

# 큰 時定數를 갖는 熱交換系統에 있어서의 最適 溫度制御에 關한 研究

河 潤 秀<sup>1)</sup> · 河 注 植<sup>2)</sup>

## A Study on the Optimal Temperature Control of a Heat Exchanging System with a Large Time Constant

*Yun-Soo Ha, Joo-Shik Ha*

< 目 次 >	
Abstract	第 5 章 시뮬레이션 및 結果檢討
記號說明	5.1 制御對象의 定數決定
第 1 章 序 論	5.2 시뮬레이션 및 檢討
第 2 章 모델링	第 6 章 結 論
第 3 章 最適 制御器 設計	參考文獻
第 4 章 狀態觀測器 設計	

### Abstract

A method to design the optimal controller for the temperature control of heat exchanging systems with a large time constant is proposed. In order to remove the off-set, which can be caused by the disturbances such as parameter variations during the operation, modeling errors and changes of circumstances, one integrator is augmented in the forward path of the system and the optimal control theory is applied in the augmented system.

For the realization of the controller in industrial applications, feedbacks of all the state variables are required. However, it is generally difficult or costly to measure the angular velocity. Therefore, in this study, the angular velocity ( $x_3$ ), estimated by an observer from the angular position ( $x_2$ ) and the control input ( $u$ ), is fed back for the economical implementation.

1) 한국해양대학 조교  
2) 한국해양대학 교수

In order to show the effectiveness of the temperature control system designed by the proposed method, computer simulations are performed and the results are compared with the PI type of control algorithms.

### 記號說明

- A :  $3 \times 3$  coefficient matrix of the system  
 $\tilde{A}$  :  $4 \times 4$  coefficient matrix of the augmented system  
 $A_e$  :  $1 \times 2$  coefficient matrix of the observer  
B :  $3 \times 1$  control input coefficient vector of the system  
 $\tilde{B}$  :  $4 \times 1$  control input coefficient vector of the augmented system  
 $B_e$  :  $2 \times 1$  control input coefficient vector of the observer  
C :  $1 \times 3$  output coefficient vector of the system  
 $\tilde{C}$  :  $1 \times 4$  output coefficient vector of the augmented system  
 $C_e$  :  $1 \times 2$  output coefficient vector of the observer  
d :  $3 \times 1$  external disturbance vector  
 $\tilde{d}$  :  $4 \times 1$  augmented external disturbance vector  
G :  $1 \times 2$  feedback gain matrix of the observer  
 $k_s$  : Gain of the actuator  
 $k_e$  : Gain of the heat exchanger  
 $\tilde{K}$  :  $1 \times 4$  optimal feedback gain matrix of the augmented system  
 $\tilde{P}$  :  $4 \times 1$  solution matrix of the riccati matrix equation  
 $\tilde{Q}$  :  $4 \times 4$  weighting matrix  
 $\tilde{R}$  : Scalar weighting coefficient  
 $T_0$  : Time constant of the heat exchanger  
u :  $1 \times 1$  control input  
 $u_r$  :  $1 \times 1$  control input of the reference model  
 $\Delta u$  :  $1 \times 1$  error control input  
X :  $3 \times 1$  state vector  
 $X_r$  :  $3 \times 1$  state vector of the reference model  
 $\Delta X$  :  $3 \times 1$  error state vector  
 $\tilde{X}$  :  $4 \times 1$  state vector of the augmented system  
 $\tilde{X}_e$  :  $2 \times 1$  estimated state vector of the observer

- $z$  : State variable  
 $\rho$  : Rank of a matrix  
 $\zeta$  : Damping factor  
 $\omega$  : Angular velocity  
 $\omega_n$  : Specific angular frequency  
 $\theta$  : Angular position

## 第 1 章 序 論

현재까지 많은 산업현장의 熱交換系統의 溫度制御시스템으로는 PI 또는 PID制御方式이 주로 이용되어져 왔는데 이러한 시스템에 있어서는 制御量만을 測定하여 피이드백하기 때문에 制御器의 구성이 簡單하고 또한 經濟的이었다. 그러나 이와같이 制御量만을 피이드백하는 경우는 한정된 정보만으로 制御를 행하기 때문에 요구되어지는 制御特性을 얻는데는 한계가 있을 뿐만 아니라 制御對象에 따라 파라미터 調整法을 적용하는데 어려움이 따른다. 예를들면 制御對象이 2차계인 경우 限界感度法(Ultimate sensitivity method)<sup>1)</sup>을 적용할 수 없고 Chohen-Coon법 (Chohen-Coon method)<sup>2)</sup>은 3차이상의 高次系에 적용할 수 없다. 또한 過渡應答法(Transient response method)<sup>3)</sup>은 制御對象이 高次系일 경우에 時定數와 遲延時間이 일률적으로 결정되지 않는 결점이 있고 修正된 Ziegler-Nichols법 (Modified Ziegler-Nichols method)<sup>4)</sup>을 이용하면 積分時間과 微分時間은 一義적으로 구할 수 있으나 比例感度は 결정되지 않는 경우가 있다. 더우기 이들 방법들은 實驗的 또는 經驗的 方法에 불과하여 명확한 과학적 근거가 없기 때문에 P, PI, PD, PID制御器중에서 어느 制御器를 택할 것이냐에 대한 명확한 기준이 없다는 것이 難點으로 지적되고 있다. 이와같은 문제 이외에도 時定數가 큰 熱交換器를 制御對象으로 하여 制御할 때는 느린 應答를 주거나 亂調(Hunting)現象을 일으킬 수도 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 從來의 制御 方法에서 일어날 수 있는 問題點들을 改善하면서 선박이나 육상의 발전소 등에 사용되고 있는 時定數가 큰 熱交換시스템의 溫度制御에 적합한 制御알고리즘을 개발하고자 한다. 이를 위하여 먼저 액츄에이터, 制御밸브 및 熱交換器를 포함한 制御對象을 動作溫度 附近에서 線型化하여 3차계로 모델링한다. 또한 制御시스템은 目標值 變化에 出力이 잘 追從하고 모델링 오차, 운전중 시스템의 파라미터 변화와 같은 外亂등의 영향으로 인하여 발생할 수 있는 定常偏差가 제거되도록 고려되어야 하므로 이를 위하여 制御對象의 前向方向에 積分器를 하나 부가하여 擴張된 시스템에 最適制御 手法를 적용하여 制御器를 設計한다.

