

## 일차계통의 최적제어에 관한 연구

송 문 현\* · 하 주 식\*\*

### Optimal Control of a First Order System

M. H. Song · J. S. Ha

**Key words** : Finite time settling control(유한시간 정정제어), *LQ* control(*LQ*제어), First order system(1차계통)

#### Abstract

In this paper, an optimal control of first order systems is discussed. The control system comprises a main controller and an auxiliary controller. The main controller is designed based on the *LQ* control scheme including an integrator to remove the off-set. The non-linear auxiliary controller is added parallelly to the main controller to obtain a finite time settling control.

The control parameters under variation of the system and various coefficients of the performance indices are computed numerically, and the control responses for the system with the proposed controllers demonstrated the usefulness of the control method.

#### 1. 서 론

디젤기관, 전동기등 원동기의 속도제어계통과 각종 열교환기의 온도제어계통 등에 있어서 제어 대상은 1차계통 또는 비진동성의 2차계통으로 표시된다. 그러나 비진동성의 고차계통은 1차계통 또는 비진동성 2차계통으로 근사화하여 표시할 수 있다". 이러한 계통은 정위성계통으로 피드백제어를 행하는 경우, 제어기에 적분기를 사용하지 않으면 옴세트가 발생한다. 따라서 이러한 계통에는 일반적으로 *PI* 또는 *PID*제어기가 사용되고 있다.

제어기에 적분기가 포함되면 제어계통은 2차계통 또는 고차계통이 되어 속응성을 좋게 하기 위하여 제어계통의 이득을 증가시키면 오버슈트가 발생하고 제어에 소요되는 에너지가 증가 된다. 반면 제어계통의 이득을 너무 감소시키면 비진동계가 되어 오버슈트가 없어지고 제어에 소요되는 에너지도 감소되나 속응성이 나빠진다.

교류발전기의 원동기로 사용되는 디젤기관이나 속도제어형 서어보계통에 있어서는 목표치 변동이나 외란에 대하여 옴세트와 오버슈트가 없고 응답이 빠른 제어특성이 강력이 요구된다. 그러나 *PI*

\* 정희원, 울산전문대학

\*\* 정희원, 한국해양대학교

또는 PID 제어기만으로는 이러한 제어특성을 충족시킬 수 없다.

본 연구에서는 옵셋이 전혀 허용되지 않는 경우를 고려하여 적분제어를 직렬로 부가한 1차계통의 제어대상에 대하여 2차형식의 평가함수를 최소화하는 LQ 제어이론에 의한 최적제어를 설계한다. 이 LQ 최적제어계통은 제어오차의 2승 면적과 제어에 소요되는 에너지에 대한 하중계수의 값에 따라 제어성능이 달라지게 되며 속응성을 좋게 하려면 오버슈트가 발생한다. 본 연구에서는 이 LQ 최적제어이론에 의해서 설계된 제어기를 주제어기로 하고 이와 병렬로 보조제어기를 부가함으로써 1차계통에 있어서 목표치 변동에 대해 오버슈트가 없는 유한시간 정정제어(FTS CONTROL)를 행하는 방법을 제안하고 보조제어기의 설계법과 유한 정정시간과 제어계통의 이득 및 시정수와의 관계등에 대해서 고찰한다.

또한 수치계산 및 응답 시뮬레이션을 통하여 LQ 제어와 유한시간 정정제어의 결과를 비교하고 플랜트와 제어기의 파라메타간의 관계 및 제어성능등에 대해서 검토한다.

## 2. 1차계통의 최적제어

원래 최적이라는 말은 최적을 정의하는 기준에 따라서 그 뜻이 달라지므로 “절대적으로 최적”이라는 말은 있을 수 없으며, “어떤 의미에서의 최적 (Optimal in some sense)”이라고 해야 할 것이다. 제어계통에 있어서는 일반적으로 정상특성과 과도특성을 기준으로하여 그 성능을 평가한다. 정상특성에 있어서는 정상위치편차 즉 옵셋(offset)가 제어성능평가의 중요한 기준이 되며 과도특성에 있어서는 제어면적, 감쇠특성, 오버슈트, 정정시간, 속응성등이 그 기준이 된다.

