

규범모델 추종방식에 의한 정위성 회전계통의 적응속도제어에 관한 연구

송 문 현¹⁾

A Study on the Adaptive Speed Control of Static Rotational Systems by Means of the Nominal Model Tracking Method



Recently, in the field of industrial servo-systems, several methods have been proposed for tracking the reference input fast and finely without overshoot.

In this paper a method to construct the nominal model tracking adaptive control system is proposed. The system is composed of the nominal model which produces an ideal response and of the nominal model tracking system with the fuzzy logic adaptive controller. The tracking system comprises a main controller and an auxiliary controller. The main controller is designed based on the LQ scheme which minimizes the value of the performance index, and the controller includes an integrator to remove the off-set.

1)울산전문대학 전자계산과 교수

The non-linear auxiliary controller is added to the main controller in parallel to obtain a finite time settling control without overshoot for first order systems.

In this paper, computer simulations are carried out in cases when the plant can be expressed as the first order system with different parameters from those of the controlled object of the nominal model system, the plant has the time delay element, and when the plant is expressed as 2nd order static systems.

Through the simulation results, the usefulness and the effectiveness of the proposed tracking system are confirmed, however it is necessary that the more effective adaptive controller for the higher order static systems and the method to decide optimal parameters of the fuzzy controller should be studied further more.

제 1 장 서 론

교류발전기용 디젤기관이나 속도형 서보계통 등에서는 옵세트나 오버슈트가 없고 속응성이 양호한 속도제어 특성이 요구되고 있다.

그러나 종래의 LQ최적제어 등의 선형 제어방법만으로는 이러한 제어 특성을 만족하는 제어계통을 구성하기가 곤란하다. 이러한 회전계통은 정위성 계통으로 1차계통, 비진동성 2차계통, 또는 시간지연 요소를 수반하는 1차계통으로 표시된다.

본 연구에서는 이러한 회전계통을 우선 1차계통으로 보고 이 1차계통에 대하여 LQ제어기(주 제어기)와 보조 제어기를 이용하여 옵세트와 오버슈트가 없고 속응성이 양호한 유한시간 정정제어를 행하는 방법에 대해서 고찰한다. 다음에 실제의 플랜트가 모델로 가정한 1차계통과 상이하여 유한시간 정정제어만으로는 응답특성이 열악해지는 것을 보완하기 위해서, 1차계통의 모델에 대한 유한시간 정정제어계통의 출력을 이상적인 응답으로 보고 이를 규범모델로 삼고 플랜트의 출력이 이 규범모델의 출력에 잘 추종하도록 하는 적응속도 제어계통을 구성하는 방법

을 제안한다. 일반적으로 플랜트의 파라미터값을 정확하게 파악하기가 어려운 점을 감안하여 본 연구에서는 적응제어기로서 퍼지추론을 이용한 퍼지적응제어기를 사용한다.

또한 플랜트의 전달함수가 규범모델의 제어대상과 같이 1차계통으로 기술되나 파라미터의 값이 다를 때와 비진동성 2차계통, 또는 지연시간을 수반하는 1차계통으로 표시되는 경우에 대해서 수치계산 및 응답 시뮬레이션을 통하여 LQ제어 및 유한시간 정정제어와 규범모델 추종 적응제어의 결과를 비교, 분석하고, 플랜트와 제어기의 파라미터 사이의 관계, 제어성능 등에 대해서 검토하여 본 연구에서 제안하는 방법의 유효성을 확인하고자 한다.

제 2 장 1차계통에 대한 최적제어

2.1 LQ 제어기 설계

Fig. 2.1과 같이 적분기가 직렬로 추가된 제어대상에 대한 LQ 제어 문제를 고찰한다. Fig. 2.1에서 $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$ 라고 놓으면 식(2.1)과 식(2.2)와 같은 상태방정식을 얻는다.

