

---

# 신경망 전치보상기를 갖는 확대 I-PD 제어기의 설계

하 홍 곤\*

## The design of the expanded I-PD Controller with the Neuro-precompensator

Hong-Gon Ha

### 요 약

많은 제어기법들이 이산시간영역제어계의 제어성능을 개선시키기 위해서 제안되고 있다. 위치제어계에서 일반적으로 제어기의 출력이 제어대상의 입력으로 사용된다. 그러나 불필요한 잡음이 제어기의 출력에 포함된다. 그러므로 이러한 잡음을 제거하기 위해서 전치보상기를 사용할 필요가 있다.

본 논문에서 전치보상기를 갖는 확대 I-PD 제어계를 구성하였고 이 전치보상기와 I-PD제어기를 신경망으로 설계하였다. 그리고 전치보상기와 I-PD제어기의 계수들이 계의 응답특성들이 어떤 조건하에서 변할 때 계의 희망하는 응답이 되도록 자동적으로 조정되도록 하였다.

### Abstract

A many control techniques have been proposed in order to improve the control performance of the discrete-time domain control system. In the position control system, the output of a controller is generally used as the input of a plant but the undesired noise is included in the output of a controller. Therefore there is a need to used a precompensator for rejecting the undesired noise.

In this paper, The expanded I-PD control system with a precompensator is constructed. The precompensator and I-PD controller are designed by a neural network and these coefficients are changed automatically to be a desired response of system when the response characteristic of system is changed under a condition.

---

\* 동의대학교 공과대학 전자공학과 교수

접수일자 : 2000년 7월 29일

I. 서 론

고전제어기법인 PID제어기나 I-PD제어기는 산업 현장에서 여러 잇점 때문에 많이 이용되고 있다.<sup>[1][2]</sup> 그러나 PID제어기나 I-PD제어계의 동작 특성은 제어기의 이득에 따라 결정되므로 제어계에 알맞게 이득을 조정할 필요가 있다. 특히 외란이나 부하변동에 의해 계응답이 변화는 경우, 제어계의 이득을 재조정해야 하며 여기에 대해서 여러 연구가 이루어지고 있으며, 신경망을 이용하여 학습제어를 하는 연구들도 많이 보고 되고있다.<sup>[3][4]</sup> 그 중에서도 목표 신호와 실제 출력과의 자승 오차를 평가 함수로 하여, 이것을 최소로 하는 학습 방법인 역전파(Back propagation)알고리즘이 제안되어, 계층형 신경회로망에 의한 여러 가지 패턴 학습이 가능하게 되었다.<sup>[5]</sup>

신경회로망은 학습을 통하여 임의의 함수를 근사화 할 수 있고, 병렬분산 처리와 정보의 분류가 용이하다. 그리고 정확히 알지 못하는 시스템의 동역학 방정식을 신경회로망을 사용하여 근사화시킬 수 있다. 제어 관점에서 가장 널리 사용되는 신경회로망의 구조는 역전파 알고리즘을 이용하는 다층 신경회로망이다. 역전파 알고리즘은 연결 강도 및 바이어스(bias)의 초기값이 학습결과에 큰 영향을 미친다. 뿐만 아니라 학습계수, 은닉층 신경소자의 수 등이 제어기의 설계에 매우 중요한 문제가 된다.<sup>[6]</sup>

본 논문에서는 I-PD제어기로 제어되는 제어계에서 I-PD제어기의 출력 즉 제어대상의 입력을 한번 더 보상해 주기 위해서 전치 보상기를 사용한 확대 I-PD 제어계를 구성한다. 이 I-PD 제어기와 전치 보상기를 2개의 은닉층을 갖는 신경망으로 구현하였다. 신경망 내부의 연결가중치는 제어기의 각 이득에 대응하도록 구성하였고 이 연결가중치가 역전파 학습 알고리즘에 의해서 수정되도록 하였다. 제안한 제어기를 직류 서어보 전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에 적용하여 제어성능을 실험으로 입증하였다.