본 장에서는 옵셋이 전혀 허용되지 않는 경우를 고려하여 적분기를 부가한 1차계통에 대해서 몇가지 조건을 기준으로 하는 최적제어방법에 대하여 고찰해보기로 한다.

### 2.1 LQ 제어

Fig. 1과 같이 적분기가 직렬로 부가된 제어대상

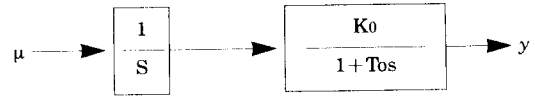


Fig. 1 The block diagram of the system

에 대한 LQ 제어 문제를 고찰해보자. Fig. 1에서  $x_1=y, x_2=\dot{y}$ 라고 놓으면 식(1)과 같은 상태방정식을 얻는다.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = C^T x \end{cases} \quad (1)$$

단,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_0} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_0}{T_0} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$x_r$  및  $u_r$ 를 각각  $x$  및  $u$ 의 정상상태의 값이라 하고  $\Delta x, \Delta u$  및  $\Delta y$ 를 식(2)와 같이 정의하면 식(3)과 (4)를 얻는다.

$$\begin{cases} \Delta x = x - x_r \\ \Delta u = u - u_r \\ \Delta y = y - y_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y = C^T \Delta x \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{1r} \\ x_{2r} \\ u_r \end{bmatrix} = W_\gamma^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ y_r \end{bmatrix} \quad W_\gamma = \begin{bmatrix} A & B \\ C^T & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(1)로 표시되는 시스템은 가제어, 가관측이므로 3×3의 행렬  $W_\gamma$ 는 Non-Singular<sup>2)</sup>이며 식(4)로부터 식(5)를 얻는다.

$$\begin{bmatrix} x_{1\gamma} \\ x_{2\gamma} \\ u_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_\gamma \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2차형식의 평가함수를 식(6)과 같이 정의하고, 이 평가함수를 최소화하는 식(3)의 시스템에 대한 최적제어입력을  $\Delta u^*$ 라고 하면 이는 식(7)과 같이 구해진다<sup>3)</sup>.

$$J(\Delta u) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\Delta x^T W \Delta x + \Delta u^T V \Delta u) dt \quad (6)$$

$$\Delta u^0 = -V^{-1} B^T R \Delta x \quad (7)$$

단, 여기서  $R$ 은 대칭행렬로서 다음의 Ricatti 행렬방정식의 해이다.

$$RA + A^T R + V - RBW^{-1}B^T R = 0 \quad (8)$$

따라서 시스템 식(1)에 대한 최적제어 입력  $u^0(t)$ 는 식(9)와 같이 되고 이와 같이 설계된 최적제어 계통을 블록선도로 표시하면 Fig. 2와 같이 된다.

$$u^0 = u_r - V^{-1} B^T R (x - x_r) \quad (9)$$

다음에  $W$ 와  $V$ 를 각각 식(10)과 같이 정의하고 최적제어 입력  $u^0(t)$ 를 구체적으로 구해보자.

$$W = \begin{bmatrix} w & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, V = 1 \quad (10)$$

행렬  $R$ 을 식(11)과 같이 놓고 식(8)로부터  $r_{11}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_{22}$ 를 구하여 보면 식(12)와 같이 된다.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{12} & r_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} r_{11} &= \frac{\sqrt{w}}{K_0} \sqrt{1 + 2K_0 T_0 \sqrt{w}} \\ r_{12} &= \frac{T_0}{K_0} \sqrt{w} \\ r_{22} &= \frac{T_0}{K_0} (\sqrt{1 + 2K_0 T_0 \sqrt{w}} - 1) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