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= C^T x \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y &= C^T \Delta x \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

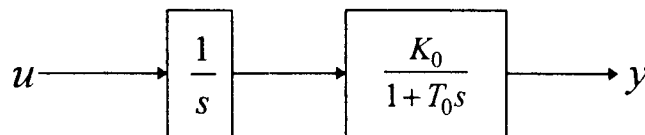


Fig. 2.1 The Block Diagram of the System

2차형식의 평가함수를 식(2.3)과 같이 정의하고, 이 평가함수를 최소로 하는 식(2.2)의 시스템에 대한 최적제어 입력을 Δu^0 라고 하면 이는

식(2.4)과 같이 구해진다[1].

$$J(\Delta u) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\Delta x^T W \Delta x + \Delta u^T V \Delta u) dt \quad (2.3)$$

$$\Delta u^o = -V^{-1} B^T R \Delta x \quad (2.4)$$

따라서 시스템 식(2.1)에 대한 최적제어 입력 $u^o(t)$ 는 식(2.5)와 같이 되고 이와 같이 설계된 최적제어 계통을 블록선도로 표시하면 Fig. 2.2 와 같이 된다.

$$u^o = u_r - V^{-1} B^T R (x - x_r) \quad (2.5)$$

식(2.4)는 다시 식(2.6)으로 되고 이를 라플라스 변환시키면 식(2.7)로 되어서 적분기를 부가한 1차계통에 대한 LQ최적제어기는 PD제어기가 된다.

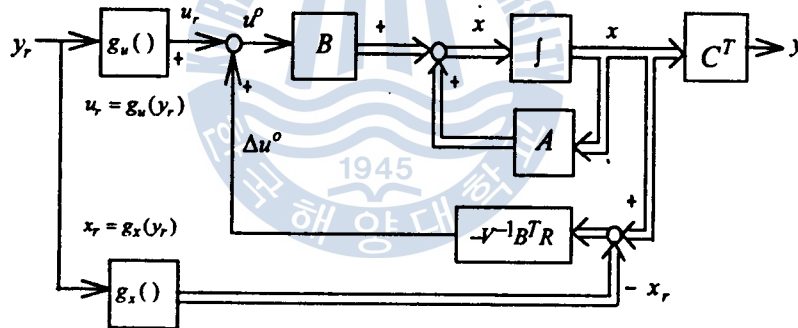


Fig. 2.2 The block diagram of LQ control system

$$\Delta u^o(t) = -[\sqrt{w}(x_1 - x_{1r}) + \frac{1}{K_0}(\sqrt{1 + 2K_0 T_0 \sqrt{w}} - 1)(x_2 - x_{2r})] \quad (2.6)$$

$$\Delta U^o(s) = (K_1 s + K_2) E(s) \quad (2.7)$$

이 PD제어기와 적분기를 합하면 1차계통에 있어서 오프셋이 없는 LQ최적제어기는 PI 제어기가 됨을 알 수 있으며, 이 제어기의 출력을 K_2 로 나눈 것을 $u_1(t)$ 라고 하면 식(2.8)을 얻는다. (단, $U_1(s)$ 는 $u_1(t)$ 의 라플라스 변환이다.)

$$\Delta U_1(s) = \frac{(1 + \beta s)}{s} E(s) \quad \text{단, } \beta = \frac{K_1}{K_2} \quad (2.8)$$

2.2 유한시간 정정제어 및 보조제어기 설계

LQ최적제어 이론에 의하여 설계된 PI 제어를 주 제어기로 하고 병렬로 보조 제어기를 부가하여 목표치 변동에 대한 유한시간 정정제어계를 Fig. 2.3과 같이 구성한다.

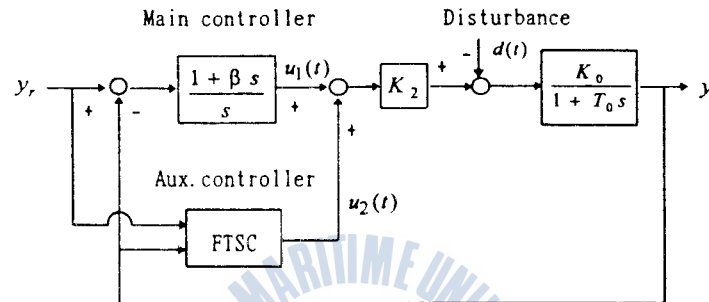


Fig. 2.3 The Proposed FTS Control System

Fig. 2.3의 피드백 제어계에 있어서 목표치로서 크기 A 의 계단상 입력이 가해졌을 때 보조제어기가 없는 경우의 응답을 $y_1(t)$ 라고 하면 $y_1(t)$ 는 식(2.9)와 같이 된다.

$$y_1(t) = A(1 - \sqrt{1 + \gamma_0^2} \cos(\omega_0 t - \tan^{-1} \gamma_0) + \beta(1 + \gamma_0^2) \omega_0 e^{-\alpha_0 t} \sin \omega_0 t) \quad (2.9)$$