II. 확대 I-PD제어계의 구성 및 신경망 학습

일반적으로 I-PD제어기로 제어되는 제어계에서 제어기의 출력이 제어대상의 입력이 되지만 제어기의 동작시 불필요한 잡음이 포함되게 되므로 이것을 제거하기 위해서 그리고 외란이나 부하변동에 의한 계응답변동시 이것을 보상하기 위해서 전치 보상기를 갖는 확대 I-PD 제어계의 구성도가 그림 1이다.

그림1의 구성도에서  $R(k)$ 와  $Y(k)$ 는 기준입력과 계응답,  $K_i$ ,  $K_p$  그리고  $K_d$ 는 적분기, 비례기 그리고 미분기의 이득,  $1/H(Z^{-1})$ 은 전치보상기의 전달함수,  $T_s$ 은 샘플링시간이고  $G(Z^{-1})$ 는 제어대상의 전달함수로 다음과 같다.

$$G(Z^{-1}) = \frac{Z^{-d}B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} \dots\dots\dots (1)$$

그림 1에서 페루프전달함수  $M(Z^{-1})$ 는

$$M(Z^{-1}) = \frac{K_i T_s B(Z^{-1})}{(1 - Z^{-1})H(Z^{-1})A(Z^{-1}) + Z^{-d}B(Z^{-1})L(Z^{-1})} \dots\dots\dots (2)$$

이고  $L(Z^{-1})$  는 다음과 같다.

$$L(Z^{-1}) = K_i T_s + (1 - Z^{-1}) \left\{ K_i T_s + \frac{(1 - Z^{-1})}{T_s} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

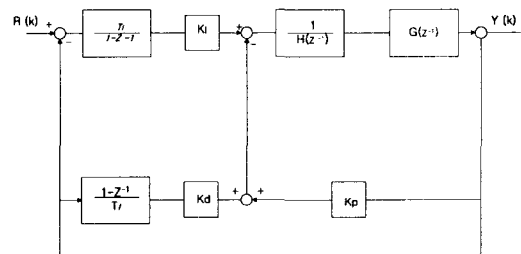


그림 1. 확대 I-PD 제어계의 구성.  
Fig. 1. Block diagram of the expanded I-PD control system.

제어대상을 직류 서어보전동기로 할 때  $G(Z^{-1})$  는 다음과 같다.<sup>[9]</sup>

$$G(Z^{-1}) = \frac{Z^{-1}(b_1 + b_2 Z^{-1})}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에서  $b_1, b_2, a_1$  그리고  $a_2$ 는 직류 서어보 전 동기의 계수들에 의해서 결정되는 상수이다. 식(4) 에서  $d=1$ ,  $A(Z^{-1})$ 의 차수는 2차, 그리고  $B(Z^{-1})$ 의 차수는 1차이므로 식(2)의 특성방정식과 식(3)에서  $H(Z^{-1})$ 의 차수는 최대 1차가 되어야 하므로

$$H(Z^{-1}) = h_0 + h_1 Z^{-1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

가 되어야 한다. 그러므로 전치보상기의 전달함수

$$\frac{1}{H(Z^{-1})} = \frac{1}{h_0 + h_1 Z^{-1}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

이고, 식(6)을 변형하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{H(Z^{-1})} = \frac{\frac{1}{h_0}}{1 + \frac{h_1 Z^{-1}}{h_0}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

이다. 식(7)을 이용한 전치보상기의 구성도가 그림 2 이다.

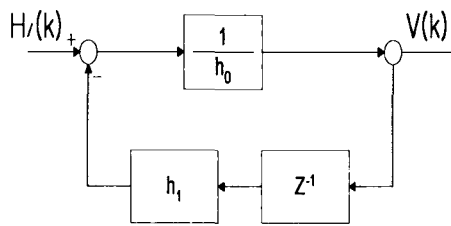


그림 2. 전치보상기 구성도.  
Fig 2. Block diagram of the pre-compensator.

위의 관계들을 이용해서 PD 제어기의 출력단에 은닉층 1, 적분기의 출력단에 은닉층 2 그리고 전 치보상기의 출력단에 출력층을 설정한 확대 I-PD 제어기의 구성도가 그림 3이다.

