

신경망에 의한 2 자유도 PID 제어기의 설계

Design of 2-DOF PID control system by a Neural network

허진영 · 김홍렬 · 하홍곤 · 고태언**

(Dong-Won Kang · Dea-Sung Kim · Hong-Kon Ha · Tae-En Ko)

Abstract - In this paper, we consider to apply of 2-DOF (Degree of Freedom) PID controller at D.C servo motor system. Many control system use I-PD, PID control system. but the position control system have difficulty in controlling variable load and changing parameter. We propose neural network 2-DOF PID control system having feature for removal disturbances and tracking function in the target value point. The back propagation algorithm of neural network used for tuning the 2-DOF parameter ($\alpha, \beta, \gamma, \eta$). We investigate the 2-DOF PID control system in the position control system and verify the effectiveness of proposal method through the result of computer simulation.

I. 서론

위치제어계에서 PID 제어기법이 주로 사용되나 고정밀 고정도의 위치 제어계에서는 목표치 추종에 대한 대해서 P(비례), I(적분), D(미분)의 파라메타 값들은 외란에 강인하게 제어하려면 파라메타 값이 다르게 설정되어야 하므로 만족한 제어가 어렵다.^{[1]-[2]}

PID 파라메타 설정치를 목표치에 잘 추종되도록 설정하면 외란 제어기능시 난조가 발생하게 되고, 외란에 강인하게 파라메타 값을 설정하면 목표치 추종에 문제점이 발생된다. 이와같이 위치제어계에서 PID 파라메타를 외란과 목표치 추종성능에 모두 만족하기 위해서 보다 고정밀 제어에 용이한 2자유도(Degree Of Freedom) PID를 제안한다. 2자유도는 PID 제어기의 구현에는 목표치 필터형, 루프 보상형, 미분 선행형 등이 있으나 각각 구성방법에 따라 응답 특성도 상당히 다르다. 2자유도의 확실한 특징은 기존의 PID 파라메타와 2자유도 구성의 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 계수를 적절히 설정 하므로써 목표치 추종과 외란 특성에 아주 효과적으로 제어 할 수 있다는 점이다. 그래서 강인성을 가진 2자유도를 이용하므로써 만족하는 제어특성을 얻을 수 있을 것이다. 지금까지 외국에서는 PID 제어계에 대해 연구는 활발하게 이루어지고 있다.^{[3]-[10]}

본 논문에서는 직류 서보 전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에서 부하변동에 따른 파라메타 변화, 외란 등에 강인성 제어인 2자유도를 구성하여 그 위치제어계의 양호한 특성을 고찰하려고 한다. 2자유도의 각 파라메타 설정은 신경망 튜닝기법을 이용하고 신경망의 역전파 알고리즘(Back-propagation) 알고리즘으로 2자유도의 각 파라메타를 조정 하므로써 2자유도에 의한 직류 서보전동기를 위치 제어계에서 강인한 제어 성능을 고찰 하도록 하였고 신경망 2자유도 PID 제어기를 제안하여 제어 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 그 성능을 검토 하였다.

II. 위치 제어계의 수학적 모델

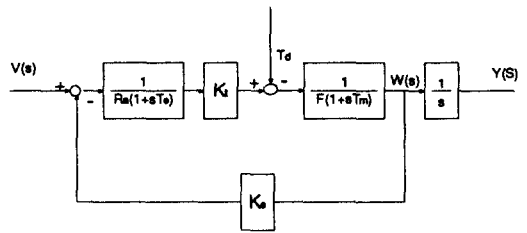


그림 1. 연속 시간 영역에서 직류 서보 전동기의 구성도

Fig 1. block diagram of the DC servo motor in the continuous-time domain

그림 1에 연속시간영역에서 직류 서보 전동기의 구성도를 보였다. 그림 1의 구성도에서 $V(S)$ 는 전기자 전압, $W(S)$ 는 각속도, $Y(S)$ 는 각위치, R_a 는 전기자 저항, K_a 는 토오크 상수, K_e 는 역기전력 상수, T_c 는 전기적 시정수, T_m 은 기계적 시정수, F 는 점성마찰계수, T_e 는 외란 및 부하토크이다. S 는 라플라스 연산자이다. 연속시간영역에서 각속도 $W(S)$ 와 전기자 전압 $V(S)$ 간의 전달함수는 T_e, T_m 의 조건에서 식 (1)과 같다.

$$\frac{W(S)}{V(S)} = \frac{K}{1+ST_0} \quad (1)$$

여기서 K 와 T_0 는 직류 서보 전동기의 이득 및 시정수로 다음 같이 정리된다.