동시에 PI 제어기의 뒤에 크기 $m_2 A$ 의 계단상 입력을 가했을 경우의 응답을 $y_2(t)$ 라고 하면 $y_2(t)$ 는 식(2.10)과 같이 된다.

$$y_2(t) = m_2 A(1 + \gamma_0^2) \omega_0 e^{-\alpha_0 t} \sin \omega_0 t \quad (2.10)$$

식(2.9)과 식(2.10)의 합 즉, 위의 두 입력에 대한 계통의 응답을 $y_3(t)$ 라고 하면 식(2.11)을 얻는다.

$$y_3(t) = y_1(t) + y_2(t) = A(1 - \sqrt{1 + \alpha^2} e^{-\alpha_0 t} \cos(\omega_0 t + \phi)) \quad (2.11)$$

식(2.10)의 감쇠진동 응답이 제어오차가 A 에서 점점 줄어 최초로 0이 되는 시간을 t_s 라 하면 t_s 는 식(2.11)로부터 다음과 같이 구하여 진다.

$$t_s = \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \quad (2.12)$$

다음에 $t=t_s$ 에서 역시 PI 제어기 뒤에 크기 $-m_1A$ 의 계단상 입력을 가했을 때의 전 계통응답을 $y_4(t)$ 라고 하면 식(2.13)를 얻는다.

$$y_4(t) = m_1A(1+\gamma_0^2)\omega_0 e^{r_0(\frac{\pi}{2}-\phi)} e^{-\alpha_0 t} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (2.13)$$

따라서 계통의 전 응답을 $y_o(t)$ 라고 하면 $y_o(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$y_o(t) = A(1-\sqrt{1+\alpha^2}-m_1(1+\gamma_0^2)\omega_0 e^{r_0(\frac{\pi}{2}-\phi)}) e^{-\alpha_0 t} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (2.14)$$

식(2.14)에서 만일 식(2.15)를 만족하도록 m_1 의 값을 결정하면 식(2.14)은 식(2.16)와 같이 되어, 유한시간 정정제어를 행할 수 있으며 t_s 는 유한정정시간이 된다.

$$m_1 = \frac{\sqrt{1+\alpha^2}}{(1+\gamma_0^2)\omega_0} e^{-r_0(\frac{\pi}{2}-\phi)} \quad (2.15)$$

$$y_o(t) = A, \quad (t \geq t_s) \quad (2.16)$$

보조 제어기의 출력은 다음과 같다.

If y_r is changed stepwise as large as A , $t=0$)

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

(b)FTS Control : $u_2(t)=A(m_2u_o(t) - m_1u_o(t-t_s))$

$u_o(t)$: Unit-step function

제 3 장 규범모델 추종방식에 의한 적응제어

3.1 적응제어 시스템의 구성

본 연구에서는 적응 제어계통의 가장 대표적인 것이라고 할 수 있는 모델규범형 적응제어(Model Reference Adaptive Control)[2],[3]를 Fig. 3.1과 같이 구성하기로 한다.

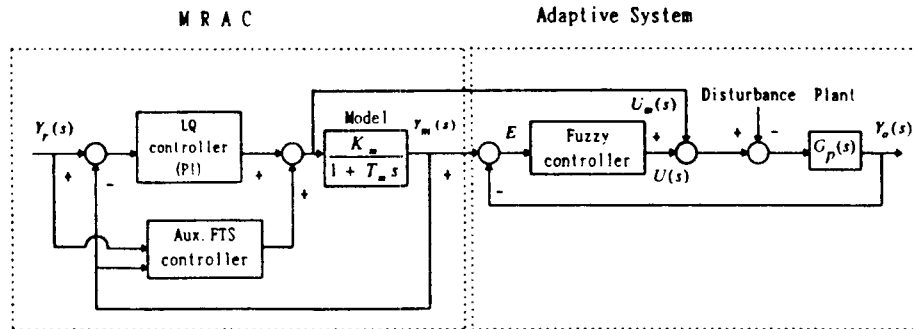


Fig. 3.1 The Model Reference Adaptive Control System

3.2 적응제어 시스템의 특성

Fig. 3.1의 규범모델 적응제어 시스템에서 추종부분만을 등가변환하여 블록선도로 나타내면 Fig. 3.2와 같이 된다.