실제 制御시스템에 적용하여 制御器를 구성할 때 測定裝置를 통하여 熱交換器의 出口溫

度, 減速기어에서의 角變位 및 角速度 측정 이 요구되어 지는데 出口溫度와 角變位는 각각 Thermocouple과 Potentiometer와 같은 저렴한 測定裝置를 이용하여 측정할 수 있으나 角速度를 측정하는 Tachogenerator는 일반적으로 高價일 뿐만 아니라 실측하는 경우에는 雜音을 同伴할 수도 있다. 따라서 角速度를 직접 측정하지 않고 다른 測定信號로 부터 推定하여 이용할 수 있도록 狀態觀測器를 설계한다.

본 논문에서 제안한 방법으로 제어를 행하였을 경우 제어시스템의 追從性能 및 시스템에 일정한 外亂이 부과되거나 운전중 파라미터의 변화에도 定常偏差가 제거 될 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 밝히고 이러한 결과와 3차계이상의 制御對象에도 적용할 수 있는 Ziegler-Nichols의 過渡應答法으로 조정된 PI制御器를 가지는 制御시스템의 制御性能과를 比較 分析 함으로써 본 방법의 타당성을 입증한다.

## 第2章 모델링

선박기관등 산업용에 많이 이용되는 溫度制御시스템에서 制御對象은 일반적으로 Fig. 1과 같이 구성되어진다. 이러한 시스템에서는 액츄에이터의 入力  $u(t)$ 에 따라 制御밸브의 開도가 변화하여 熱交換器로 들어가는 流量이 調節됨으로써 出力  $y(t)$ 가 원하는 溫度로 유지된다.

Fig. 1을 블록선도로 표시하면 Fig. 2와 같게된다.

본 논문에서는 制御밸브 驅動用 액츄에이터로 Total Automation社의 SQR. 65.1과 같이 單位裝置로 개발되어 시판되고 있는 제품을 사용하는 것으로 간주하여 2차계로 近似化한다. 또한 制御밸브의 變位變化에 대한 流量變化는 動作點 溫度에서 近似的으로 比例關係를 가지며, 熱交換器는 動作點 溫度에서 1차계로 近似化<sup>5)</sup>할 수 있다. 이때 액츄에이터 驅動모터의 쿨롱摩擦 (Coulomb Friction) 磁氣 히스테리시스(Hysteresis), 減速齒車의 백

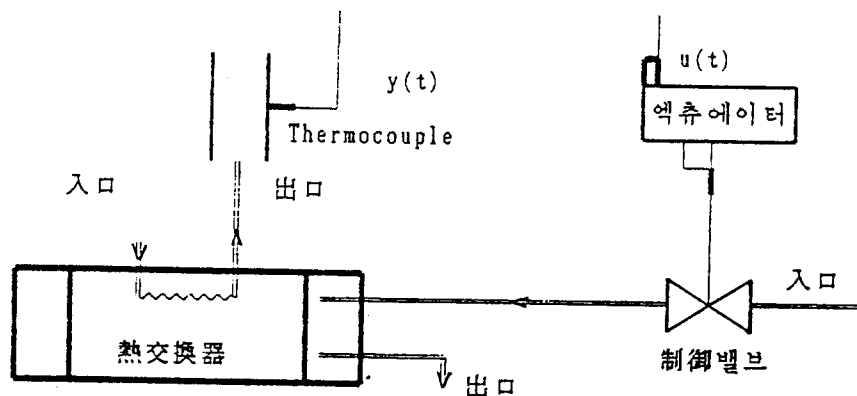


Fig. 1 Controlled plant

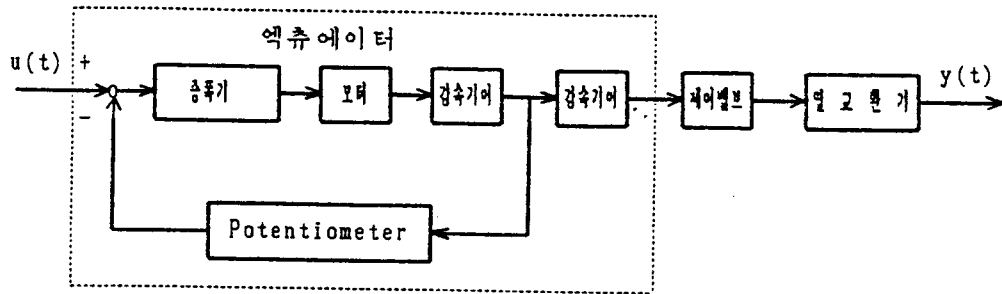


Fig. 2 Block diagram of the Controlled plant

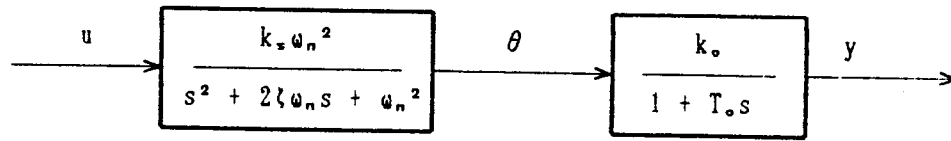


Fig. 3 Black diagram of the open loop system

레쉬(Backlash), 制御밸브의 庫容摩擦과 靜的摩擦(Stiction) 등 非線型要素들의 影響은 적은 것으로 간주하여 무시한다. 따라서 Fig. 2의 블록선도는 각 신호간의 傳達函數로 표시하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 블록선도에서

$k_s$  : 액츄에이터의 定常利得

$\zeta$  : 減衰率

$\omega_n$  : 固有角周波數

$k_o$  : 熱交換器의 定常利得

$T_o$  : 熱交換器의 時定數

이고 狀態變數로 出力溫度  $y$ 를  $x_1$ , 減速기어에서의 角變位  $\theta$ 와 角速度  $\omega$ 를 각각  $x_2$ ,  $x_3$ 로 두고 狀態方程式과 出力方程式을 유도하면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu + d \\ y &= CX \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$X = [x_1, x_2, x_3]^T$  :  $3 \times 1$  狀態벡터

$u$  :  $1 \times 1$  액츄에이터의 入力電壓

$y$  :  $1 \times 1$  出力溫度

$d$  :  $3 \times 1$  外亂

$$A = \begin{pmatrix} -1/T_0 & k_0/T_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_s\omega_n^2 \end{pmatrix}, \quad C^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

이다.

식(1)로 표시되는 閉回路시스템에서 外亂  $d$ 는 측정할 수는 없으나 일정한 것으로 간주하며, 可制御行列(Controllability Matrix)  $W_c$ 는

$$W_c = [B \quad AB \quad A^2B]$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{k_0 k_s \omega_n^2}{T_0} \\ 0 & k_s \omega_n^2 & -2k_s \zeta \omega_n^3 \\ k_s \omega_n^2 & -2k_s \zeta \omega_n^3 & \omega_n^4 k_s (4\zeta^2 - 1) \end{pmatrix}$$

가 되어  $k_0, k_s, \omega_n, T_0$ 의 값들이 0이 아닌 한  $\rho(W_c) = 3$ 이 되어 可制御(Controllable) 함으로 閉回路 制御시스템의 極을 複素平面的 원하는 위치에 배치되도록 狀態피드백 制御器를 구성할 수 있다.

