내었다. IAE에 의한 게인 응답에 비해 정착시간이 더 길게 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6의 결과를 분석하기 위해 IAE 및 매트랩 튜너로 얻은 게인을 적용한 출구 온도와 과열도 제어 시스템의 보드선도이다. IAE에 의한 게인의 경우가 매트랩 튜너에 의한 게인의 경우보다 대역폭과 위상여유가 모두 크게 나타나므로 응답



(a) Outlet temperature



(b) Superheat

Fig. 7 Bode diagram of closed loop system applied IAE gains and Matlab gain.

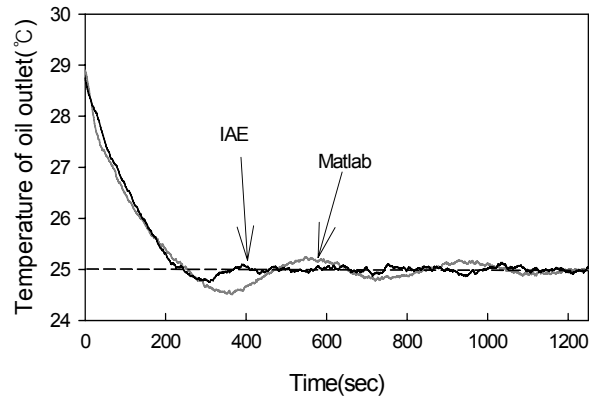
속도 면에서 더 빠르고 또한 더욱 안정한 제어시스템임을 알 수 있다.

### 3.2.3 제어 성능 실험

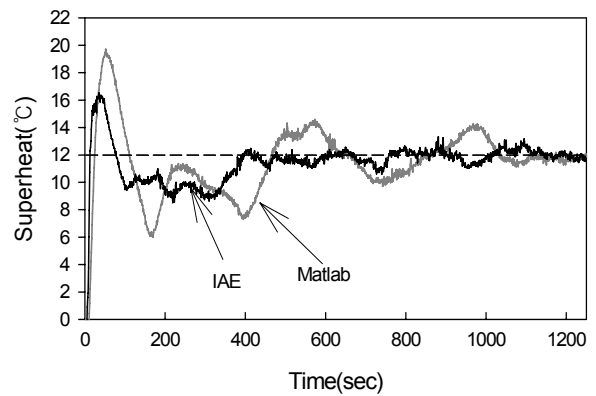
IAE 및 매트랩으로 구한 게인들의 제어 성능을 평가하기 위해 오일쿨러를 대상으로 기동 실험, 지령값 변경 실험, 부하 변경 실험을 하였다.

기동 실험은 1.2 kW의 열부하를 인가한 상태에서 오일 출구 초기 온도가 29°C일 때 냉각기를 기동시켜 목표값으로 수렴하기까지의 오일 출구 온도와 과열도 응답을 각각 구하였다.

지령값 변경 실험은 열부하 1.2 kW, 목표값 25°C인 정상상태에서 지령값을 24°C로 스텝상으로 변경시켰을 때 오일 출구 온도와 과열도 응답을 구하였다. 한편 부하 변경 실험은 지령값 변경 시와 동일한 조건 하에서 부하만을 1.2 kW에서 1.5 kW로 스텝상으로 변경시켰을 때의 오일 출구 온도와 과열도 응답을 각각 구하였다.



(a) Outlet temperature



(b) Superheat

Fig. 8 Command following response from initial start.

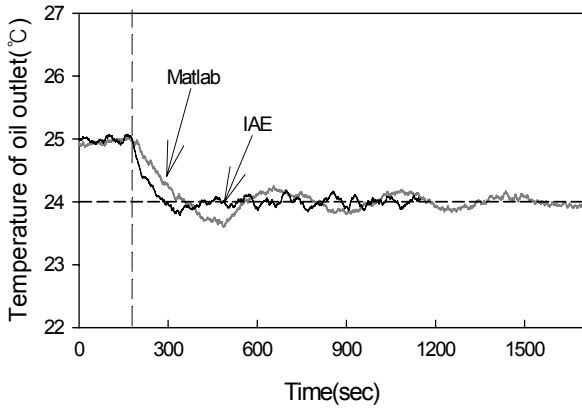
## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 제어 성능 비교

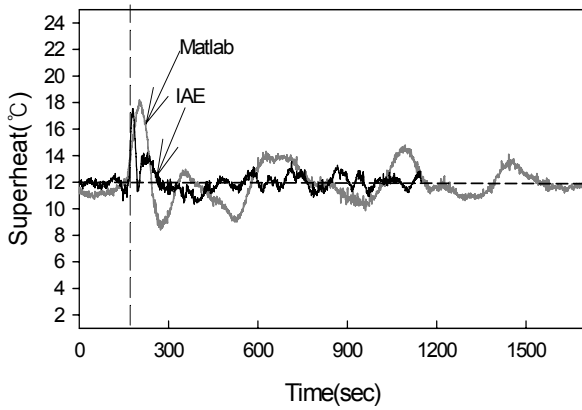
Fig. 8은 기동실험 결과를 그리고 Fig. 9는 지령값 변경 실험, Fig. 10은 부하 변경 실험 결과를 각각 나타낸다.

