

## 쌍선형변환법을 이용한 서어보 제어계 설계

김상봉 · 안휘웅 · 지식근

釜山水産大學

(1990년 1월 10일 접수)

### Design of Servo Control System Using Bilinear Transformation Approach

Sang Bong KIM, Hui Ung AN and Suk Kun JEE

National Fisheries University of Pusan

(Received January 10, 1990)

In this paper, a new design method in which transient response behavior of a servo-system can be improved, is proposed using a bilinear transformation method which assigns the poles of the closed-loop system in a specified region. The servo-system is a dynamic system which follows the given reference input automatically. In the above meaning, the design of a servo-system is similar to a regulator design problem for the extended system which is resulted from the given system and the reference input by the well known internal model principle. In the design problem of servo control system, it is supposed that the proposed design method has more practical meaning in comparison to the other design methods, in the views of assigning the characteristic roots of the closed loop system in a specified region satisfying a design specification for the given transient response rather than in the exact positions of the poles. The applicability of the design method proposed in this paper was proved by the simulation results for the angle control problem of an electrical servo mechanism.

### 서 론

다변수제어계의 설계문제에 있어, 문제의 해결은 시스템의 특성을 나타내는 파라미터의 선택에 따라 크게 의존한다. 예를들면, 최적제어계의 설계를 생각하면, 설계자가 바라고 있는 페루우프계의 특성인 과도특성이나 안정도 등을 고려할 경우, 반복적인 그 설계에 의해서 그 목적이 달성될 수 있다고 하는 것은 잘 알려진 사실이다. 이것은 계산기를 이용해서 충분히 형식화 되어 있는 어떤 적절한 방식에 의해 해석적으로 설계를 행하는 것에 지나지 않는다.

위에서 서술한 것과 같은 설계상의 문제점을

피하는 하나의 방법으로서 저자는 쌍선형변환법을 제안했다<sup>1)</sup>. 즉 연속계의 설계문제를 연속계의 설계방법에만 구속시키지 않고 이산계의 설계방법으로서 잘 알려져 있는 방법을 이용해서 문제를 해결하는 것을 제안했다.

서어보 시스템은 주어진 目標値를 자동적으로 추종하도록 하는 動的 시스템이다. 서어보 시스템에 요구되는 조건으로는 대별해서 외부 안정성, 출력 레귤레이션(output regulation) 및 로바스트성(robustness)의 3가지로 요약된다<sup>2-5)</sup>. 즉, 서어보 시스템의 설계라고 하는 것은 위의 3가지 조건을 만족하고 바람직한 응답파형(과도응답)을 가지는 제어계를 설계함을 의미한다.

주어지게 되는 目標値에 추종하도록 한다는 의

미에서 보면, 서어보 시스템 설계라고 하는 것도 결국 내부 모델 원리에 의해 구성되는 擴大系에 대한 하나의 reguator 설계 문제로 된다는 것이다. 즉, 擴大系에 대해 極配置問題로서 설계 파라미터들을 구할 것인가 아니면 最適制御 構成問題로서 그 파라미터들을 구할 것인가의 設計問題로 귀착되게 된다.

실제적인 시스템 설계의 경우, 페루우프제의 특성근을 정확히 지정된 위치에 배치하지 않으면 안될 경우는 드물고 대개의 경우는 어떤 희망하는 영역내에 배치하면 충분하다. 특히 구체적으로 極을 지정하는 지침에 결핍되어 있을 경우나 페루우프제의 특성인 속응성, 진동 특성, 안정도 등을 고려할 경우, 그 극을 지정위치에 배치하기 보다도 어떤 지정한 영역내에 배치하는 쪽이 유효하다고 할 수 있다.

본 논문에서는, 이와같은 어떤 지정한 영역내에 극을 배치하는 방법중의 하나인 쌍선형변환법에 의해 서어보 시스템의 過渡應答特性을 개선하는 새로운 설계법을 제안한다. 그 설계 응용으로서, 전기 서어보기구의 각도제어에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 본 설계법의 유효성을 확인했다.