第 2 章 最 適 制 御 器 設 計

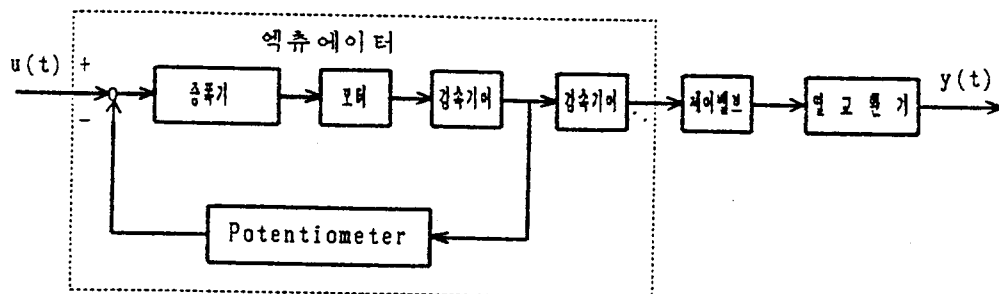


Fig. 2 Block diagram of the Controlled plant

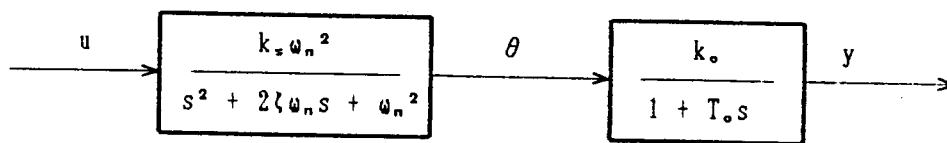


Fig. 3 Black diagram of the open loop system

레쉬(Backlash), 制御밸브의 쿠롱摩擦과 靜的摩擦(Stiction) 등 非線型要素들의 影響은 적은 것으로 간주하여 무시한다. 따라서 Fig. 2의 블록선도는 각 신호간의 傳達函數로 표시하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 블록선도에서

$k_s$  : 액츄에이터의 定常利得

$\zeta$  : 減衰率

$\omega_n$  : 固有角周波數

$k_o$  : 熱交換器의 定常利得

$T_o$  : 熱交換器의 時定數

이고 狀態變數로 出力溫度  $y$ 를  $x_1$ , 減速기어에서의 角變位  $\theta$ 와 角速度  $\omega$ 를 각각  $x_2$ ,  $x_3$ 로 두고 狀態方程式과 出力方程式을 유도하면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu + d \\ y &= CX \end{aligned} \tag{1}$$

여기서

$X = [x_1, x_2, x_3]^T$  :  $3 \times 1$  狀態벡터

$u$  :  $1 \times 1$  액츄에이터의 入力電壓

$y$  :  $1 \times 1$  出力溫度

$d$  :  $3 \times 1$  外亂

$$A = \begin{pmatrix} -1/T_0 & k_0/T_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_s\omega_n^2 \end{pmatrix}, \quad C^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

이다.

식(1)로 표시되는 閉回路시스템에서 外亂  $d$ 는 측정할 수는 없으나 일정한 것으로 간주하며, 可制御行列(Controllability Matrix)  $W_c$ 는

$$W_c = [B \quad AB \quad A^2B] \\ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{k_0 k_s \omega_n^2}{T_0} \\ 0 & k_s \omega_n^2 & -2k_s \zeta \omega_n^3 \\ k_s \omega_n^2 & -2k_s \zeta \omega_n^3 & \omega_n^4 k_s (4\zeta^2 - 1) \end{pmatrix}$$

가 되어  $k_0, k_s, \omega_n, T_0$ 의 값들이 0이 아닌 한  $\rho(W_c) = 3$ 이 되어 可制御(Controllable)하므로 閉回路 制御시스템의 極을 複素平面的의 원하는 위치에 배치되도록 狀態피드백 制御器를 구성할 수 있다.

### 第3章 最適 制御器 設計

본 연구에서는 운전중 目標值를 변화시켰을 경우 또는 外亂에 의해서 出力이 변할 때 制御시스템에 요구되는 過渡特性的의 許容範圍를 만족하면서 出力이 目標值에 定常偏差 없이 잘 追從할 수 있는 制御器를 설계하기 위해서 最適制御理論을 적용하기로 한다. 위와 같은 制御性能을 주는 制御器를 설계하기 위하여 階段狀의 目標值 變化에 대한 狀態벡터  $X$ 와 制御入力  $u$ 의 正常狀態의 값  $X_r, u_r$ 을 식(1)로 부터 구하기로 한다.

$$\begin{aligned} 0 &= AX_r + Bu_r \\ y_r &= CX_r \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)로 부터

$$\begin{pmatrix} X_r \\ \dots \\ u_r \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} AB \\ C \quad 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ y_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_r \\ y_r/k_0 \\ 0 \\ \dots \\ y_r/k_0 k_s \end{pmatrix} \quad (3)$$

식(3)과 같이  $X_r, u_r$ 을 구할 수 있어서 目標值를 追從하는 制御器를 구성할 수 있다. <sup>6),7),8)</sup>



制御시스템은 운전중의 파라미터 변화, 制御시스템을 설계할때 발생될 수 있는 모델링 誤差, 외부에서 들어올 수 있는 外亂등의 영향으로 인해 定常狀態에서 偏差가 발생할 수도 있으므로 이를 제거하기 위하여 狀態變數  $z$ 를 다음과 같이 정의 하여 制御對象의 出力 側에 부가하도록 한다.

$$z = \int (y - y_r) dt \quad (4)$$

한편  $\Delta X$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta y$ 를 식(5)와 같이 정의하고

$$\begin{aligned} \Delta X &= X - X_r \\ \Delta u &= u - u_r \\ \Delta y &= y - y_r \end{aligned} \quad (5)$$

식(1)를 다시 쓰면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\Delta \bar{X}} &= \tilde{A} \Delta \bar{X} + \tilde{B} \Delta u + \tilde{d} \\ \Delta y &= \tilde{C} \Delta \bar{X} \end{aligned} \quad (6)$$

단,  $\Delta \bar{X} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ z \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{B} = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{C} = \begin{pmatrix} C \\ 0 \end{pmatrix}^T$ ,  $\tilde{d} = \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix}$

식(6)으로 표시된 새로운 시스템은 擴張하기 前의 시스템이 可制御하고 다음 行列의 Rank가

$$\rho \begin{pmatrix} B & A \\ 0 & C \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} 1 & -1/T_0 & k_0/T_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta \omega_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = 4$$