그림에서 가로 점선은 목표(설정)값을, 세로 점선은 목표값과 부하를 변경시킨 시점을 각각 나타낸다. 3종류의 실험에서 정착시간, 오버슈트와 같은 과도 특성이 IAE에 의한 게인의 경우가 매트랩에 의한 게인의 경우보다 양호하게 나타남을 볼 수 있다.

한편 오일 출구 온도와 과열도의 정상상태 오차는 ±0.1°C와 ±1°C 이내로 나타나 두 방법 모두 동일한 제어 성능을 보였다. 결과적으로 정상 특성 면에서는 제어 성능의 차이가 없지만 과도 특성 면에서는 IAE에 의한 게인이 매트랩 튜너에 의한 게인보다 더 양호한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

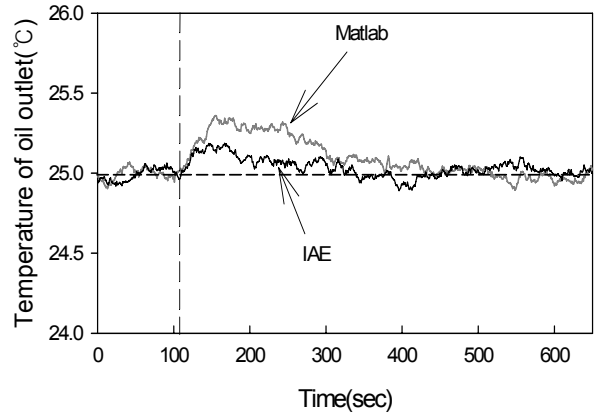


(a) Outlet temperature

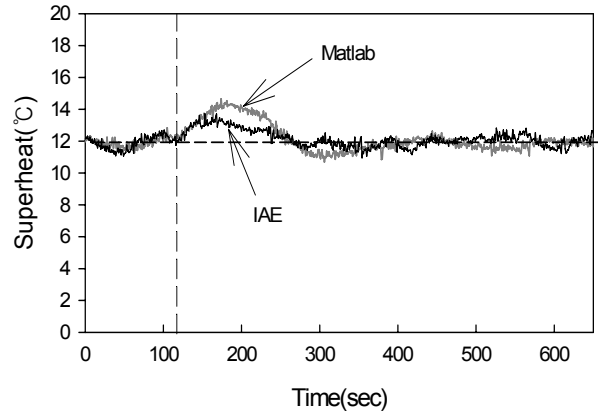


(b) Superheat

Fig. 9 Behavior of control variables versus set point change.



(a) Outlet temperature



(b) Superheat

Fig. 10 Behavior of control variables versus load variation.

#### 4.2 1차 지연시스템에 대한 제어 성능의 일반성

위 제 4.1절에서 언급한 제어 결과는 1차 지연요소인 모든 시스템에 대해 일반성을 가져야 한다. 식 (11)과 식(12)는 앞서 구한 식(9), 식(10)의 특성 파라미터 값인 시정수와 DC 게인을 각각 100%씩 증가시켰을 때의 전달함수이다.

$$G_{e1}(s) = \frac{-0.0614}{110s + 1} \quad (11)$$

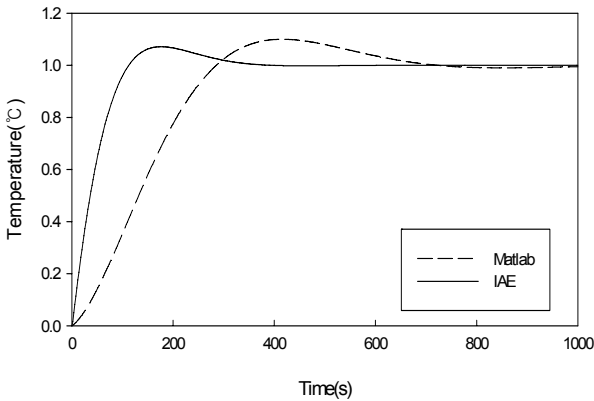
$$G_{e1}(s) = \frac{-0.2}{50s + 1} \quad (12)$$

Table 4는 이들 전달함수를 바탕으로 최적화 기법의 IAE 및 매트랩 PID 튜너를 이용하여 위 실험에서의 경우와 동일한 방법으로 구한 압축기 및 EEV의 PI 게인  $K_P$ ,  $K_I$ 를 각각 보인다.