### 서어보 문제의 正式化

플랜트는 다음과 같은 狀態方程式으로 주어진다 고 한다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= Ax + Bu + w, x(0) = x_0, t \geq 0 \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.1)$$

단,  $x$ 는  $n$ 차원 상태벡터,  $u$ 는  $m$  차원 입력벡터,  $y$ 는  $r$ 차원 출력벡터,  $w$ 는 외란벡터이고,  $A, B, C$ 는 적당한 차원을 가진 시스템 행렬이다. 여기서, 시스템은 可制御, 可觀測이라고 한다. 단, 각 제어출력  $y_i$ 에 대한 목표입력  $y_{ir}$ 은

$$\begin{aligned} y_r &= [y_{1r}, y_{2r}, \dots, y_{rr}]^T \quad (2.2) \\ y_{i,r}^{(p)} &= p_r y_{i,r}^{(p-1)} + \dots + p_2 y_{i,r} + p_1 y_{i,r}, r = 0 \\ & \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (2.3) \end{aligned}$$

을 만족하고,  $y_{i,r}(0), y_{i,r}^{(1)}(0), \dots, y_{i,r}^{(p-1)}(0)$ 는 既知인 것으로 한다. 이하에서는, 서어보 시스템을 Davison型<sup>1)</sup>으로 구성하는 문제를 생각한

다. 따라서 플랜트(2.1)에 대한 서어보 補償器는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{Z}_i = A_p z_i + b_c (y_i - y_{ir}), i = 1, 2, \dots, r \quad (2.4)$$

단,

$$A_p = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -p_1 & -p_2 & \dots & -p_{p-1} & -p_p & 0 \end{pmatrix}, b_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, b_c \in R^p$$

즉 서어보 補償器는 다음과 같이 구성된다.

$$\dot{Z} = A_r z + B_r (y - y_r), z(0) = z_0 \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} A_r &= \text{block diag} [A_p \dots A_p], \\ B_r &= \text{block diag} [b_c \dots b_c] \end{aligned}$$

이때, 플랜트와 서어보 補償器를 결합시킨 擴大系는 다음식으로 표현된다.

$$\dot{x}_e = A_e x_e + B_e u + E y_r + w \quad (2.6a)$$

$$y = C_e x_e \quad (2.6b)$$

$$x_e = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -B_r & CA_p \end{bmatrix},$$

$$B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ B_r \end{bmatrix}, C_e = [C, 0]$$

(1)식으로 주어지는 플랜트에 대해 閉루우프 시스템이 가제어이고,  $y(t) \rightarrow y_r(t)$  ( $t \rightarrow \infty$ )로 되는 時不變微分 피드백 제어 시스템이 存在하기 위한 필요충분조건은 다음과 같다<sup>2)</sup>.

조건1: 雙( $A, B$ )는 可制御이다.

조건2:  $\text{rank } \Gamma = n + rp$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} m_p & m_{p-1} & \dots & m_2 & m_1 & B \\ CA^{p-1} & CA^{p-2}B & \dots & CAB & CB & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^2 & CAB & \dots & 0 & 0 & 0 \\ CA & CB & \dots & 0 & 0 & 0 \\ CB & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$m_p = A^p + p_p A^{p-2} + \dots + p_2 A + p_1 I$$

$$m_{p-1} = A^{p-1} B + p_p A^{p-2} B + \dots + p_2 B$$

$$\dots$$

$$\dots$$

$$m_2 = A^2 B + p_p AB + A_{p-1} B$$

$$m_1 = AB + p_p B$$

위와 같은 조건하에서  $y(t) \rightarrow y_r(t) (t \rightarrow \infty)$ 를 만족하는 最小次元의 制御시스템에 대한 制御則은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} u &= K_0 x + \sum_{i=1}^r K_i z_i \\ &= [K_0 \ K_c] x_e \\ K_c &= [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_r] \end{aligned} \quad (2.7)$$

서어보 보상기(2.5)와 제어칙(2.7)로 구성되는 폐루우프 시스템은 그림 1과 같이 나타내어진다.