가 되므로 역시 可制御함을 알 수 있다.<sup>9)</sup>

식(6)로 표현되는 시스템을 安定하게 하고 다음의 評價函數

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta \bar{X}^T \tilde{Q} \Delta \bar{X} + \Delta u^T \tilde{R} \Delta u) dt \quad (7)$$

$$\text{단, } \tilde{Q} = \tilde{Q}^T \geq 0, \tilde{R} > 0$$

를 最小로 하는 制御入力  $\Delta u$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta u = -\tilde{K} \Delta \bar{X} \quad (8)$$

여기서  $\tilde{K} = \tilde{B}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{P}$ 이며  $\tilde{P}$ 는 다음 Riccati 行列 方程式의 解가 된다.

$$\tilde{A}^T \tilde{P} + \tilde{P} \tilde{A} + \tilde{Q} - \tilde{P} \tilde{B} \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} = 0$$

식(8)에 식(5)를 대입하여 u에 관하여 정리하면

$$\begin{aligned}
 u &= u_r - \tilde{K} \Delta \tilde{X} \\
 &= u_r - \tilde{K}_1 \Delta \tilde{X} - k_2 z \\
 &= u_r - \tilde{K}_1 (X - X_r) - k_2 \int (y - y_r) dt \\
 \text{단, } \tilde{K} &= [\tilde{K}_1 \quad k_2]
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

와 같게 되고 식(9)로 표현되는 狀態피드백 제어를 갖는 溫度制御시스템을 블록선도로 표시하면 Fig. 4와 같다.

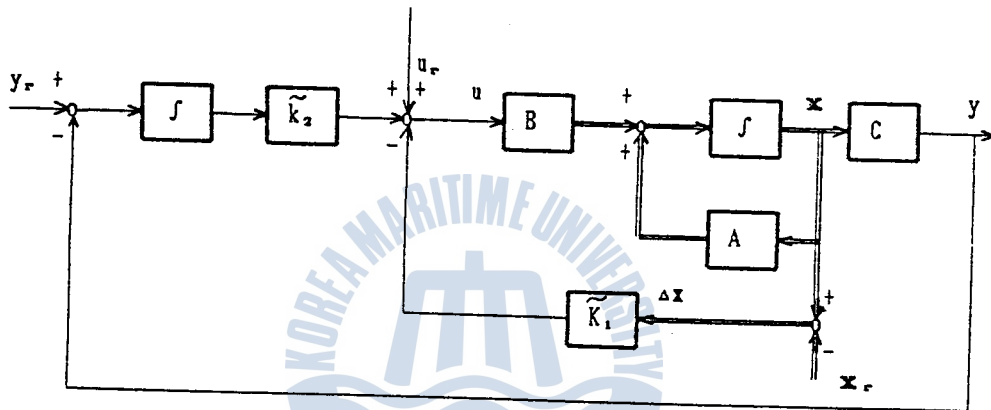


Fig. 4 Block diagram of the temperature control system

식(3)의 결과를 식(9)에 대입하여 制御入力 u를 다시 쓰면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 u &= y_r / (k_0 k_s) - k_{11} (x_1 - y_r) - k_{12} [x_2 - (y_r / k_0)] - k_{13} x_3 - k_2 \int (y - y_r) dt \\
 \text{단, } \tilde{K}_1 &= [k_{11} \quad k_{12} \quad k_{13}]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

식(10)으로 피드백하는 실제 制御시스템을 구성할 때 모든 狀態變數  $x_1, x_2, x_3$ 의 측정이 요구되어진다. 그러나 角速度  $x_3$ 를 측정하는 장치는 일반적으로 高價일 뿐만 아니라 실제 측정 하고자 할 경우에 많은 雜音을 同伴할 수도 있으므로 測定裝置를 이용하지 않고 狀態觀測器를 이용하여 制御入力 u와 角變位  $x_2$ 로 부터  $x_3$ 를 推定하여 이용하기로 한다.

#### 第 4 章 狀態觀測器의 設計

狀態피드백 제어를 할 경우, 모든 狀態變數가 측정되어 피드백 되어져야 하나 모든 狀態變數를 계측할 수 없는 경우에는 狀態觀測器의 설계가 요구되어 진다. 본 논문에서는 狀態變數  $x_1, x_2$ 는 값싼 측정장치를 이용하여 손쉽게 측정가능하지만 角速度  $x_3$ 를 측정

하는 장치는 일반적으로 高價일 뿐만 아니라 실제 측정하고자 할 경우에 많은 雜音을 同 伴할 수도 있다. 따라서 制御入力  $u$ 와 角變位  $x_2$ 로 부터  $x_3$ 을 推定하도록 Luenberger型의 狀態觀測器<sup>10),11),12)</sup>를 설계하기 위하여 식(1)의 狀態方程式으로 부터  $x_2, x_3$ 에 대한 방 정식을 쓰면 식(11)과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_e &= A_e X_e + B_e u \\ y_e &= C_e X_e \end{aligned} \tag{11}$$

여기서

$$X_e = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, A_e = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{pmatrix}, B_e = \begin{pmatrix} 0 \\ k_s\omega_n^2 \end{pmatrix}, C_e^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

위 방정식에서 可觀測行列  $W_0$ 의 Rank를 구해보면

$$\rho(W_0) = \rho \begin{pmatrix} C_e \\ C_e A_e \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = 2$$

가 되어 狀態觀測器를 구성하여 狀態變數  $x_3$ 를 推定할 수 있다. 식(11)로 부터 Luenberger型의 狀態觀測器는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\dot{\hat{X}}_e = A_e \hat{X}_e + B_e u + G(y_e - C_e \hat{X}_e) \tag{12}$$

여기서  $G = [g_1 \ g_2]$ 는 狀態觀測器의 피이드백 利得行列로서 安定하기 위하여 特性方程式  $\Delta(\lambda) = \det[\lambda I - A_e + GC_e]$ 의 根이 모두 陰의 實數部 값을 갖도록 선정되어진다. 그런데 狀態觀測器의 推定速度를 높이기 위하여  $G$ 의 값을 크게하면 오버슈트가 발생되거나 外部에서 들어오는 雜音이 增幅될 수가 있으며 반대로  $G$ 의 값을 적게하면 推定速度가 느리게 된다. 따라서 制御시스템을 설계할때 요구되어지는 설계사양에 따라 적절히 선정되 어져야 할 것이다.

식(9)의 制御入力和 식(12)로 표현되는 觀測器를 갖는 制御시스템을 구성하면 Fig.5와 같다.