그림 3에서 활성화 함수  $f(x)=x$  이므로 출력 층의 출력  $V(k)$ 는

$$V(k) = b_j \{ W_{20} I_0 - W_{21} (W_{11} I_1 + W_{12} I_2) + c_j V(k-1) \} \quad \dots\dots\dots (8)$$

이다. 식(8)에서  $e(k), I_0(k), I_1(k)$  그리고  $I_2(k)$  는 기준입력과 계응답간의 오차신호, 적분기의 출 력, 비례기의 출력 그리고 미분기의 출력으로 다음 과 같다.

$$e(k) = R(k) - Y(k) \quad \dots\dots\dots (9-a)$$

$$I_0(k) = I_0(k-1) + T_I e(k) \quad \dots\dots\dots (9-b)$$

$$I_1(k) = Y(k) \quad \dots\dots\dots (9-c)$$

$$I_2(k) = \{ Y(k) - Y(k-1) \} / T_I \quad \dots\dots\dots (9-d)$$

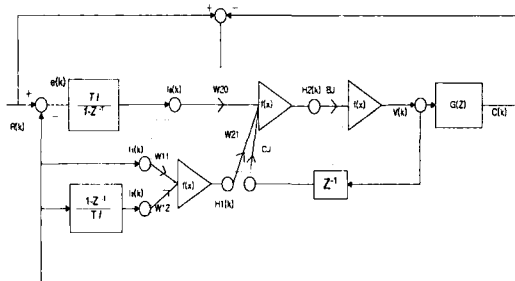


그림 3. 신경망에 의한 확대 I-PD 제어계의 구성도.  
Fig 3. Block diagram of the expanded I-PD control system by neural network.

적분기의 이득  $K_i$ , 비례기의 이득  $K_p$  그리고 미 분기의 이득  $K_d$  는

$$K_i = W_{20} \quad K_p = W_{11} W_{21} \quad K_d = W_{12} W_{21} \quad \dots\dots\dots (10)$$

이고, 전치보상기의 계수  $h_0$  와  $h_1$  은 다음 과 같다.

$$h_0 = \frac{1}{b_j}, \quad h_1 = c_j \quad \dots\dots\dots (11)$$

그림 3의 구성도에서  $H_1(k), H_2(k)$  그리고  $V(k)$ 는 은닉층 1과 2의 출력 그리고 제어대상의 입력으로 다음과 같다.

$$H_1(k) = I_1(k)W_{11} + I_2(k)W_{12} \dots\dots\dots (12-a)$$

$$H_2(k) = I_0(k)W_{20} + H_1(k)W_{21} + c_j V(k-1) \dots\dots (12-b)$$

$$V(k) = H_2(k)b_j \dots\dots\dots (12-c)$$

식 (12)에서  $W_{11}$  와  $W_{12}$  는 입력층과 은닉층 1 을 연결하는 연결강도  $W_{20}$  은 입력층과 은닉층 2 을,  $W_{21}$  은 은닉층 1과 은닉층 2을 연결하는 연결 강도, 그리고  $c_j$  는  $V(k)$ 를 한번 지연시킨  $V(k-1)$ 와 은닉층 2를 연결하는 연결강도이다. 연결강도  $W_{11}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{20}$ ,  $W_{21}$ ,  $c_j$  및  $b_j$  는 제어대상을 선형이라고 가정하여 역전과 알고리즘에 의해서 다음과 같이된다.

$$W_{11}(k) = W_{11}(k-1) + a_1 e(k)W_{21}(k)b_j(k)I_1(k) \dots (13-a)$$

$$W_{20}(k) = W_{20}(k-1) + a_2 e(k)b_j(k)I_0(k) \dots\dots (13-b)$$

$$W_{12}(k) = W_{12}(k-1) + a_1 e(k)W_{21}(k)b_j(k)I_2(k) \dots (13-c)$$

$$W_{21}(k) = W_{21}(k-1) + a_2 e(k)b_j(k)H_1(k) \dots\dots (13-d)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + a_3 e(k)H_2(k) \dots\dots\dots (13-e)$$

$$c_j(k) = c_j(k-1) + a_4 e(k)b_j(k)V(k-1) \dots\dots\dots (13-f)$$

식 (13) 에서  $W_{11}(k)$ ,  $W_{20}(k)$ ,  $W_{12}(k)$ ,  $W_{21}(k)$ ,  $b_j(k)$  그리고  $c_j(k)$  는  $W_{11}(k-1)$ ,  $W_{20}(k-1)$ ,  $W_{12}(k-1)$ ,  $W_{21}(k-1)$ ,  $b_j(k-1)$  그리고  $c_j(k-1)$  의 수정량이고  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  그리고  $a_4$  는 상수이다. 이 식(13)에서  $e(k) \neq 0$  이면 연결강도 는 식 (13)으로 수정되고  $e(k) = 0$  이면 수정이 완료된다.