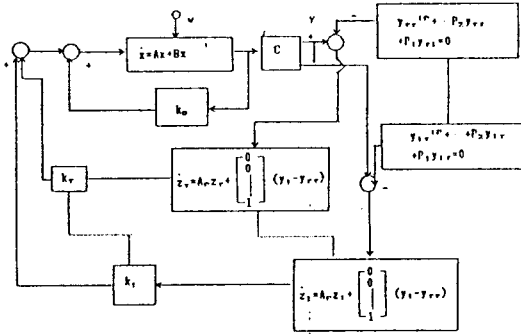


Fig.1. Servo System with Poles in a Specified Region.

### 쌍선형변환법에 의한 제어칙의 도출

확장된 시스템(2.6)에 대한 제어칙(2.7)을 구하는 방법으로 여기서는 쌍선형변환법을 이용하도록 한다. 확장된 시스템(2.6)에 대해서 Fig.2에 나타낸 것과 같은 영역에 임의로 극배치하는 문제를 생각하면, 주어진 시스템 그대로는 설계의 어려움이 있으므로, 여기서는 Fig.2에 보인 것과 같은 영역 W내에 폐루우프계의 극배치를 가능하게 하는 문제를 쌍선형변환설계법을 이용해서 생각하기로 한다. 즉, 시스템(2.6)의 극배치 문제를 이산 시간계

$$x_e(k+1) = A_D x_e(k) + B_D u(k) + E y_r + w \quad (3.1)$$

$$y(k) = C_D x_e(k) \quad (3.2)$$

의 극배치 문제로 부터 해결하기로 한다. 단,  $x_e(k)$ ,  $u(k)$ ,  $y(k)$ 는 (2.6)식의 차원과 같으며,

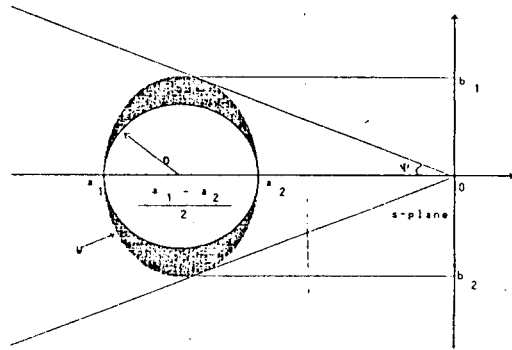


Fig.2. Disk in a Specified Region.

시스템 행렬  $A_D$ ,  $B_D$ ,  $C_D$ 는 (2.6)식으로 부터 다음과 같은 쌍선형변환에 의해 얻어진 것으로 한다.

쌍선형변환:

$$\dot{x}_e(t) \rightarrow \frac{x_e(k+1) - x_e(k)}{T} \quad (3.3)$$

$$x_e(t) \rightarrow \frac{x_e(k+1) + x_e(k)}{2} \quad (3.4)$$

$$y(t) \rightarrow y(k) \quad (3.5)$$

$$u(t) \rightarrow u(k) \quad (3.6)$$

을 시스템(2.6)에 적용함으로써 변환된 시스템 행렬  $A_D$ ,  $B_D$ ,  $C_D$ 는 다음과 같이 된다.

$$A_D = (I - (T/2)A_e)^{-1} (I + (T/2)A_e) \quad (3.7)$$

$$B_D = T(I - (T/2)A_e)^{-1} B_e \quad (3.8)$$

$$C_D = C_e (I - (T/2)A_e)^{-1} \quad (3.9)$$

역으로,

$$A_e = 2/T(A_D + I)^{-1} (A_D - I) \quad (3.10)$$

$$B_e = 2/T(A_D + I)^{-1} B_D \quad (3.11)$$

$$C_e = 2C_D(A_D + I)^{-1} \quad (3.12)$$

이때, 각 시스템에 대한 피이드백을

$$u(t) = F_e x_e(t) \quad (3.13)$$

$$u(k) = F_D x_e(k) \quad (3.14)$$

와 같이 행했을 경우, 폐루우프계의 행렬은 각각 다음과 같은 관계로 된다.