* 동의대학교 공과대학 전자공학과 대학원

** 동의대학교 공과대학 전자공학과 교수

*** 동의대학교 공과대학 전기공학과 교수

$$K = \frac{K_t}{FR_a + K_e K_m} \quad (2-a)$$

$$T_0 = \frac{FR_a T_m}{FR_a + K_e K_m} \quad (2-b)$$

그리고 각위치 $Y(S)$ 와 전기자 전압 $V(S)$ 간의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y(S)}{V(S)} = \frac{K}{S(1+ST_0)} \quad (3)$$

식(3)의 전달함수를 이산시간영역의 전달함수로 변환하기 위해 Z.O.H(Zero-Order-Hold)를 직류 서보 전동기의 전기자 전압 측에 인가하여 Z-변환하면 다음과 같다.

$$\frac{W(Z^{-1})}{V(Z^{-1})} = \frac{a_2 Z^{-1}}{1 - a_1 Z^{-1}} \quad (4-a)$$

$$\frac{Y(Z^{-1})}{V(Z^{-1})} = \frac{a_3 Z^{-1} + a_4 Z^{-2}}{1 - (1+a_1)Z^{-1} + a_1 Z^{-2}} \quad (4-b)$$

여기서 Z^{-1} 은 지연 연산자 이다, 그리고 계수 a_1, a_2, a_3 및 a_4 는 다음과 같다.

$$a_1 = \exp(-T_s / T_0) \quad (5-a)$$

$$a_2 = K(1 - a_1) \quad (5-b)$$

$$a_3 = K(T_s - T_0(1 - a_1)) \quad (5-c)$$

$$a_4 = K(T_0(1 - a_1) - T_s a_1) \quad (5-d)$$

식 (13)을 구성도로 도시하면 다음과 같다.

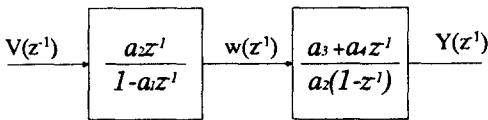


그림 2. 이산시간 영역에서 직류 서보 전동기의 구성도
Fig 2. Block diagram of the DC servo motor in the discrete-time domain

표 1. 직류 서보 전동기의 제정수

Table 1. Parameters of DC servo motor

$K_t : 0.457[N \cdot m/A]$	$K_e : 0.457[V \cdot sec/rad]$
$R_a : 1.63[\Omega]$	$T_l : 70[msec]$
$F : 0.0015[kg \cdot m]$	$T_m : 12[msec]$

III. 위치제어계의 신경망 2자유도 PID의 설계

1. 2자유도 PID의 구성

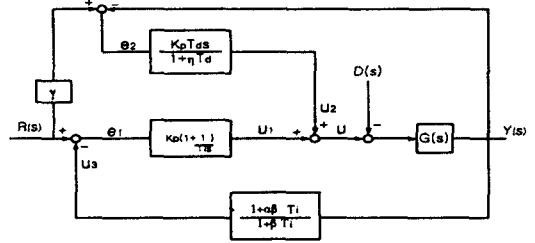


Fig 3. 루프 보상형 2 자유도 PID 제어기.

Fig 3. 2-DOF PID controller with loop compensator

그림 3에서 사용한 2자유도는 루프 보상형으로서

$K_p(1 + \frac{1}{T_s})$ 는 PI 제어기, $\frac{K_d T_s}{1 + \eta T_s}$ 미분항이며,

$\frac{1 + \alpha \beta T_s}{1 + \beta T_s}$ 는 보상요소로 개환 회로에 루프보상요소를 삽

입한 형태이다. 보상요소는 정상상태의 입력과 출력을 같게한다.

시스템의 설정치 $R(s)$ 와 조작량 $M(s)$ 간의 전달함수 식(6)과

같고 설정치와 $R(s)$ 와 출력 $Y(s)$ 간의 전달함수는 식(7)다.