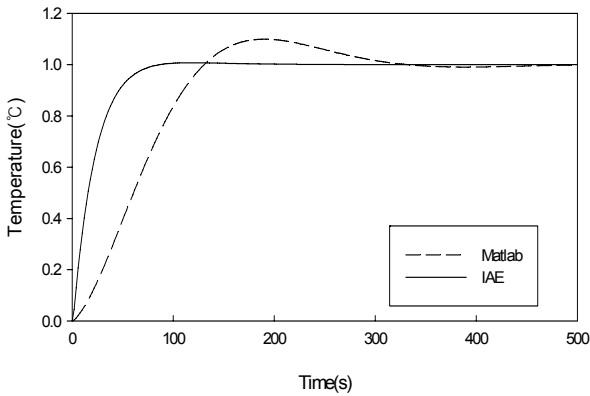
Table 4 PI gains versus system parameter variation

System	Method	$K_P$	$K_I$
Compressor	$G_{e1}$ Matlab	2.8	0.144
	IAE	30	0.52
EEV	$G_{e1}$ Matlab	0.87	0.097
	IAE	11.5	0.26

Fig. 11은 식(11)과 식(12)에 Table 4의 게인을 적용시킨 페루프 시스템의 인디셜 응답이다. 이 결과로부터 정착시간과 오버슈트의 과도 특성 모두 IAE에 의한 게인을 적용시킨 경우가 매트랩 튜너에 의한 게인 적용의 경우보다 우수함을 보였다. 이러한 제어 성능 결과는 식(9)와 식(10)의 특성값들을 50%로 감소시킨 경우의 시뮬레이션에서도 동일한 양상을 보였다. 따라서 시스템이 1차 지연요소일



(a) Outlet temperature



(b) Superheat

Fig. 11 Indicial response versus system parameter variation.

경우, 평가함수 IAE에 의한 계인이 매트랩 튜너에 의한 계인보다 양호한 과도 특성을 일관되게 보임을 알 수 있다.

4.3 외란 변동에 따른 동특성 비교

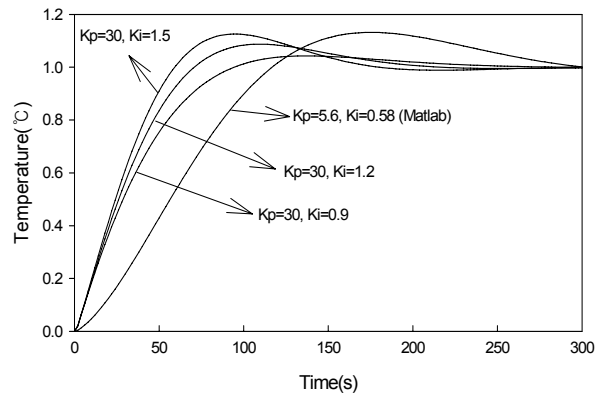
IAE에 의한 계인 결정시 가정된 외란의 크기를 변경시켰을 경우에도 4.1절에 언급한 동일한 제어 결과를 보이는지 시뮬레이션으로 확인한다.

Table 5는 식(9), 식(10)의 시스템에 다양한 외란 인가 시 IAE에 의한 계인  $K_p$ ,  $K_I$ 의 몇 가지 예를 나타낸다. 외란 정현파의 진폭과 주파수, 펄스의 크기 등은 제 3.2절의 실험에서와 동일하게 하되, 정현파 또는 펄스만을 인가하거나 외란 자체를 입력하지 않는 다양한 경우들을 가정하였다.

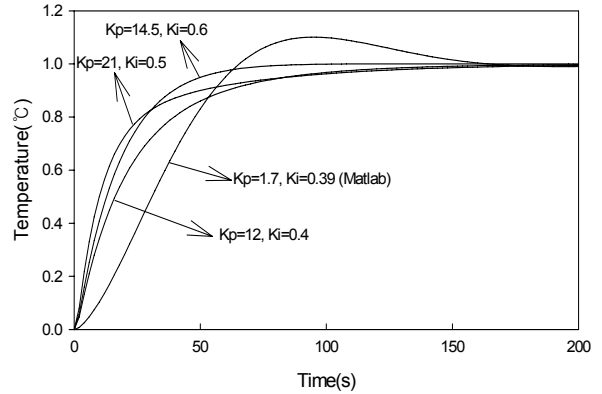
Fig. 12는 Table 5와 같은 외란이 인가되었을 경우의 오일 출구 온도 및 과열도의 인디셜 응답이다. 압축기 제어시스템의  $K_p$ 는 30으로 제한했기 때문

Table 5 PI gains versus disturbance change

Disturbance input	Compressor		EEV	
	$K_p$	$K_I$	$K_p$	$K_I$
Sinusoidal wave only	30	1.5	14.5	0.6
Single pulse only	30	0.9	21	0.5
Without disturbance	30	1.2	12	0.4



(a) Outlet temperature



(b) Superheat

Fig. 12 Indicial response versus disturbance variation.