$$\begin{aligned} A_D + B_D F_D &= [I - (T/2)(A_e + B_e F_e)]^{-1} \\ & [I + (T/2)(A_e + B_e F_e)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= [I - (T/2)A_e]^{-1} [I + (T/2)A_e] \\
 &+ T [I - (T/2)A_e]^{-1} B_e [I - (T/2)F_e \\
 & (I - (T/2)A_e)^{-1} \\
 & B_e]^{-1} F_e [I - (T/2)A_e]^{-1} \quad (3.15) \\
 A_e + B_e F_e &= (2/T) [I + A_D + B_D F_D]^{-1} \\
 & [A_D - I + B_D F_D] \\
 &= (2/T) [I + A_D]^{-1} [A_D - I] \\
 &+ (4/T) [I + A_D]^{-1} B_D [I + F_D [I + A_D]^{-1} \\
 & B_D]^{-1} F_D [I + A_D]^{-1} \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

따라서,  $F_D$ 와  $F_e$ 는 다음과 같은 관계식으로 주어지게 된다.

$$\begin{aligned}
 F_D &= F_e [I - (T/2) [I - (T/2)A_e]^{-1} B_e F_e]^{-1} \\
 & [I - (T/2)A_e]^{-1} \\
 &= F_e [I - (T/2)A - (T/2)B_e F_e]^{-1} \quad (3.17) \\
 F_e &= 2[I + F_D(I + A_D)^{-1} B_D]^{-1} F_D [I + A_D]^{-1} \\
 &= 2F_D [I + A_D + B_D F_D]^{-1} \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

위에서 보인 연속계와 이산계와의 사이에 대한 쌍선형변환은 페루우프계의 고유치 관계에서  $s$ -평면과  $z$ -평면 사이의 쌍선형변환

$$g(z) = \frac{2}{T} \frac{(z-1)}{(z+1)}, \quad f(s) = \frac{1 + (T/2)s}{1 - (T/2)s} \quad (3.19)$$

을 의미하고 있다는 것은 명백하다. 따라서 다음과 같은 성질이 만족됨을 알 수 있다.

[성질]<sup>8)</sup>  $f(s)$ 는  $s$ -평면내의 원판  $D$ (중심:  $\alpha + j0$ , 반경:  $r$ )를 다음과 같은 반경을 가진 원판으로 사상한다.

$$\begin{aligned}
 \text{중심: } \alpha_c &= 4(T/2)(1+r^2-\alpha^2)/[\alpha^2+T^2/ \\
 & (\alpha^2+2\alpha-r^2)] \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

$$\text{반경: } r_c = |rT/[T^2/4(1+2\alpha-r^2+\alpha^2)]| \quad (3.21)$$

[보조정리 1]<sup>7)</sup> 시스템 (3.1)과 상태 피이드백칙(3.14)에 대해서, 행렬방정식

$$\begin{aligned}
 &-\alpha[A_D + B_D F_D]^* P - \alpha P [A_D + B_D F_D] \\
 &+ [A_D + B_D F_D]^* P [A_D + B_D F_D] \\
 &+ (\alpha^2 - r^2)P = -Q \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

를 생각한다. 여기서,  $\alpha$ 와  $r$ 은 어떤 상수이며,  $Q$ 는 正定행렬이다. 이때, 행렬  $[A_D +$

$B_D F_D]$ 의 고유치가 다음과 같은 관계를 만족하기 위한 필요충분조건은 (3.22)식을 만족하는 正定행렬  $P$ 가 존재하는 것이다.

$$F = \{F_D : \lambda_i(A_D + B_D F_D) \in D \text{ with center } \alpha + j0 \text{ and radius } r, i=1,2,\dots,n\} \quad (3.23)$$

[보조정리 2]<sup>7)</sup> 다음과 같은 리카치방정식을 만족하는 正定대칭해  $P$ 가 존재한다고 하자.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{(A_D - \alpha I)^T}{r} P \frac{(A_D - \alpha I)}{r} + Q - \frac{(A_D - \alpha I)^T}{r} \\
 & P B_D (r^2 R + B_D^T P B_D)^{-1} B_D^T P \frac{(A_D - \alpha I)}{r} \\
 Q > 0, \quad R > 0 \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

이때, 시스템(3.1)에 대해 상태 피이드백칙

$$\begin{aligned}
 u(k) &= F_D x_e(k) \\
 &= -(r^2 R + B_D^T P B_D)^{-1} B_D^T P (A_D - \alpha I) x_e(k) \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

는 (3.23)식을 만족한다.