전달함수를 정리하면 다음과 같다.

$$G_{RM}(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_s} + \frac{\gamma T_s}{1 + \eta T_s} \right) \quad (6)$$

$$G_{YM}(S) = K_p \left(\alpha + \frac{1}{T_s} - \frac{(\alpha - 1)(1 - \beta)}{1 + \beta T_s} \right) + \frac{\gamma T_s}{1 + \eta T_s} \quad (7)$$

식(6)에서 조작량에 관여되는 전달함수로 2자유도 파라메타는 γ 와 η 가, P,I,D 파라메타는 모두 포함하고 있어 외란에 대해서는 P,I,D 파라메타가 관계되어 분담하게 되는걸 알수 있다.

반면에 식(7)에는 설정치에 관계되는 전달함수로 2자유도의 각 파라메타 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 가 모두 관여 되므로 설정치에 대한 강인성 제어를 할 수 있다. 여기서 이 파라메타들을 적절한 튜닝만 하면 설정치와 외란에 대하여 상당히 만족스런 제어가 가능하다.

2. 신경망 튜닝의 모델과 튜닝방법

신경망 2자유도 PID 제어기에서 튜닝은 기존의 일반적인 PID 제어기와 같이 Ziegler-Nichols법, 한계감도법, 모델 매칭법 등이 이용되나 신경망 알고리즘을 이용하여 파라메타를 오차의 자승의 법칙으로 역전파 알고리즘을 이용한다. 이 알고리즘은 오차신호가 0로 갈때까지 연결강도를 조정하므로 2자유도의 각 파라메타 값을 조정하는 것이다 즉,신경망의 입력이 $e1, e2$ 이고 출력이 α, β, η 의 최소 오차가 되는 파라메타 설정을 계산해주는 알고리즘이다. 그 모델을 그림 (4)같이 구성된다.

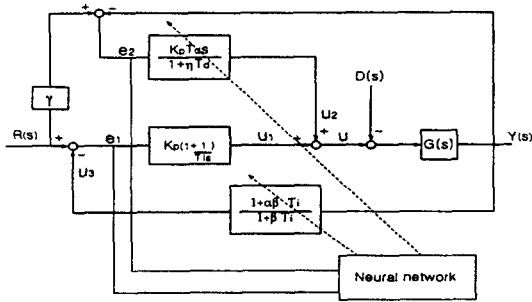


그림 4 신경망에 의한 2자유도 PID 제어계의 구성도.
Fig 4. Block diagram 2-DOF PID control system by neural network

그림 3의 2자유도 PID 제어를 튜닝을 위해 그림 4와같이 신경망 튜닝 모델을 구성한 것이다. 그리고 식(7)에서 분모를 변형시키면 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} \text{분모} = & K_p [1 + (\alpha - 1)\beta] \left[1 + \frac{1}{(1 + (\alpha - 1)\beta) T_d s} \right] \\ & + \frac{1}{\{1 + (\alpha - 1)\beta\}} \left\{ \frac{\beta(\alpha - 1)(1 - \beta) T_i}{1 + \beta T_i} + \frac{\gamma T_d}{1 + \gamma T_d} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

로 정리되므로 여기서 $\alpha, \beta, \eta, \gamma$ 의 값들을 적당히 조절하면 튜닝이 된다. 이때 튜닝에 필요한 각각의 계수는 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} K_p^* &= K_p / [1 + (\alpha - 1)\beta] \\ K_i^* &= K_i / [1 + (\alpha - 1)\beta] \\ K_d^* &= K_d / [1 + (\alpha - 1)\beta] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 K_p, K_i, K_d 는 외란 억제 특성 최적 정수이고 K_p^*, K_i^*, K_d^* 는 2 자유도 PID 제어기의 최적 초기치를 이용한 제어정수를 구한 것이다. 식 (9) 관계를 이용하여 오차신호 e1과 e2를 신경망 입력으로 하여 즉, 제어기 입력에 들어가는 오차를 검출하여 오차가 최소가 되도록 α, β, η 값을 조정하면 식 (8)의 K_p, K_i, K_d 가 튜닝이 된다. 그래서 최적의 응답상태에서 2자유도 PID 신경망 제어기의 초기치 설정치와 각각의 이득은 표 2과 같다.