이것을 식(9)에 대입하면 식(13)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \Delta u^0(t) &= - \left[ 0 \quad \frac{K_0}{T_0} \right] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{12} & r_{22} \end{bmatrix} (x - x_r) \\ &= - \left[ \sqrt{w} (x_1 - x_{1r}) + \frac{1}{K_0} \right. \\ &\quad \left. (\sqrt{1 + 2K_0 T_0 \sqrt{w}} - 1) (x_2 - x_{2r}) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

$x_1 = y, x_{1r} = y_r, x_{2r} = 0$  이므로

$$\left. \begin{aligned} e &= y_r - y \\ K_1 &= \frac{1}{K_0} (\sqrt{1 + 2K_0 T_0 \sqrt{w}} - 1) \\ K_2 &= \sqrt{w} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

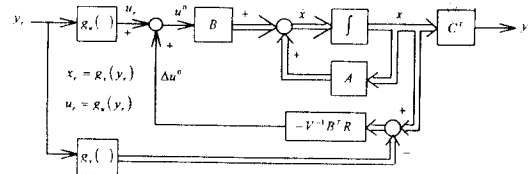


Fig. 2 The block diagram of the optimal state feedback control system

라고 놓으면 식(13)은 식(15)와 같이 되어 제2제어기는 PD 제어기가 된다.

$$\Delta U^0(s) = (K_1 s + K_2) E(s) \quad (15)$$

이 PD 제어기와 적분기를 합하면 1차계통에 있어서 옴셋트가 없는 최적 LQ 제어기는 PI 제어기가 됨을 알 수 있으며, 이 제어기의 출력력을  $K_2$ 로 나눈 것을  $u_1(t)$ 라고 하면 식(16)을 얻는다. (단,  $U_1(s)$ 는  $u_1(t)$ 의 Laplace 변환이다.)

$$\Delta U_1(s) = \frac{(1 + \beta s)}{s} E(s) \quad \text{단, } \beta = \frac{K_1}{K_2} \quad (16)$$

식(14)에서  $w$ 가 커지면  $K_1, K_2$ 는 각각 커지고  $w$ 가 작아지면  $K_1, K_2$ 는 각각 작아진다. 즉, 제어에 소요되는 에너지를 전혀 고려하지 않을 때에는 제어기의 이득은 가장 큰 것이 좋고, 에너지만을 고려할 때에는 전혀 제어를 하지 않는 것이 좋다는 것을 알 수 있다. 따라서 LQ 최적제어에 있어서는 제어 오차의 2승면적과 제어에 소요되는 에너지에 대한 상대적인 하중계수  $w$ 의 값에 따라 그 결과가 다르게 되며, 이  $w$ 의 값은 구체적인 제어계가 주어졌을 때 그 제어의 목적에 따라 결정되어야 한다.

### 2.2 유한시간 정정제어

앞절에서 논의한 LQ 최적제어 이론에 의하여 설계된 PI 제어기를 주제어기로 하고 병렬로 보조 제어기를 부가한 피드백제어계통을 Fig. 3에 표시하고 본 절에서는 목표치변동에 대해서 유한정

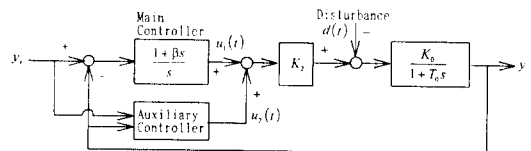


Fig. 3 The proposed optimal feedback control system

정제어를 행하기 위한 보조제어기를 설계하는 방법에 대해서 고찰해 보기로 한다. NAKANO 등은 비선형소자를 이용하여 유한시간 정정제어를 행하는 방법을 제안하고 있다<sup>4,5</sup>. 그러나 이 방법에서는 제어계통의 이득만 결정되면 비선형소자의 출력계수와 유한정정시간이 일의적으로 결정되어 자유도가 작을 뿐만 아니라 단지 목표치 변동에 대한 유한시간 정정제어를 행하고 있다. 본 논문에서는 NAKANO의 방법을 보완 확장하여 목표치 변동에 대해서는 물론, 부하토오크의 급변 및 플랜트의 파라메타 변동에도 효과적으로 적용할 수 있고, 구조가 간단하면서도 자유도가 커서 제어목적에 따라 적절한 유한시간 정정제어를 행할 수 있는 등 다양한 기능을 갖는 보조제어기 설계를 목표로 하여, 우선 목표치 변동에 대한 유한시간 정정제어를 행하는 방법에 대해서 논의하기로 한다.