[정리 1] 다음과 같은 리카치방정식을 만족하는 正定대칭해가 존재한다고 하자.

$$\begin{aligned}
 &\phi^T P \phi + Q - \phi^T P B_c \\
 P &= (r_c^2 R + B_c^T P B_c) B_c^T P \phi \quad (3.26)
 \end{aligned}$$

$$\text{단, } \phi = \frac{A_c - \alpha_c I}{r_c} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned}
 &(T/2)(1+r^2-\alpha^2 \\
 \alpha_c &=)/[\alpha^2+T^2/4(\alpha^2+2\alpha-r^2)] \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

$$r_c = |rT/[T^2/4(1+2\alpha-r^2+\alpha^2)]| \quad (3.21)$$

이때, 다음과 같이 주어지는 상태피이드백칙은 확장시스템(2.6)의 페루우프계의 모든 극을 중심이  $\alpha$ , 반경이  $r$ 인 디스크내에 배치되게 한다.

$$\begin{aligned}
 u(t) &= -F_e x_e(t) \\
 &= 2[I + F_D(I + A_D)^{-1} B_D]^{-1} F_D (I + A_D)^{-1} \\
 & x_e(t) \\
 &= 2F_D [I + A_D + B_D F_D]^{-1} x_e(t) \quad (3.28)
 \end{aligned}$$

단,  $F_D$ 는 리카치방정식의 해  $P$ 를 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$F_D = -(r_c^2 R + B_c^T P B_c)^{-1} B_c^T P (A_c - \alpha_c I) \quad (3.29)$$

[증명] 보조정리 1과 2에 의해 (3.26)식을 만족하는 해로 주어지는 (3.29)식은 반경이  $\alpha_c$ 이고

중심이  $r_c$ 인 디스크내부에 배치되게 된다. 이때, 쌍선형변환(3.19)식에 대한 성질인 식(3.20)과 (3.21)의 결과와 (3.18)식에 의해 (3.28)식으로 주어지는 피드백치는 확장시스템(2.6)의 페루우프계의 모든 극을 중심이  $\alpha$ , 반경이  $r$ 인 디스크내에 배치되게 한다.

### 數植例

Fig.3에 나타낸 電氣 서어보 기구에 대해 Fig.4에 보인 파형 목표치에 추종할 수 있는 피드백계를 설계하는 문제를 생각한다.

Fig.3의 서어보 모터의 각 파라메터는 다음과 같이 주어진다 고 한다.

전기자 회로의 저항 :  $R_a=34\Omega$

관성모우멘트 :  $J_e=5.85 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$

Motor 정수 :  $k_m=0.328 \text{ V/rad/s}$

부하의 점성마찰계수 :  $D_e=0$

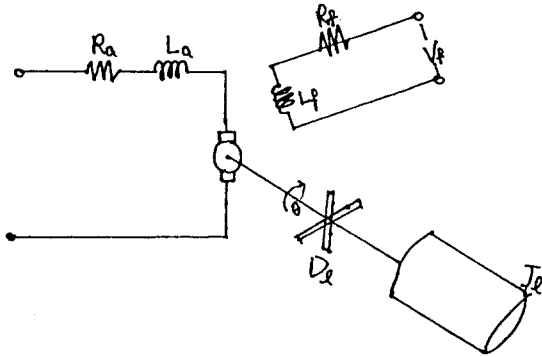


Fig.3. Servo Motor.