표 2. 파라메타 초기치
Table 2. Initial value for the parameters.

parameter	Kp	Ti	Td	α	β	γ	η
value	1.3	200	0.4	0.234	0.89	0.5	0.23

3. 신경망 학습 알고리즘

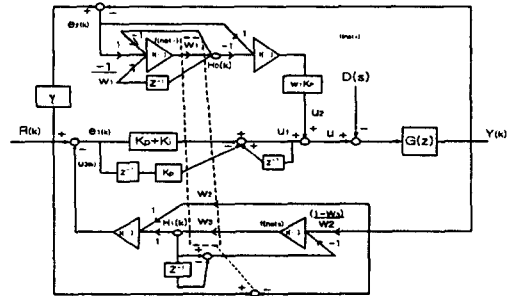


그림 5. 신경망 2자유도 PID 제어계
Fig 5 Neural network 2-DOF PID control system

그림 5에서 2자유도의 각 부분을 즉 PI 제어기 미분기, 보상요소 등을 이산이 영역에서의 신경망 모델로 구성된다. 먼저 역전파 알고리즘으로 구현하면 $\frac{1}{\eta}$ 을 w_1 으로 대체되며 보상요소 $\beta \frac{T_i}{T_d}$, α 을 w_2, w_3 로 대체하여 신경망 알고리즘으로 튜닝을 하게하는 것이다. 그래서 연결강도를 수정하기 위해서 오차함수는

$$E = \frac{1}{2} (R(k) - Y(k))^2 \quad (10)$$

식(10)에서 오차가 최소화 될 때까지 연결강도를 조정한다. 그래서 다음 식 과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} W_1(k+1) &= W_1(k) + \rho_1 (R(k) - Y(k)) f(net_1) \\ W_2(k+1) &= W_2(k) + \rho_2 (R(k) - Y(k)) f(net_3) \\ W_3(k+1) &= W_3(k) + \rho_3 (R(k) - Y(k)) Y(k) \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)에서 W_1 은닉층과 출력층의 연결강도 ρ_1, ρ_2, ρ_3 는 상수이다. W_2 는 은닉층과 출력층 그리고 W_3 는 입력층과 출력층을 연결하는 연결강도이다. $\{R(k) - Y(k)\}$ 가 0 아니면 수정계속되고 0 이면 수정완료된다.

IV. 시뮬레이션 및 고찰

그림 2의 제어대상을 그림 5에 2자유도 PID 제어기를 시뮬레이션 하기 위하여 먼저 직류 서보 전동기를 차분 방정식으로 변환 시켜야 하므로 그림 2 에서 직류 서보 전동기의 각속도 $W(k)$ 와 각위치 $Y(k)$ 에 대한 차분 방정식은 다음과 같이 된다.

$$W(k) = a_1 W(k-1) + a_2 V(k-1) \quad (12-a)$$

$$Y(k) = Y(k-1) + \left(\frac{a_3}{a_2}\right) W(k) + \left(\frac{a_4}{a_2}\right) W(k-1) \quad (12-b)$$

그리고 신경망 2자유도 PID를 이용하여 위치제어계의 제어특성

을 검토하기 위해서 마이크로 컴퓨터로 시뮬레이션 하였다. 먼저 직류 서보전동기는 식(12)에서 계수 a_1, a_2, a_3 및 a_4 는 표 2의 계정수를 이용하여 계산되도록 하였고 $\rho_1=0.002, \rho_2=0.001, \rho_3=0.01$ 이다. 먼저 PI 제어계의 특성과 2자유도의 특성을 비교하기 위해서 PI 제어계의 특성 곡선이 그림 6에 보여진다. 그리고 제어기의 파라메터 최적값은 $K_p=1.3, K_i=1.43, K_d=0.04$ 이고 2자유도의 계수는 $\alpha=0.234, \beta=0.893, \eta=0.23$ 이다.

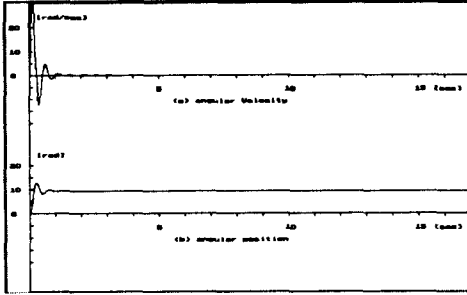


그림 6. PI 제어기의 응답
Fig 6. Response of PI control system.

그림 6에서 PI 제어기의 응답은 상당한 과도를 보이고 있다. 그래서 그림 7, 8, 9는 2자유도의 α, β, η 중 α 을 변화 시켜서 특성응답을 알아 본 것이다.