### III. 실험 및 고찰

그림 3의 확대 I-PD제어계에서 제어대상  $G(Z^{-1})$  를 직류서어보 전동기로 하여 위치제어계를 구성하였으 며 이 위치제어계에서 제어기의 제어성능을 검토하였다. 실제로 사용한 직류 서어보 전동기의 제정수는 표 1과 같으며 이 확대 I-PD제어계의 실험구 성도가 그림4이다. 이 그림4의 구성도에서 각속도는 속도 검출기(T·G: Tacho generator)에서 그리고 각

위치는 전위차계(P·M: Potential meter)에서 아날로 그량으로 검출되어서 ADC에서 디지털량으로 변환 되어 PC에 인가된다. 이 전위차계는  $\pm 10V$ 가  $\pm 360^\circ$  가 되도록 설정하였다. 입력이 설정되면은 이 입력과 각위치에 의해서 식(9-a), 식(9-b) 그리고 식(9-c) 가 계산되고, 식(9-d) 의 각위치에 대한 미분이 각 속도 이므로  $I_2(k) =$  각속도로 하였다.

표 1. 직류 서어보 전동기의 제정수

Table 1. Parameters of DC servo motor

기 호	설 명	값	단 위
$R_m$	전기자 저항	2.6	$\Omega$
$L_m$	전기자 인덕턴스	0.18	$mH$
$J_m$	전기자 회전관성	$3.87 \times 10^{-7}$	$kg \cdot m^2$
$K_m$	역기전력 상수	0.00767	$N \cdot m / A$
$K_t$	토크 상수	0.00767	$N \cdot m / A$
$K_g$	기어비	14 : 1	

식(9)와 연결강도에 대한 수정식(13)이 계산되어 은닉층 1과 2의 출력  $H_1(k)$  와  $H_2(k)$ 가 식(12-a) 와 식(12-b)에서 계산되고, 이  $H_2(k)$ 와 식(13-e)에 의해서 출력층의 출력  $V(k)$ 가 식(12-c)에서 계산 된다. 이  $V(k)$ 가 DAC에서 디지털량이 아날로그 량으로 변환되어 직류 서어보 전동기를 구동하는 구동회로(D·C ; Drive circuit)에 인가되어 직류 서어보 전동기가 구동하게 된다. 인가한 기준입력  $R(k)$ 에 직류 서어보 전동기의 각위치가 얼마나 잘 그리고 정확하게 추종하는지를 고찰하기로 한 다. 기준입력  $R(k)$ 는 주기 2[sec] 그리고 진폭이  $\pm 30^\circ$ 인 펄스를 사용하였으며 샘플링시간  $T_s$ 은 10 [msec]로 하였다.

먼저 전치보상기는 사용하지 않고 순수 I-PD 제 어기로 제어되는 경우 신경망의 연결강도를 수정 하기 위한 수정식(13)의 초기치  $W_{11}(0)=0.23$ ,  $W_{12}(0) = 0.35$ ,  $W_{20}(0) = 0.13$ ,  $W_{21}(0) = 0.005$  이 고 상수  $a_1 = a_2 = a_3 = 0.0001$ , 그리고  $a_4 = 0.0002$  이다. 이때 전치보상기의 계수  $b_j(0)=1$  와  $c_j(0)=0$  이다.