Fig. 3의 피이드백 제어계통에 있어서 우선 보조제어기가 없는 경우, 목표치로서 크기 A의 계단상 입력이 가하여졌을 때의 응답을  $y_1(t)$ 라고 하면  $y_1(t)$ 는 식(17)과 같이 된다.

$$y_1(t) = A(1 - \sqrt{1+r_0^2} \cos(\omega_0 t - \tan^{-1} \gamma_0) + \beta(1+\gamma_0^2)\omega_0 e^{-\alpha \omega t} \sin \omega_0 t) \quad (17)$$

단,

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \zeta \omega_n \\ \omega_0 &= \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n \\ \zeta &= \frac{1+K_0 K_2 \beta}{2\sqrt{T_0 K_0 K_2}}, \quad (0 < \zeta < 1) \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{K_0 K_2}{T_0}} \\ \gamma_0 &= \frac{\alpha_0}{\omega_0} = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \end{aligned}$$

목표치로서 크기 A의 계단상 입력을 가하고 동시에 PI제어기의 뒤에 크기  $m_2 A$ 의 계단상 입력을 가했을 경우, 이에 대한 계통의 응답을  $y_2(t)$ 라고 하면  $y_2(t)$ 는 식(18)과 같이 된다.

$$y_2(t) = m_2 A(1 + \gamma_0^2)\omega_0 e^{-\alpha \omega t} \sin \omega_0 t \quad (18)$$

식(17)과 식(18)의 합 즉, 위의 두 입력에 대한 계

통의 응답을  $y_3(t)$ 라고 하면 식(19), 식(20)을 얻는다.

$$y_3(t) = y_1(t) + y_2(t) = A\{1 - \sqrt{1+\alpha^2} e^{-\alpha \omega t} \cos(\omega_0 t + \phi)\} \quad (19)$$

단,

$$\begin{aligned} \alpha &= (m_2 + \beta)(1 + \gamma_0^2)\omega_0 - \gamma_0 \\ \phi &= \tan^{-1} \alpha \end{aligned} \quad (20)$$

식(19)의 응답이 처음 0에서 점점 커져 최초로 A가 될 때 즉, 제어오차가 A에서 점점 줄어 최초로 0이 되는 시간을  $t_s$ 라 하면  $t_s$ 는 식(19)로부터 다음과 같이 구하여 진다.

$$t_s = \frac{1}{\omega_0} \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) \quad (21)$$

다음에  $t=t_s$ 에서 역시 적분기의 뒤에 크기  $-m_1 A$ 의 계단상 입력을 가하고 이에 의한 응답을  $y_4(t)$ 라고 하면 식(22)를 얻는다.

$$y_4(t) = m_1 A(1 + \gamma_0^2)\omega_0 e^{\gamma_0 \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} e^{-\alpha \omega t} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (22)$$

그러므로 식(19)와 식(22)의 합 즉, 계통의 전 응답을  $y_0(t)$ 라고 하면  $y_0(t)$ 는 식(23)과 같이 된다.

$$y_0(t) = y_3(t) + y_4(t) = A \left[ 1 - \sqrt{1+\alpha^2} - m_1(1 + \gamma_0^2)\omega_0 e^{\gamma_0 \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \right] e^{-\alpha \omega t} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (23)$$

식(23)에서 만일 식(24)를 만족하도록  $m_1$ 을 선택한다고 하면 식(23)은 식(25)와 같이 되어, 유한시간 정정제어를 행할 수 있으며  $t_s$ 는 유한정정시간이 된다.