에 외란에 따른 변동은 없으며,  $K_I$ 는 0.9에서 1.5까지 변동하였다. EEV 제어시스템의  $K_p$ 는 12에서 21까지,  $K_I$ 는 0.4에서 0.6까지 변동하였다. 그림에서 외란이 변경되더라도 IAE에 의한 계인은 매트랩 튜너로 구한 계인보다 과도 응답이 더 우수하게 나타났다. 따라서 IAE에 의한 계인 결정법은 다양한 외란을 설계 초기 단계에서 고려할 수 있으며, 응답 또한 우수함을 알 수 있다. 다만 매트랩 계인 결정시 튜닝 방법이 본 논문에서 적용한 일반적인 방법과 다를 경우 제어 결과도 다르게 나올 수 있음을



유의할 필요가 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 오일쿨러의 출구 온도와 과열도를 제어할 목적으로 PI 제어기의 최적 게인 결정법에 대해 검토하였다. 최적화 기법에 널리 사용되고 있는 대표적인 평가함수들과 현장 엔지니어들에게 선호도가 높은 매트랩의 PID 튜너에 의한 일반적인 게인 결정법을 대상으로 시뮬레이션 및 실험을 통해 설계된 제어기의 성능을 비교 검토하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 평가함수 가운데 IAE와 ITAE의 제어 성능은 비슷하였고 ISE보다는 더 우수한 성능을 보였다.

(2) 실험에서 IAE에 의한 게인이 매트랩 튜너로 구한 게인보다 양호한 과도 응답을 보였다. 이는 IAE 게인이 대역폭과 위상여유를 더 크게 만들기 때문인 것으로 추정되었다.

(3) 실험에서 정상상태오차는 두 방법에 의한 게인별 차이가 거의 없지만, 정착시간과 오버슈트는 IAE에 의한 게인이 더 양호한 특성을 보였다.

(4) 시뮬레이션 결과 1차 지연요소인 경우, IAE 게인의 우수성은 일반성을 갖는 것으로 나타났다.

(5) 본 논문에서 검토한 외란의 종류와 크기에 관계없이 IAE 게인의 제어 성능이 매트랩 튜너로 구한 게인의 성능보다 우수하게 나타났다.

본 논문에서 검토한 최적 PI 제어기 설계법은 특정 평가함수를 충족하는 최적성을 보장할 뿐만 아니라 설계 단계에서 외란의 영향을 고려할 수 있고, 게인 결정 또한 쉬우므로 현장의 엔지니어들에게 유용한 설계 방법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- Lee, S. W., Yeom, H. K., and Park, K. J., 2009, Performance of Hot Gas Bypass Type Oil Cooler System, *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 73-80.
- 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.
- Jeong, S. K., Lee, D. B., and 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. 24, No. 1, pp. 1-8.
- Hua, L., Jeong, S. K., and You, S. S., 2009, Feedforward Control of Capacity and Super-heat for a Variable Speed Refrigeration System, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1067-1074.
- Jeong, S. K. and Kim, S. H., 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.
- Kim, S. C., Hong, D. S., and Chung, W. J., 2004, Temperature Control for an Oil Cooler System Using PID Control with Fuzzy Logic, *Journal of the Korea Society for Machine Tool Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 87-94.
- Aprea, C., Mastrullo, R., and Renno, C., 2004, Fuzzy Control of the Compressor Speed in a Refrigeration Plant, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, pp. 639-648.
- Jeong, S. K., Byun, J. Y., Kim, S. H., and Yoon, J. I., 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.
- Oh, S. R., 2009, The Design of PI Controller Using a Saturation Function in Frequency Domain, *Information and Control Symposium*, pp. 326-328.
- Cogan, B., de Paor, A. M., and Quinn, A., 2009, PI Control of First-order Lag Plus Time-delay Plants : Root Locus Design for Optimal Stability, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 31, No. 5, pp. 365-379.
- Kim, M. J., Lee, Y. H., So, M. O., Ha, Y. S., Hwang, S. W., and Jin, G. K., 2007, Tuning Rules of the PID Controller Using RCGAs, *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 448-454.