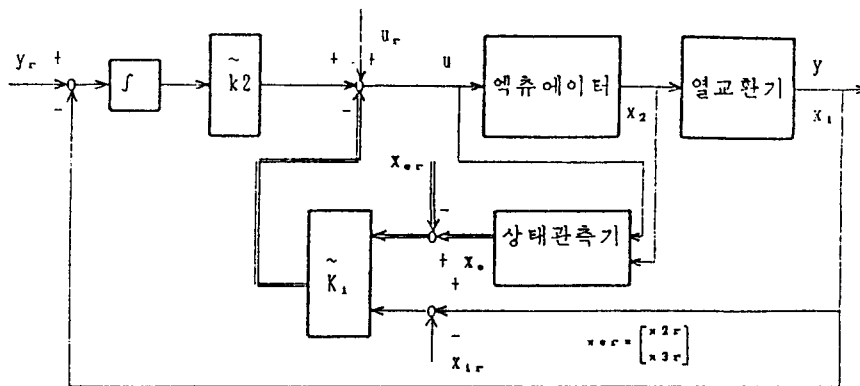


Fig. 5 Block diagram of the temperature control system with the observer

## 第 5 章 시뮬레이션 및 結果檢討

### 5.1 制御對象의 定數 決定

본 연구에서 제안한 설계방법의 타당성을 밝히기 위하여 大型船舶 主機關의 冷却水 入口溫度 즉 溫度制御시스템의 出口溫度를 일정하게 유지케하는 장치를 制御對象으로 선정하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하기로 하며 이에 필요한 각 정수들을 적절히 선정하기로 한다. 먼저 制御밸브 驅動用 액츄에이터로는 單位裝置로 개발되어 시판되고 있는 Total Automation社의 SQR. 65.1이 이용되는 것으로 간주하였으며 應答實驗을 통해 액츄에이터의 파라미터를 구하기로 한다. 파라미터를 구하기 위한 實驗裝置의 구성을 보면 Photo. 1과 같고 SQR. 65.1 裝置의 諸元을 보면 다음과 같다.

作動機能 : 比例作動式

使用모터 : 싱크로 모터

電 原 : AC 24V (50/60Hz)

作動速度 : 120s/60Hz

Stroke : 0-40mm

Force : 500N

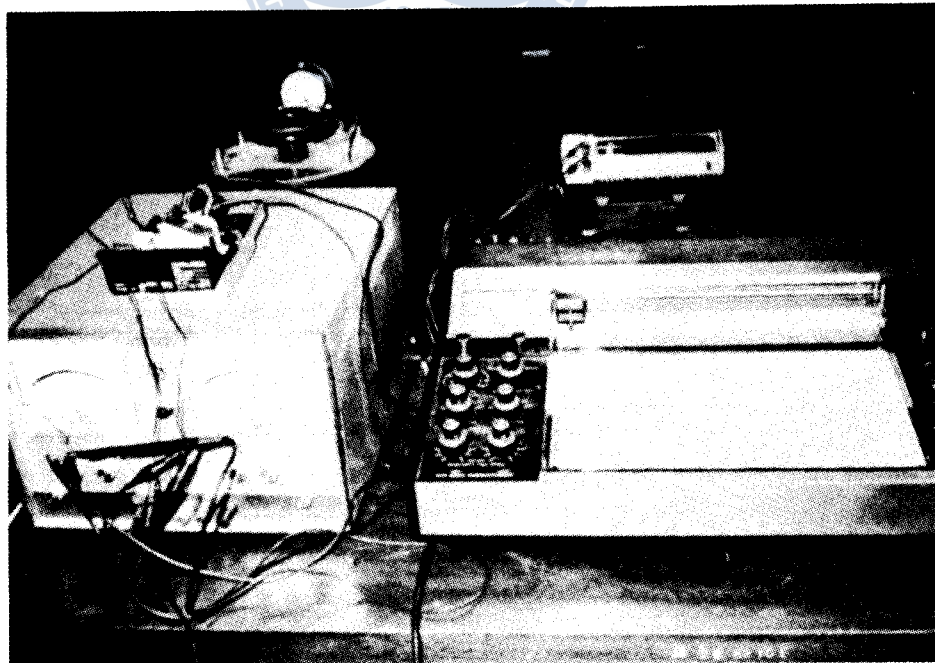


Photo.1 Experimental apparatus

이상과 같은 機器들로 구성된 實驗裝置로 부터 應答實驗을 행하여 에츠크에이터의 파라미터를 구하였고 制御밸브를 포함한 熱交換器의 定數들은 大型船舶 主機關의 冷却水 溫度制御裝置의 통상의 운전데이터를 감안하여 動作點溫度(55℃)에서 線型化하여 적절히 選定하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 두개의 制御對象은 다음과 같다.

制御對象 I :  $k_s=7.59$

$$\zeta = 1.294$$

$$\omega_n = 0.0966$$

$$k_o = 2.2$$

$$T_o = 20$$

制御對象 II :  $k_s=7.59$

$$\zeta = 1.294$$

$$\omega_n = 0.0966$$

$$k_o = 2.2$$

$$T_o = 40$$

## 5.2 시뮬레이션 및 檢討

선박이나 육상의 발전시스템에 사용되어지고 있는 時定數가 큰 熱交換機의 溫度制御시스템을 설계하는 데 있어서는 액츠크에이터, 制御用밸브 및 熱交換機를 포함한 制御對象의 動特性이 파악되어져야함은 물론 制御시스템에 요구되어지는 설계사양들 까지 고려되어져야 한다. 그러나 실제 이러한 制御시스템의 예를 보면 요구되어지는 過渡特性이나 설계사양을 충분히 考慮하기 보다는 선박의 진동이나 파도로 부터의 충격등 特殊한 環境에서의 運轉條件만 考慮하다 보니 자연히 이 분야의 연구가 制御시스템의 正確性에 대한 검토는 결여된 채 信賴性에만 치중해온 것을 알수 있다. 溫度制御시스템은 비단 선박이나 육상의 발전소 뿐만 아니라 많은 산업 분야에 이용되고 있는 점으로 보아 制御시스템의 信賴度와 함께 正確度에 관한 문제도 考慮되어져야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 從來의 大型船舶의 主機關冷却水 溫度制御시스템에서의 過渡特性 보다 엄격히 제한하여 설계사양을 다음과 같이 가정했을 때

오버슈트(Overshoot) :  $M_p \leq 30(\%)$

도달시간(Rise Time) :  $t_r \leq 30(\text{sec})$

정정시간(Settling Time) :  $t_s \leq 180(\text{sec})$

제어입력(Control Input) :  $|u| \leq 10(V)$

대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행한다. 이때 狀態觀測器의 피이드백利得行列 $G$ 는 特性方程式  $\det[\lambda I - A_e + GC_e]$ 의 두 根이  $-0.1, -0.2$ 가 되도록 선정되어진다. 또한 본 논문에서 제안한 방법으로 부터 얻은 應答을 같은 制御對象에 대하여 Ziegler-Nichols의 過渡應答法으로 調整된 PI制御기를 갖는 시스템의 應答과 서로 比較檢討 하기로 한다.