$$m_1 = \frac{\sqrt{1+\alpha^2}}{(1 + \gamma_0^2)\omega_0} e^{-\gamma_0 \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \quad (24)$$

$$y_0(t) = A, \quad (t > t_s) \quad (25)$$

식(24)에서  $\alpha$ 는  $\beta$ 와  $m_2$ 의 함수이다(식(20)참조). 또한 LQ제어에서  $\beta$ 와  $K_2$ 는 평가함수의 상대하중 계수  $w$ 의 함수이나(식(14), (16)참조) 유한시간 정

정제어에서는  $K_2$ 와  $\beta$ 를 독립적으로 조정할 수 있는 것으로 보면, 파라메타  $K_2$ ,  $\beta$ ,  $m_2$ 의 값을 적절하게 조정함으로써  $m_1$ 과  $t_s$ 의 값이 다른 다양한 유한시간 정정제어를 행할 수 있다.  $m_2$ 를

$$m_2 = pm_1, \quad (p \leq 1) \tag{26}$$

으로 놓으면  $m_1$ 은 식(27)의 2차 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$c_0 m_1^2 + c_1 m_1 + c_2 = 0 \tag{27}$$

단,

$$c_0 = (1 + \gamma_0^2) \omega_0^2 (p^2 - e^{\gamma_0(\pi - 2\phi)})$$

$$c_1 = 2pa(1 + \gamma_0^2)\omega_0, \quad c_2 = 1 + a^2$$

$$a = \beta(1 + \gamma_0^2)\omega_0 - \gamma_0$$

### 2.3 보조제어기의 설계

보조제어기는 원래 목표치의 급격한 변화에 대해서 뿐만 아니라 회전계통에 있어서 부하토크의 급격한 변동 또는 계통의 파라메타 변동등 외란에 대해서도 유한시간 정정제어를 행할 수 있도록 설계되어야 하나, 우선 본 논문에서는 목표치의 계단상 변동에 대하여 유한시간 정정제어를 행할 수 있도록 설계하기로 한다. 즉, Fig. 3에서 보조제어기의 출력  $u_2(t)$ 는 다음 식 (28)과 같이 결정된다.

If  $y_r$  is changed stepwisely as large as  $A(t=0)$ , then

(a) LQ Control :  $u_2(t) = 0$

(b) FTS Control :  $u_2(t) = A(m_2 u_0(t) - m_1 u_0(t - t_s))$

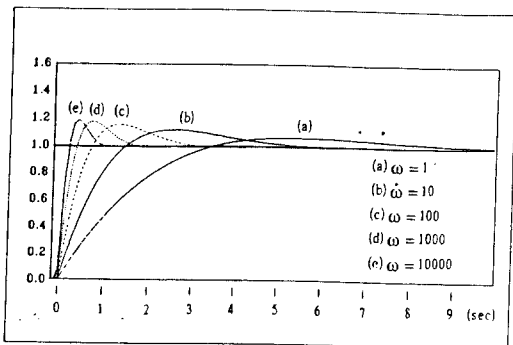


Fig. 4 Indicial responses of LQ control ( $K_0=1, T_0=3$ )

$$u_0(t) : \text{Unit - step function} \tag{28}$$

## 3. 수치계산 및 응답시물레이션

### 3.1 제어기의 파라메타계산

식(27)의 계수  $p=0$ 인 경우(즉,  $m_2=0$ ) 제어오차의 2승면적과 제어에 소요되는 에너지에 대한 상대하중계수  $w$ 의 값이 변화할 때  $K_2, \beta, \alpha, m_1, t_s$  등 주제어기와 보조제어기의 각종 파라메타값을 계산해 보면 Table 1과 같이 된다( $K_0=1, T_0=3$ ). Table 1에서 상대하중계수  $w$ 가 커지면 즉, 제어오차의 2승면적을 중요시할 때에는 계통의 이득  $K_2$ 는 커지고 제어계통의 감쇠율  $\zeta$ 와 유한정정시간  $t_s$ 는 작아지며 보조제어기의 출력계수  $m$ 은 커진다는 것을 알 수 있다. 다음에 상대하중계수  $w=3000$ 이고 제어대상의 시정수  $T_0=1$  및 5일 때 계수  $p$ 의