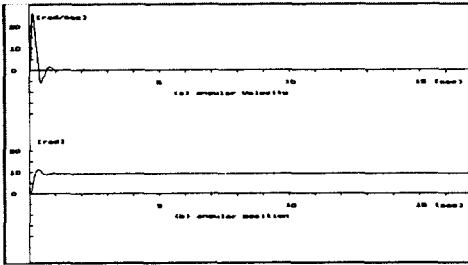


그림 7. α 을 변화 시킨 계응답. ($\alpha = 0.98$)
Fig 7. Response of system varying α .

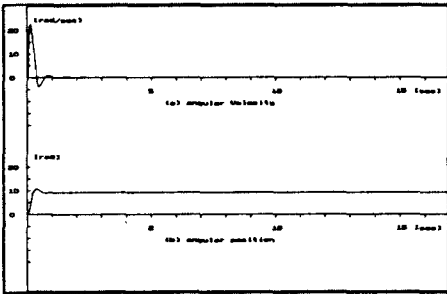


그림 8. α 을 변화 시킨 계응답. ($\alpha = 0.5$)
Fig 8. Response of system varying α .

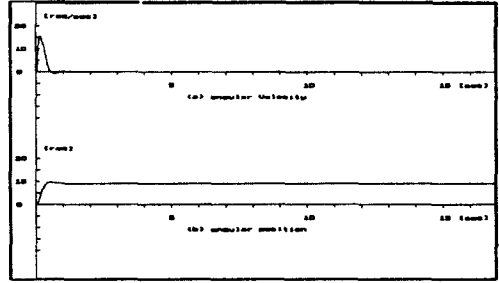


그림 9. α 을 변화 시킨 계응답. ($\alpha = 0.325$)
Fig 7. Response of system varying α .

위 그림 7, 8, 9에는 α 을 변화 시켰을 때 응답으로 파라메타 α 가 클 때 과도응답상태가 증가하고 α 가 적을 때 과도응답상태가 감소 하지만 지연시간이 길어진다. 다음은 β 을 변화 시켰을 때의 계응답 특성을 확인해본다. 그림 10, 11, 12에서 보여진다.

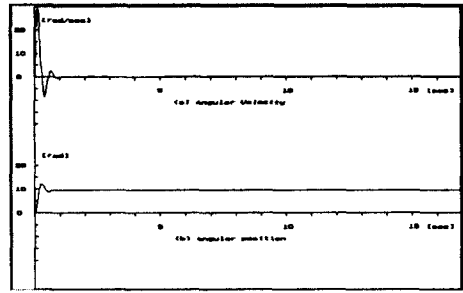


그림 10. β 을 변화 시킨 계응답. ($\beta = 0.25$)
Fig 7. Response of system varying β .

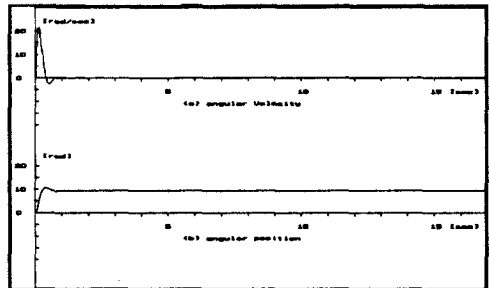


그림 11. β 을 변화 시킨 계응답. ($\beta = 0.457$)
Fig 11. Response of system varying β .

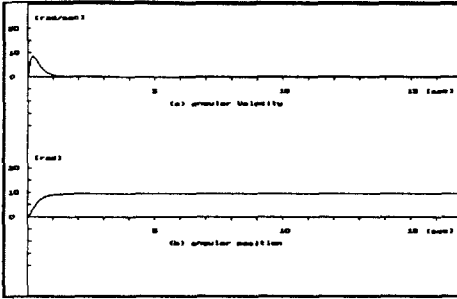


그림 12. β 을 변화 시킨 계응답. ($\beta = 0.893$)

Fig 12 . Response of system varying β .

그림 10, 11, 12에서 β 가 클수록 과도응답은 적어지고 지연시간이 길어진다는 것을 알 수 있다. 그리고 최적을 파라메타를 설정할 때 계응답은 그림 13에 보여진다.