Fig. 6은 制御對象 I에 대하여 본 논문에 제안한 방법으로 구성된 制御시스템을  $55^{\circ}\text{C}$ 로 운전중 目標值를  $60^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켰을 경우의 出力應答을 그린 것이며 Fig. 7은 같은 制御對象에 대하여 Ziegler-Nichols의 過渡應答法으로 比例感度  $k_p=0.324$ , 積分時間  $T_i=33$ 이 되게 조정된 PI制御器를 갖는 시스템에서 Fig. 6과 동일하게 目標值를 변화시켰을 때의 出力應答을 그린 것이다. Fig. 6은 出力應答이 前提한 실제사양들을 만족하며 定常偏差가 생기지 않음을 알 수 있다, 그러나 Fig. 7은 制御量만을 피이드백하여 제어함으로서



이상과 같은 機器들로 구성된 實驗裝置로 부터 應答實驗을 행하여 에츄에이터의 파라미터를 구하였고 制御밸브를 포함한 熱交換器의 定數들은 大型船舶 主機關의 冷却水 溫度制御裝置의 통상의 운전데이터를 감안하여 動作點溫度(55℃)에서 線型化하여 적절히 選定하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 두개의 制御對象은 다음과 같다.

制御對象 I :  $k_s = 7.59$

$$\zeta = 1.294$$

$$\omega_n = 0.0966$$

$$k_0 = 2.2$$

$$T_0 = 20$$

制御對象 II :  $k_s = 7.59$

$$\zeta = 1.294$$

$$\omega_n = 0.0966$$

$$k_0 = 2.2$$

$$T_0 = 40$$

## 5.2 시뮬레이션 및 檢討

선박이나 육상의 발전시스템에 사용되어지고 있는 時定數가 큰 熱交換機의 溫度制御시스템을 설계하는 데 있어서는 액츄에이터, 制御用밸브 및 熱交換機를 포함한 制御對象의 動特性이 파악되어져야함은 물론 制御시스템에 요구되어지는 설계사양들 까지 고려되어져야 한다. 그러나 실제 이러한 制御시스템의 예를 보면 요구되어지는 過渡特性이나 설계사양을 충분히 考慮하기 보다는 선박의 진동이나 파도로 부터의 충격등 特殊한 環境에서의 運轉條件만 考慮하다 보니 자연히 이 분야의 연구가 制御시스템의 正確性에 대한 검토는 결여된 채 信賴性에만 치중해온 것을 알수 있다. 溫度制御시스템은 비단 선박이나 육상의 발전소 뿐만 아니라 많은 산업 분야에 이용되고 있는 점으로 보아 制御시스템의 信賴度와 함께 正確度에 관한 문제도 考慮되어져야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 從來의 大型船舶의 主機關冷却水 溫度制御시스템에서의 過渡特性 보다 엄격히 제한하여 설계사양을 다음과 같이 가정했을 때

$$\text{오버슈트(Overshoot)} : M_p \leq 30(\%)$$

$$\text{도달시간(Rise Time)} : t_r \leq 30(\text{sec})$$

$$\text{정정시간(Settling Time)} : t_s \leq 180(\text{sec})$$

$$\text{제어입력(Control Input)} : |u| \leq 10(\text{V})$$

제한한 온도제어시스템이 段階狀의 入力에 대하여 出力應答  $y(t)$ 와 制御入力  $u(t)$ 가 위의 설계사양들을 만족하도록 制御器를 설계할 수 있음을 보이기 위하여 두개의 制御對象에

대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행한다. 이때 狀態觀測器의 피드백利得行列G는 特性方程式  $\det[\lambda I - A_e + GC_e]$ 의 두 根이  $-0.1, -0.2$ 가 되도록 선정되어진다. 또한 본 논문에서 제안한 방법으로 부터 얻은 應答을 같은 制御對象에 대하여 Ziegler-Nichols의 過渡應答法으로 調整된 PI制御기를 갖는 시스템의 應答과 서로 比較檢討 하기로 한다.

Fig. 6은 制御對象 I에 대하여 본 논문에서 제안한 방법으로 구성된 制御시스템을  $55^{\circ}\text{C}$ 로 운전중 目標值를  $60^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켰을 경우의 出力應答을 그린 것이며 Fig. 7은 같은 制御對象에 대하여 Ziegler-Nichols의 過渡應答法으로 比例感度  $k_p=0.324$ , 積分時間  $T_i=33$ 이 되게 調整된 PI制御器를 갖는 시스템에서 Fig. 6과 동일하게 目標值를 변화시켰을 때의 出力應答을 그린 것이다. Fig. 6은 出力應答이 前提한 설계사양들을 만족하며 定常偏差가 생기지 않음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7은 制御量만을 피드백하여 제어함으로서 심한 亂調現象이 발생하고 正정시간과 도달시간 모두 길어짐을 보여주고 있다. Fig. 8, 9는 制御對象 I에 대하여 제안한 방법으로 구성된 制御시스템과 PI制御시스템에서의 制御入力 u를 그린 것이다.

Fig. 10은 制御對象 II에 대하여 제안한 방법으로 구성된 制御시스템에서  $55^{\circ}\text{C}$ 로 운전중 目標值를  $60^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켰을 경우의 出力應答을 그린 것이고 Fig. 11은 같은 制御對象에 대하여 比例感度  $k_p=0.352$ , 積分時間  $T_i=42.9$ 가 되도록 調整된 PI制御器를 갖는 시스템의 出力應答을 그린 것이다. Fig. 10, 11로 부터 제안한 방법의 구성된 制御시스템은 制

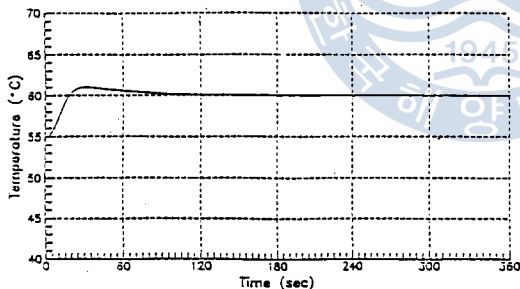


Fig. 6 Step response for the proposed control system ( $T_0=20, k_0=2.2, y_r=60$ )