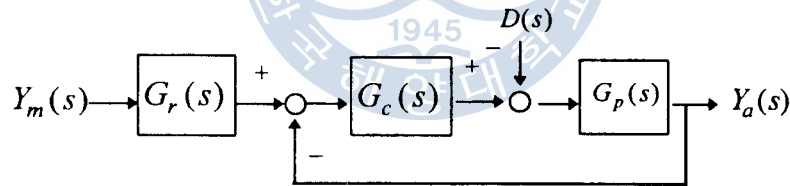


Fig 3.2 The Model Following System

이 추종시스템에 있어서 정상편차(오프셋)를 없애려면 적응제어기는 적분기를 포함하고 있어야 한다.

3.3 적응제어기 $G_c(s)$ 의 설계

본 연구에서는 $G_c(s)$ 에는 적분기가 포함되어 있어야 한다는 점과 간단한 알고리즘으로 실현할 수 있어야 하는 점 등을 감안하여 적응제어기로써 Fig. 3.3의 블록선도로 표시되는 속도형 퍼지제어기를 이용하는 방법을 제안한다[4].

Fig. 3.3에서 퍼지제어기의 입력 변수 E_i 와 ΔE_i 는 플랜트에서 얻는

e_i 와 Δe_i 를 각각 기준화 하여 식(3.1)과 같이 계산한다.

$$E_i = \frac{e_i}{e_{\max}}, \quad \Delta E_i = \frac{\Delta e_i}{\Delta e_{\max}} \quad (3.1)$$

또한 퍼지제어기의 출력은 식(3.2)과 같이 계산된다.

$$\Delta U_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta U_{\max}}, \quad U_i = U_{i-1} + \Delta U_i \quad (3.2)$$

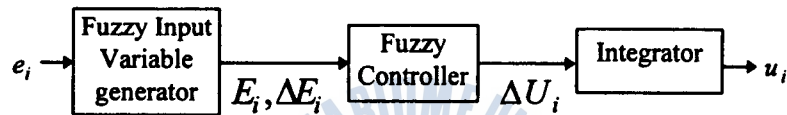


Fig 3.3 The Block Diagram of the Adaptive Controller

본 연구에서는 퍼지 입력공간을 각각 2개로 분할하고 식(3.3), (3.4)와 같이 단순한 제어 규칙을 사용하기로 한다[5][6].

$$\text{제어규칙1 } R^1; \text{ if } E_i \text{ is } P \text{ and } \Delta E_i \text{ is } P \text{ then } \Delta U_i \text{ is } P' \quad (3.3)$$

$$\text{제어규칙2 } R^2; \text{ if } E_i \text{ is } N \text{ and } \Delta E_i \text{ is } N \text{ then } \Delta U_i \text{ is } N' \quad (3.4)$$

전건부 P , N , 후건부 P' , N' 의 소속함수로는 식(3.5) 및 (3.6)과 같이 표시되는 함수를 이용하기로 한다.

$$P(x) = \frac{1}{2}(1+x), \quad N(x) = P(-x) \quad (3.5)$$

$$P'(x) = b(x-1)+1, \quad N'(x) = P'(-x) \quad (3.6)$$

제어규칙 R^1 과 R^2 에 대한 퍼지추론은 Tsukamoto가 제안한 방법을 간략화하여 이용하기로 한다[7]. 즉, 플랜트에서 나오는 정보 E_i 및 ΔE_i 로부터 퍼지제어기의 출력을 식(3.7)과 식(3.8)에 의해서 계산한다.

$$\omega_1 = P(E_i) \wedge P(\Delta E_i), \quad \omega_2 = N(E_i) \wedge N(\Delta E_i) \quad (3.7)$$

$$\Delta U_i = \frac{\omega_1 P'^{-1}(\omega_1) + \omega_2 N'^{-1}(\omega_2)}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.8)$$