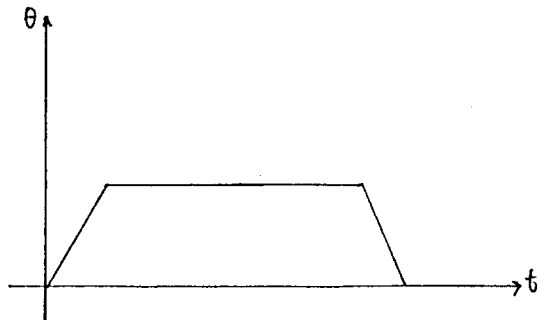


Fig.4. Reference Input.

이때, 모터의 時定數  $\tau = \frac{J_e R_e}{k_m^2} = 0.0185 \text{ sec}$

로 되어, 그 상태방정식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -54.054 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 064.907 \end{bmatrix} u(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = [1 \ 0] x(t)$$

Fig.4로 주어지는 目標入力は step과 ramp의 형태이므로 그 미분방정식은

$$\dot{y}_r = 0 \quad (4.2)$$

으로 나타내어진다. 그 상태방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x}_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x_r, \quad x_r(0) = x_{r0} \quad (4.3a)$$

$$y_r = [1 \ 0] x_r \quad (4.3b)$$

서어보기구(4.1)은 可制御이며, 조건2 즉,

$$\text{rank } \Gamma = n + np = 4 \quad (4.4)$$

를 만족하고 있으므로  $y \rightarrow y_r(t \rightarrow \infty)$ 을 만족하는 制御則

$$u = k_0 x + k_c z \quad (4.5)$$

의  $k_0, k_c$ 를 구할 수 있다.

이때, 서어보 보상기는 다음과 같이 주어짐을 알 수 있다.

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (y - y_r) \quad (4.6)$$

여기서, 擴大系는 다음과 같이 된다.

$$\dot{x}_e = A_e x_e + B_e u \quad (4.7)$$

$$y = C_e x_e$$

$$A_e = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_r \\ C & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0-5 & 4.054 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 164.907 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_e = [C \ 0] = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

擴大系(4.7)에 대해 3절에서 주어진 설계법을 적용하도록 한다. 여기서는 정리1의 결과를 이용하여 확대계 (4.7)의 극배치를 생각한다. 주어지는 설계영역은  $\alpha=80$ (중심:  $-80$ ),  $r=80$ 인 디스크 내부로 한다. 이때, 서어보기구의 상태방정식에서의 리카치방정식의 하중행렬 Q와 R에 대해 각각  $Q=I$ ,  $R=1$ 로 하여, (3.24)식의 해를 구한 결과는 다음과 같다.

$$P = \begin{pmatrix} 2.0206D + 22.482 & 83.6615 & 2.0253D2 \\ 2.4818 & 1.031 & 1.015 & 2.4701 \\ 83.662 & 1.015 & 1.956D2 & 1.98D2 \\ 2.025D2 & 2.4701 & 1.98D2 & 3.981D2 \end{pmatrix}$$

$$F = [1.18266 \ 0, 17193 \ 0, 47785 \ 1.168581]$$

이때, 페루우프계의 극은

$\lambda_i(A_e - B_e F) \in e\{-0.70709 \pm j0.70087, -0.99377, -79.999\}$ 와 같이 배치되어, 그 극들은 모두 지정한 영역 (중심:  $-80$ , 반경:  $80$ )내에 위치하고 있음을 알 수 있다.

실제의 시스템의 경우, 상태값들이 모두 관측 가능하다고는 볼 수 없으므로 다음과 같이 관측기(Observer)를 구성했다.

관측기:

$$\dot{\hat{x}} = (A - kC)\hat{x} + ky + bu, \quad x \in R^2$$

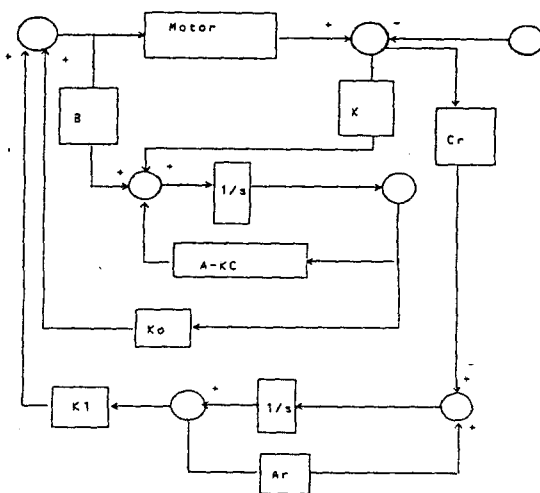


Fig.5. Block Diagram for Closed-Loop System with Observer.