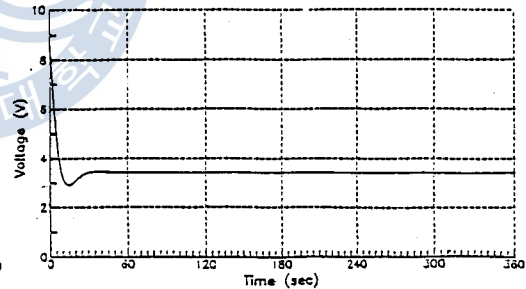


Fig. 8 Control input for the proposed control system ( $T_0=20, k_0=2.2, y_r=60$ )

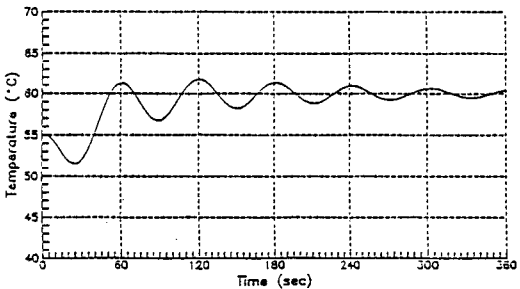


Fig. 7 Step response for the system with PI controller ( $T_0=20, k_0=2.2, y_r=60$ )

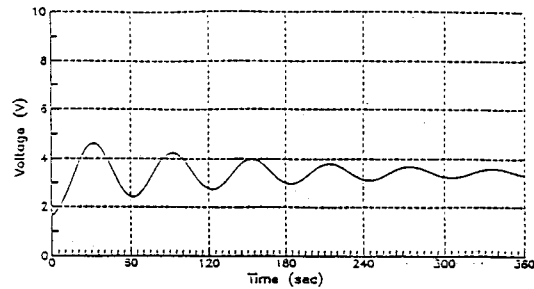


Fig. 9 Control input for the system with PI controller ( $T_0=20, k_0=2.2, y_r=60$ )



制御對象II에 대해서도 역시 모든 설계사양을 만족하고 있는 반면 PI制御器를 갖는 制御시스템의 경우는 여전히 亂調現象을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 12, 13은 制御對象II에 대하여 제안한 방법으로 구성된 制御시스템과 PI制御시스템의 制御入力  $u$ 를 각각 그린 것이다.

Fig. 14, 15는 制御對象 I, II에 대하여 제안한 방법으로 制御시스템을 구성하고 측정할 수는 없으나 무시하지 못할 일정한 外亂이 들어올 경우에 대해서도 강인함을 보이기 위해 55°C로 운전중인 시스템에 狀態變數  $x_2$ 의 定常狀態값의 4%(0.1)의 일정한 外亂이 들어갔을 때 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 14, 15에서 두 制御對象의 경우 모두 시간이 지남에 따라 外亂의 영향으로 인한 定常偏差 없이 55°C에 일치함을 알 수 있다.

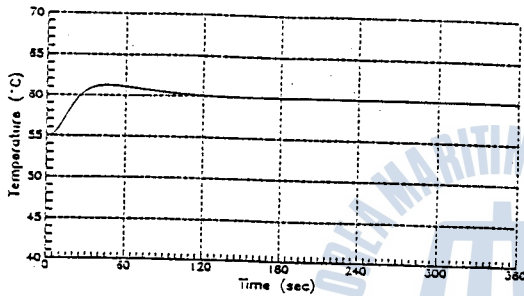


Fig. 10 Step response for the proposed control system ( $T_0 = 40, k_0 = 2.2, y_r = 60$ )

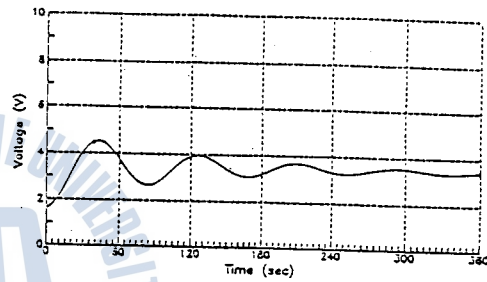


Fig. 13 Control input for the system with PI controller ( $T_0 = 40, k_0 = 2.2, y_r = 60$ )

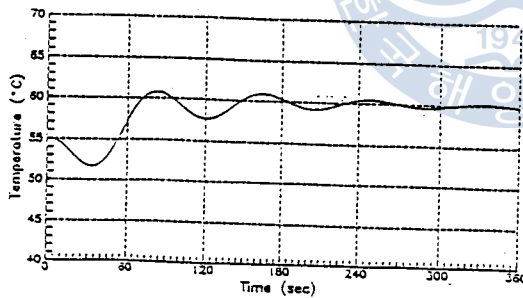


Fig. 11 Step response for the system with PI controller ( $T_0 = 40, k_0 = 2.2, y_r = 60$ )

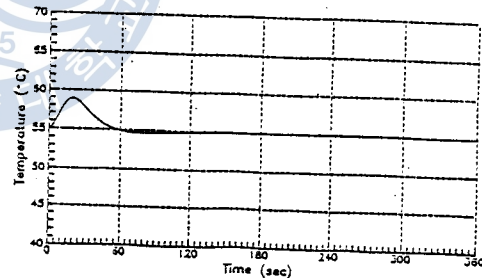


Fig. 14 Response for the constant disturbance of the proposed control system ( $T_0 = 20, k_0 = 2.2, y_r = 55, d = 0.1$ )

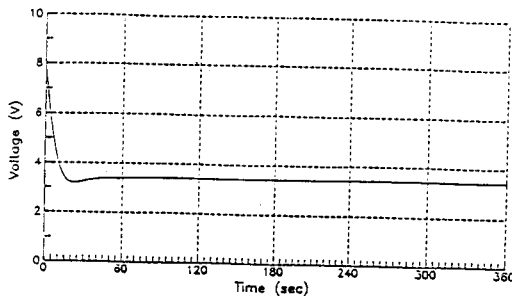


Fig. 12 Control input for the proposed control system ( $T_0 = 40, k_0 = 2.2, y_r = 60$ )

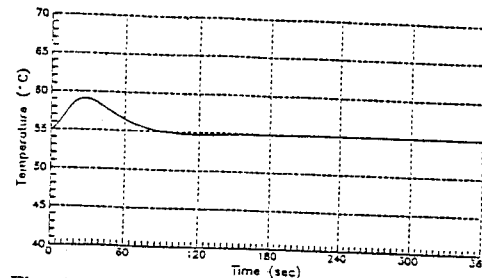


Fig. 15 Response for the constant disturbance of the proposed control system ( $T_0 = 20, k_0 = 2.2, y_r = 55, d = 0.1$ )

Fig. 16, 17, 18, 19는 본 논문에서 제안한 制御시스템의 파라미터변화에 대한 시뮬레이션 결과로서 Fig. 16은 制御對象 I에 대하여 55°C로 운전중 目標值를 60°C로 변화시켰을 때  $T_0$ ,  $k_0$ 가 변하지 않았을 경우 시스템의 出力應答과  $k_0$ 는 변하지 않고  $T_0$ 만 -10% 변화한 경우에 있어서 시스템의 出力應答을 比較한 것이다. Fig. 17은  $T_0$ 은 변하지 않고  $k_0$ 만 -10% 변화한 경우에 있어서 시스템의 出力應答을 比較한 것이다. Fig. 16, 17에서 보는 바와 같이  $T_0$ ,  $k_0$ 중 어느 파라미터의 변화에도 定常偏差나 無理 없이 파라미터가 변하지 않은 경우와 거의 같은 出力應答을 보여주고 있다. Fig. 18, 19는 制御對象 II에 대하여 Fig. 16, 17과 같은 방법으로 시뮬레이션한 결과로서 약 -10%의 파라미터의 변화에서도 시스템의 出力은 초기에 약간의 差가 존재할 뿐 역시 定常偏差 없이 目標值를 잘 追從 하고 있음을 보이고 있다.