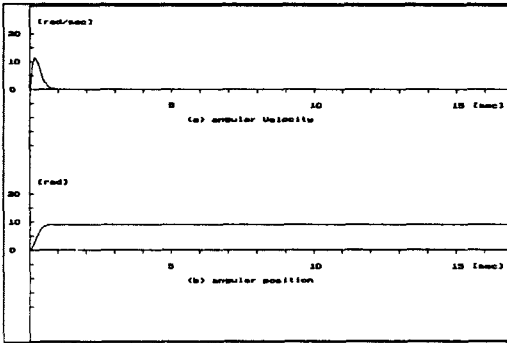


그림 13. α, β 을 변화 시킨 계응답. ($\alpha=0.234, \beta=0.893$)

Fig 13 . Response of system varying α, β .

그래서 2자유도 파라메타 $\alpha, \beta, \eta, \gamma$ 중 α, β 는 관여하고 η, γ 는 미소하게 관여한다. 그러므로 2자유도 파라메타를 적절히 튜닝하므로써 최적 목표치에 추종과 외란 성능에 강인하게 제어되는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 신경망 2자유도 PID제어기를 직류 서보 전동기 위치 제어시스템에 적용하여 부하 변동과 외란특성을 개선하기 위해서 목표치 추종과 외란에 강인성을 가지는 2자유도 PID를 구성하고 2자유도의 파라메타를 신경망 튜닝 기법으로 튜닝하므로써 보다 최적의 응답을 갖도록 파라메타를 조정하여 위치제어계의 위치응답과 각속도응답의 상당히 효과적으로 개선됨을 알 수 있었다. 신경망 2자유도 PID는 기존의 PID 제어기 보다 추종성과 외란 특성 개선에 보다 우수함을 보여주고 있으며 제어계의 지연이나 외란 난조에 등에 보다 강인하게 제어 할 수 있는 강인성 제어 제시하였다.

위치제어계에서 2자유도의 파라메타 $\alpha, \beta, \eta, \gamma$ 를 적절히 설정해주므로 소정의 제어성능을 검증 할 수 있었다. 그 파라메타 중 α 는 과도응답 관여하며 β 는 과도응답과 지연시간에 관여하여 그 값을 신경망으로 튜닝하여 추종성을 더욱 개선할 수 있었다. 이와같이 신경망 2자유도 PID 제어기는 기존의 제어기 보다 만족한 제어 성능을 검증 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] H. Butler, Ger Homderd, and Job von Amerongen, "Model Reference Adaptive of a Direct-Drive DC Motor", IEEE Control System Magazine Jan. 1989. Vol. 27, No 8, pp. 899~906, 1991.
- [2] 김동화, "유량제어계통에 대한 지능형 제어 알고리즘 적용연구," 한국자동제어 학술회의, 1997, 10 15-17.
- [3] D. H. Kim, " A study on the PID controller to Turbo generator," '96 KIEE conference Yong-Pyong.
- [4] M.Yuan, A.N.Poo and G.S Hong "Direct neural control system; Nonlinear extension of adaptive control" IEE. proc-control Theory, Appl, Vol. 142, No. 2, pp. 661~667. 1995.
- [5] Rumelhart. D. E., Hinton. G. E. and Williams. R. J., "Learning Internal Representation by Error Propagation", Parallel Distributed Processing, Vol. 1, MIT Press, pp.318-362, 1986.
- [6] K.J.Hunt, D.Sbarbaro, R.Zbikowski and P.J.Gawthrop "Neural networks for control systems-A survey" Automatica, Vol. 28, No 6, pp. 1083~1112. 1992.
- [7] D.Psalts. A. Sideris and A.A Yamamura "A multilayed neural network controller" IEEE Control system Magazine, No 2. pp. 17~21. 1988.
- [8] 田口秀文, " 2自由度 PID制御関係の最適パラメタ," SICE. vol. 23. no. 9, pp. 889-895, 1988.
- [9] 하홍곤, 고태언, 이태기 "마이크로 프로세서를 이용한 Servo 전동기의 적응제어" 동의대학교 산업기술 연구지 제 2권. pp.169~177, 1988.集. Vol. 29. No. 3, pp.340~346.1993.
- [10] 김동화 이원규, " 원자력 발전소에 대한 지능형 PID 제어기 응용연구." 기초전력 공학 공동 연구소 보고서. 1997, 9.