의 극은  $-17, -17$ 로 선정하여  $(A - kC)$ 가 안정하게 하는 이득  $k$ 를

$$k = \begin{pmatrix} 20.054 \\ 1372.997 \end{pmatrix}$$

와 같이 구했다.

이와 같은 관측기를 결합시킨 시스템의 블록선도는 Fig.5와 같고, 그 시뮬레이션 결과는 Fig.6과 같다.

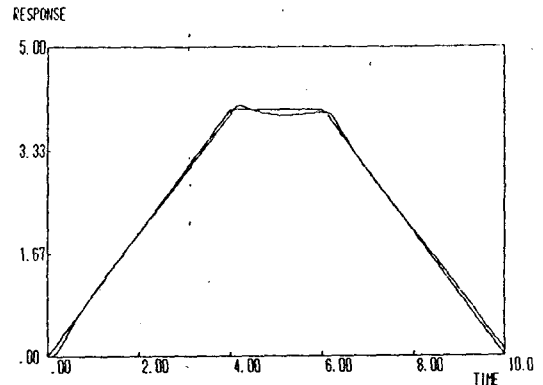


Fig.6. Simulation Result for Given Reference Input.

## 결 론

본 논문에서는, 문헌[1]에서 보였던 적분형 서어보계의 구성문제를 목표입력이 선형자유계의 출력으로 얻어지는 경우로 일반화하여 확대계를 얻고 쌍선형변환법에 의해 페루우프계를 구성하는 설계법을 제안했다. 본 설계법의 유효성을 확인하기 위해, 전기 서어보기구의 각도제어에 관한 응용예를 보였다.

실제적인 서어보 시스템의 설계문제에 있어, 그 페루우프계의 특성근을 정확한 위치에 배치하기 보다는 오히려 어떤 요구하는 과도응답이 얻어질 수 있게하는 영역내에 배치하면 된다는 의미에서 보면, 본 서어보계 구성법은 그 실제적인 의미가 크다고 할 수 있다.

## 參考文獻

- 1) Davison, E.J.(1972): The Output Control of

- Linear Time - Invariant Multivariable System with Unmeasurable Arbitrary Disturbance. IEEE Trans. Auto. Control, Ac-17(5), 621-630.
- 2) Davison, E.J. and I.J. Ferguson (1987): The Design of Controllers for the Multivariable Robust Servomechanism Problem Using Parameter Optimization Methods. IEEE Trans. Auto. Control, Ac-26(1), 183-194.
  - 3) Anderson, B.D.O., J.A. Gibson and H.R. Sirisena(1985): Phase Lag and Lead Weighting in Linear-Quadratic Control. Optimal Control Appl. & Methods 6, 249-263.
  - 4) Furuta, K.(1987): Alternative Robust Servo Control System and Its Digital Control. INT. J. Control 45(1), 183-194.
  - 5) Johnson, C.D.(1971): Accomodation of External Disturbances in Linear Regulator and Servomechanism Problems. IEEE Trans. Auto. Control, Ac-16(6), 635-644.
  - 6) Wolovich, W.A. and P. Ferreira (1979): Output Regulation and Tracking in Linear Multivariable Systems. IEEE Trans. Auto Control, Ac-24(3), 460-465.
  - 7) Furuta, K. and S.B. Kim(1987): Pole Assignment in a Specified Disk. IEEE Trans Auto. Control, Ac-32(5), 432-427.
  - 8) Kim, S.B. and K. Furuta(1988): Regulator Design with Poles in a Specified Region INT. J. Control 47(1), 143-160.
  - 9) 김상봉 · 안휘웅 (1989) : 쌍선형변환법에 의한 연속시간계의 설계. 어업기술 25(3), 137-142.