Table 1. Values of parameters of controllers vs. values of relative weighting coefficient

$w$	$b$	$K_2$	$\zeta$	$m_1$	$t_s$
1	1.645	1.000	0.763	0.253	3.460
10	1.097	3.162	0.725	0.238	1.476
100	0.681	10.00	0.712	0.188	0.721
1000	0.405	31.62	0.708	0.120	0.375
10000	0.235	100.0	0.707	0.072	0.202

Table 2. Values of controllers vs. values of the coefficient

$P$	$T_0$	$m_1$	$m_2$	$t_s$
0.0	1	0.050	0.000	0.170
	5	0.126	0.000	0.355
0.2	1	0.057	0.011	0.157
	5	0.144	0.028	0.325
0.4	1	0.067	0.026	0.141
	5	0.172	0.068	0.290
0.6	1	0.083	0.050	0.122
	5	0.218	0.131	0.247
0.8	1	0.118	0.094	0.096
	5	0.323	0.258	0.188
1.0	1	0.385	0.385	0.038
	5	2.228	2.228	0.037

(Values of beta ; 0.174 when  $T_0=1$ , beta ; 0.409 when  $T_0=5$ )

값이 변화하는 경우  $m_1$ ,  $t_s$  값들의 변화를 Table 2에 나타낸다.

Table 2에서  $p$ 의 값을 크게 할수록 정정시간  $t_s$ 의 값은 작아지나 보조제어기의 출력계수  $m_1$ ,  $m_2$ 의 값은 커짐을 알 수 있다. 따라서  $w$  및  $p$ 의 값은 주어진 제어계통에서 요구되는 정정시간과 보조제어기의 허용되는 출력의 크기등을 고려하여 결정하여야 한다.

### 3.2 응답시물레이션

$T_0=3, K_0=1$ 인 제어대상에 대하여 상대 하중계수  $w$ 가 1에서 10<sup>4</sup>까지 변화할 때 LQ 최적제어에 의한 인디셜응답 즉, 식(17)의  $y_1(t)$ 의 변화는 모양을 도시하면 Fig. 5와 같이 된다. 그리고 LQ 최적제어에서는  $w$ 를 크게하여 속응성을 양호하게 하려면 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 다음에 Fig. 3의 피드백제어계통에 있어서 전술한 제어대상에 대하여  $K_0=1, T_0=3, w=10000$ 일 때의 LQ 최적제어에 대한 인디셜응답을 구해보면 Fig. 5의 (a)와 같이 되고, 이경우  $\zeta=0.7076$ 로서 약 19%의 오버슈트가 발생한다. 다음에 보조제어기의 출력에 의한 제어계통의 응답  $y_2(t)$ 를 구해보면 Fig. 5의 (b)와 같이 되어, 유한 정정시간  $t_s$ 는 약 0.2027이 된다.

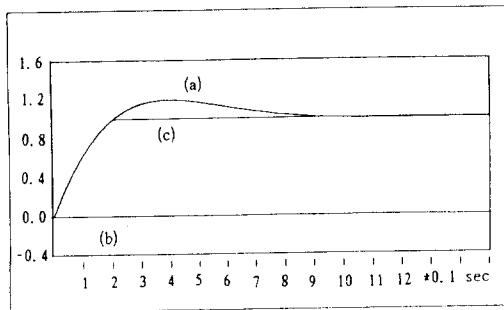


Fig. 5 Optimal indicial response of the proposed feedback control system sampling time : 0.01sec,  $K_0=1, T_0=3, w=10000$