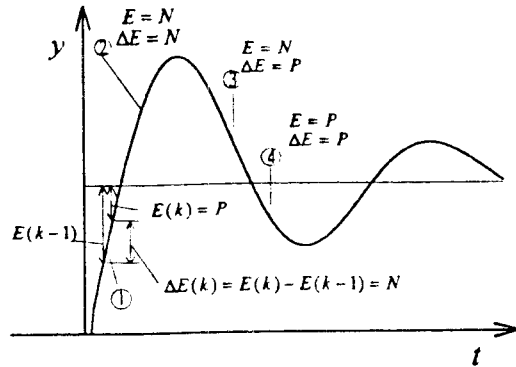


Fig. 3.4 Characterization of Indical Response

제 4 장 시 물 례 이 선

4.1 규범모델의 응답 시물레이션

$K_0=1$, $T_0=3$ 인 제어대상에 대하여 상대 하중계수 w 가 1 에서 10^4 까지 변화할 때 LQ 최적제어에 의한 인디셜응답 즉, 식(2.9)의 $y_1(t)$ 의 변하는 모양을 도시하면 Fig. 4.1과 같이 되어 LQ 최적제어에서는 w 를 크게 하여 속응성을 양호하게 하려면 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 다음에 규범모델에 있어서 제어 대상의 시정수 $T_m=1$, 정상이득 $K_m=1$ 로 하였을 때 유한시간 정정제어에 의한 규범모델의 출력 즉, 이상적인 응답을 계산하여 도시하면 Fig. 4.2와 같이 된다.

다음에 Fig. 2.3의 피드백 제어계통에 있어서 전술한 제어대상에 대하여($K_0=1$, $T_0=3$), $w=10000$ 일 때의 LQ 최적제어에 대한 인디셜응답을 구해 보면 Fig. 4.3의 (a)와 같이 되고, 이 경우 $\zeta=0.7076$ 로서 약 19%의 오버슈트가 발생한다. 또 보조 제어기의 출력에 의한 제어계통의 응답 $y_2(t)$ 를 구해 보면 Fig. 4.3의 (b)와 같이 되어, 이 두 응답의 합은 (c)와 같이 된다. 이 때 유한 정정시간 t_s 는 0.2027sec가 된다.

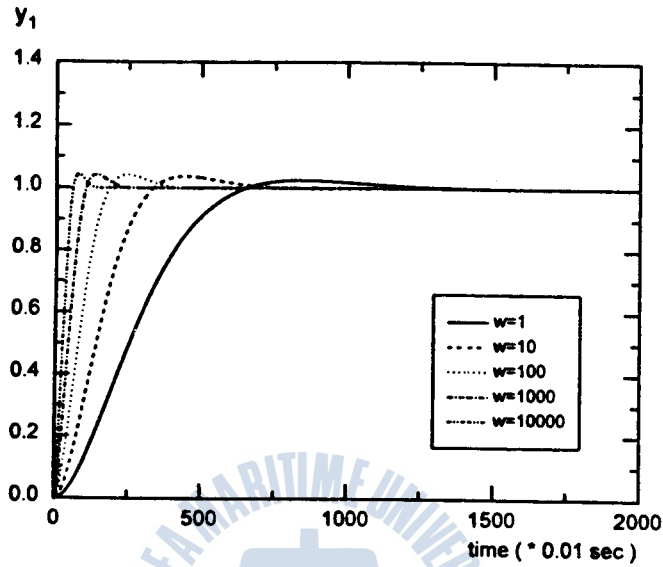


Fig. 4.1 Indicial Responses of LQ control
($K_0 = 1, T_0 = 3$)

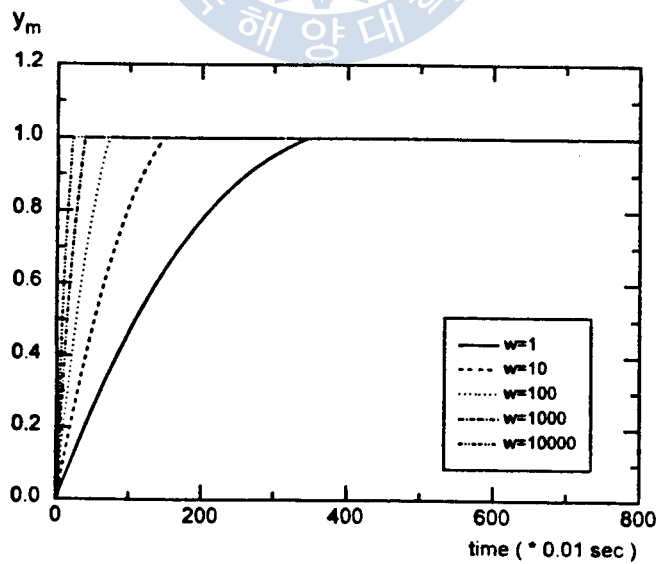


Fig. 4.2 Ideal Response of the Nominal Model
($K_m = 1, T_m = 1$)