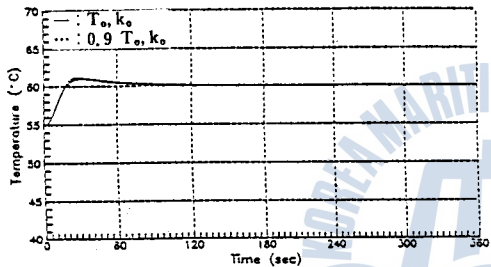


Fig. 16 Response for the time constant variations of the proposed control system ( $T_0=20, k_0=2.2, y_r=60$ )

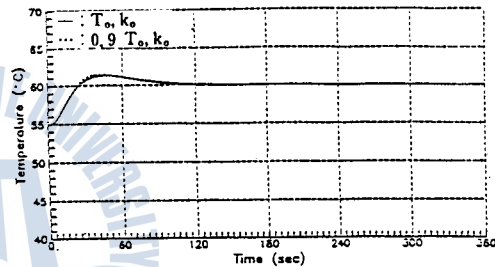


Fig. 18 Response for the time constant variations of the proposed control system ( $T_0=40, k_0=2.2, y_r=60$ )

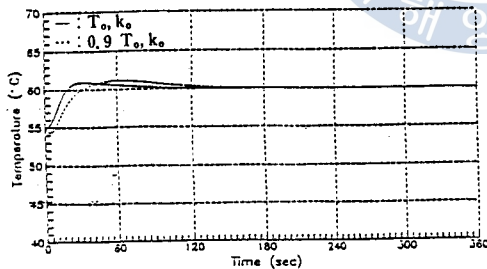


Fig. 17 Response for the gain variations of the proposed control system ( $T_0=20, k_0=2.2, y_r=60$ )

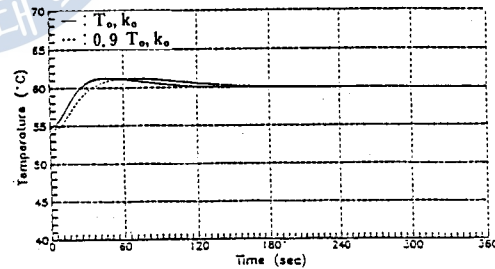


Fig. 19 Response for the gain variations of the proposed control system ( $T_0=40, k_0=2.2, y_r=60$ )

## 第 6 章 結 論

본 논문에서와 같이 時定數가 대단히 큰 熱交換系統의 溫度制御 問題에 있어서 액추에이터, 制御밸브 및 熱交換器로 構成되어지는 制御對象을 모델링한 후 制御對象의 前向方向에 積分器를 하나 추가하여 새로 構成된 制御모델에 最適制御手法을 이용하여 制御入力

을 구하였다. 이상의 방법으로 制御器를 설계할 때 모든 상태의 피드백이 요구되어지는 데 狀態變數  $x_1$ 과  $x_2$ 는 저렴한 測定裝置로 부터 測定되어질 수 있으나  $x_3$ 를 測定하는 裝置는 일반적으로 高價일 뿐만 아니라 실측할 경우 雜音을 同伴할 수 있으므로 狀態觀測器를 구성하여 이로부터 推定된 값을 이용하도록 하였다. 본 논문에서 제안한 방법에 의해 설계된 制御器를 갖는 시스템에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 荷重行列  $\tilde{Q}$ , 荷重係數  $\tilde{R}$ 과 狀態觀測器의 피드백利得行列  $G$ 를 적절히 선정함으로써 주어진 制御시스템의 실제사양을 만족시킬 수 있는 制御器를 설계할 수 있다.
2. 운전중 制御시스템에 일정한 外亂이 들어오거나, 파라미터가 변하여도 制御시스템의 安定성이 확보되는 한 定常偏差를 제거할 수 있었다.
3. 일반적으로 時定數가 대단히 큰 熱交換系統의 溫度制御 있어서 制御量, 즉 出力溫度만을 피드백하여 제어할 경우에 문제가 될 수 있는 應答遲延 및 亂調(Hunting)現象을 防止할 수 있었다.

이상과 같이 제안한 방법으로 설계된 制御器로 制御系를 구성하고 시뮬레이션한 결과와 실제 운전 결과를 비교하지 못한 점은 次後 연구과제로 남겨둔다.

#### 參考文獻

- 1) J.G. Ziegler & N.B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," Trans. ASME, 64, pp.759-768, 1942
- 2) D.R. Coughanowr & L.B. Koppel, "Process systems analysis and control," McGraw-Hill, Inc, N.Y., pp.303-316, 1965
- 3) 河注植, 自動制御工學, 太和出版社, pp.269-279, 1986
- 4) Yen-Ping Shin & Chin-Jian Chen, "On the weighting factors of the quadratic criterion in optimal control," Int. J. Control, Vol.19, No.5, pp.947-955, 1974
- 5) 廣田實, 船舶 制御 システム工學, 成山堂, pp.162-164, 1982
- 6) H. Kwarkernaak & Sivan, Linear optimal control system, pp. 270-275, 1988
- 7) J. Medanic & Z. Uskokovic, "The design of optimal output regulators for linear multivariable system with constant disturbances," Int. J. Control, Vol.37, No.4, pp. 809-830, 1983
- 8) H. Seraji, "A note on pole assignment with output feedback," Int. J. Control, Vol.27, No.1, pp. 142, 1978
- 9) B. Poter & H.M. Power, "Controllability of multivariable system in cooperating integral feedback," Electronics Letter, Vol.6, No. 22, pp. 689-690, 1970
- 10) 韓萬春 & 張世勳, 自動制御 시스템, pp.380-385, 1984
- 11) 高橋安人 & 北森俊行, 制御 と 力學系, pp.224-228, 1977
- 12) A Frank D'souza, Design of Control System, pp.295-301, 1988