## 4. 고 찰

본 논문에서는 일차계통의 최적제어로서 LQ 제어와 유한시간 정정제어에 대해서 논의하였다. 온

도제어등 대부분의 프로세스제어에서와 같이 오버슈트가 다소 허용되는 경우에는 상대하중계수  $w$ 의 값을 적절하게 조정함으로써 LQ제어의 목적을 달성할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 속응성을 요구하면서 오버슈트를 전혀 허용하지 않는 경우에는 유한시간 정정제어를 행하여야 한다. 유한시간 정정제어에 있어서 보조제어기의 출력계수  $m_1$ 과 유한정정시간  $t_s$ 는 계통의 이득  $K_2$ , LQ제어에 의한 주제어기의 계수  $\beta$ , 그리고 보조제어기에 있어서 계수  $p$ 의 값에 따라 달라진다. 유한시간 정정제어에 있어서는  $t_s$ 를 적게 하려면  $K_2$ 의 값을 가능한 한 크게 하여 계통의 고유각주파수  $\omega_n$ 를 크게 하는 것이 좋다.

다음에 만일  $\beta=0, p=1$ 로 놓으면 본 논문에서 제안하는 방법은 참고문헌(4)의 나까노가 제안하는 방법과 유사하게 된다. 그러나  $\beta=0$ 으로 하면 주제어기가 I제어기로 되어서, 이 경우에는 동일한 조건에서 응답이 더 느리게 되어 PI제어기의 경우보다  $t_s$ 와  $m_1$ 의 값이 다 같이 크게 된다. 이것은 여러가지 경우의 시물레이션을 통하여도 이 사실이 확인되었다.  $p=1$ 로 하면  $p<1$ 일 경우보다  $t_s$ 는 약간 적어지나  $m$ (이 때는  $m_1=m_2=m$ )의 값이 커질 뿐만 아니라  $m$ 을 구하기 위하여 방정식(27)을 풀어야 한다. 따라서  $p=0$ 으로 놓고  $\beta$ 의 값을 LQ 최적제어이론에 관계없이 크게 취하면  $p$ 를 크게 하는 것 즉,  $m_2$ 를 크게 하는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다.(식(20)참조)

## 5. 결 론

이상과 같이 1차계통의 제어대상에 대하여 LQ 제어에 대해서 논의하고 보조제어기를 이용하여 오버슈트가 전혀 없는 유한시간 정정제어를 행하는 방법을 제안하였으며, 수치계산과 시물레이션을 통하여 본 방법의 유효성을 입증하였다.

또한 유한 정정시간  $t_s$ 를 작게 하면서 보조제어기의 출력계수  $m_1$ 을 가능한 한 작게 하기 위해서는 계통의 이득  $K_2$ 를 크게 하는 것이 좋고, 주제어기로서 I제어기( $\beta=0$ )보다는 PI제어기( $\beta \neq 0$ )가 효과적이며, 보조제어기의 출력계수  $m_2$ 는 0으로 하고 LQ제어와 관계없이  $\beta$ 를 크게 하는 것이 효과적

임을 확인하였다. 그리고 회전계통에 있어서 부하의 변동등 외란에 대한 억제특성에 대해서는 현재 연구중에 있으며, 제어대상의 파라메타가 변동되었을 때에도 강인하게 적응하는 적응제어계통을 구성하는 문제에 대해서는 앞으로 연구되어야 할 과제이다.

### 참고문헌

- 1) M. Nakano, "Approximate Solution of High Order Differential Equations", *IEEE Trans. IECL* - 26, No2, 83(1979)
- 2) 河潤秀, 河注埴, "큰 時定數를 갖는 熱交換系統에 있어서의 最適 溫度制御에 관한 研究", 韓國海洋大學 船舶工學研究論文集 第8集(1990)
- 3) 廣田實, "船舶制御システム工學", 第12章 成山堂 (1982)
- 4) 中野道雄 外 3人, "非線形要素を用いた制御系の有限時間整定補償", 電氣學會論文誌 D, Vol. 114 - D, No. 2(1994)