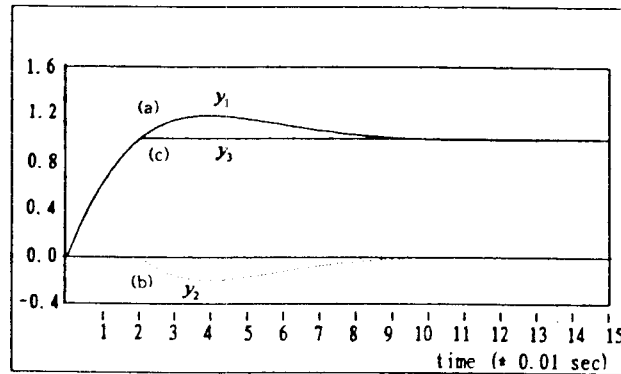


Fig. 4.3 Indicial Responses of the Nominal Model System
 $(K_0=1, T_0=3, w=10000)$

제 5 장 응답 시뮬레이션 고찰

- (1) 플랜트가 1차계통이나 정상이득 K_p 나 시정수 T_p 의 값이 모델의 것과 다른 경우의 스텝응답은 본 연구에서 제안한 규범모델 추종 방식의 적응제어에 의한 플랜트의 출력 $y_a(t)$ 는 규범모델의 출력 $y_m(t)$ 와 거의 일치하고 있다.
- (2) 1차계통인 플랜트의 입력 측에 계단상의 외란이 가하여졌을 때 이에 대한 억제특성은 적응제어를 행하는 경우 외란의 억제특성이 많이 개선되었음을 알 수 있다.
- (3) 플랜트가 비진동성의 2차계통일 때의 스텝응답은 퍼지제어기 이득의 값에 따라 특성이 다소 상이하지만 응답특성이 많이 개선되었음을 알 수 있다.
- (4) 각각 플랜트가 시간지연 요소를 수반하는 1차계통으로 표시되는 경우에 대한 스텝응답과 외란에 대한 응답을 나타내며 지연시간이 작을 때에는 적응제어 시스템의 출력은 규범모델의 출력과 거의 일치하고, 지연시간이 클 때에도 응답특성이 많이 개선됨을 알 수 있다.

제 6 장 결 론

- (1) LQ제어에 있어서 평가함수의 상대하중계수 w 의 값을 조정함으로써 요구되는 임의의 작은 정정시간을 얻을 수 있다.
- (2) 보조 제어기 출력의 크기를 작게 하면서 정정시간을 짧게 하기 위해서는 주 제어기로 적분 제어기($\beta=0$)보다 PI 제어기($\beta \neq 0$)가 유리하며 보조 제어기의 출력계수 $m_2=0$ 으로 하고, β 를 크게 하는 것이 유리하다.
- (3) 플랜트가 1차계통일 때에는 정상이득과 시정수의 값이 모델과 상당히 다르더라도 단순한 알고리즘의 퍼지 제어기만으로도 플랜트의 출력은 규범모델의 이상적인 출력과 거의 일치하며 외란에 대한 억제특성도 대단히 양호하다.
- (4) 플랜트가 2차계통일 때에는 완전한 유한시간 정정제어는 이루어지지 않더라도 적응제어를 행하므로써 응답이 현저히 개선된다.
- (5) 플랜트가 지연요소를 수반하는 1차계통으로 지연시간이 작을 때에는 적응제어 시스템의 응답특성이 양호하다.

그러나 퍼지제어기의 파라미터값을 적합하게 결정하는 문제와 플랜트가 고차계 정위성 계통일 때 또는 큰 값의 지연시간을 갖는 경우의 효과적인 적응제어기를 구성하는 방법 등에 대해서는 앞으로 더욱 연구되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 廣田實, “船舶制御システム工學”, 第12章, 成山堂, 1982
- [2] 金井喜美雄, “ロバスト適應制御 入門”, p.15, オーム社, 1989.
- [3] Hans Butler, “Model Reference Adaptive Control”, Prentice Hall, 1992.
- [4] 하주식, 송문헌 : 규범모델 추종방식에 의한 회전계통의 적응속도 제어에 관한 연구, 한국박용기관학회지, vol.19, No.3, pp.255-261, 1995
- [5] 菅野道夫, “ファジイ制御”, P.84, 日刊工業新聞社, 1988

- [6] Kawaji, S. and Matsunage, N. : Design of Fuzzy Control System based on PD Controller Scheme, IFSA '91 Brussels, July 7-12, 1991, Vol : Engineer, pp.77-80
- [7] Tsukamoto, Y. : An approach to fuzzy reasoning method, in advances in fuzzy set and Applications, gupta, M.M., Ragade, R.K., Yager, R.R.(eds.), North-Holland, 1979.