이 I-PD 제어계의 계응답이 그림5이다. 그림5의 계응답에서 (a)는 각속도 그리고 (b)는 기준입력과 각위치의 응답을 보이고 있다. 그림5의 (a)에서 속도가 0되는 시간이 상당히 길며 그리고 불필요한 잡음이 상당히 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 속도의 변화에 의해서 위치가 기준입력에 추종하는데 약간의 과도 응답상태를 보이고 있어 정위치에 도달하는 시간이 길다. I-PD제어기로 제어되는 제어계에서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전치보상기를 사용하였다. 이 전치보상기의 연결강도는 식(13-e)와 식(13-f)에 의해서 수정되게

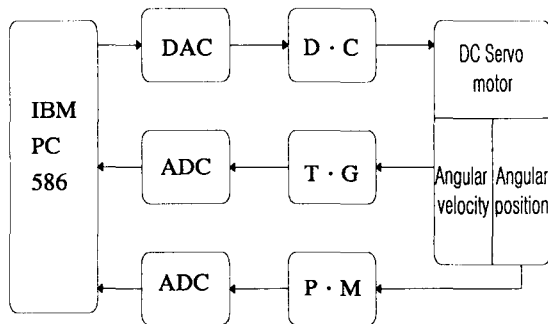
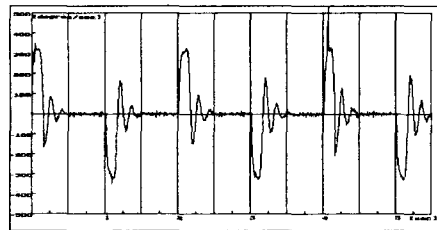
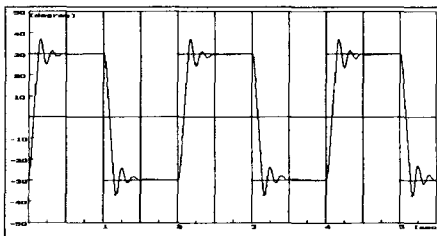


그림 4. 실험 장치의 구성  
Fig 4. Configuration of the Experimental setup



(a) Angular velocity

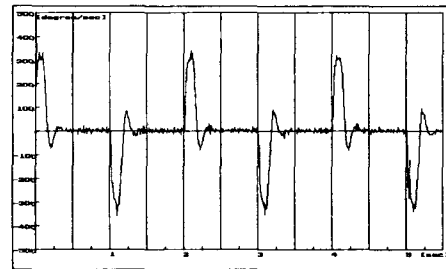


(b) Reference input and angular position

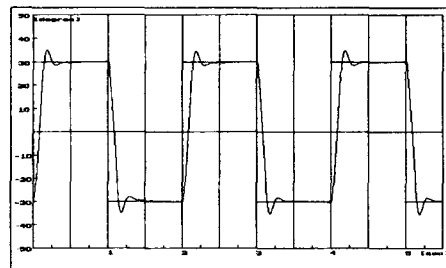
그림 5. I-PD제어계의 응답.  
Fig 5. Responses of I-PD control system

하였으며 이 식의 초기치를 변화 시켰다.

먼저  $b_1(0)=1$  으로 고정시키고  $c_1(0)=0.471$  그리고  $c_2(0)=0.057$ 로 변화시킨 계 응답특성이 그림 6과 7이다.  $c_1(0)$ 값이 큰 그림 6에서 계응답특성은 그림5에 비해서 상당한 잡음이 제거되고 과도 응답상태가 약간 제거 된 것을 알 수 있지만 그림 6의 (b)에서 목표치에 도달하는 시간은 과도응답상태가 완전히 제거되지 않아서 길다. 그래서 상승시간을 짧게 하기 위해서  $c_1(0)$ 을 0.057로 작게 한 그림7의 계응답은 그림6에 비해서 과도응답상태는 상당히 제거되어 목표치에 도달하는 시간은 단축된 것을 알 수 있다. 그러므로  $c_1(0)$ 의 값을 적게 할수록 즉 전치보상기 전달함수의 1차항계수  $k_1$  이 적을수록 과도응답상태의 제거가 효과적임을 알 수 있었다.



(a) Angular velocity



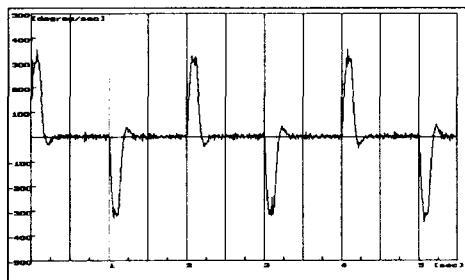
(b) Reference input and angular position

그림 6.  $b_1$ 을 변화 시켰을때 위치응답( $c_1=0.471, b_2=1$ )

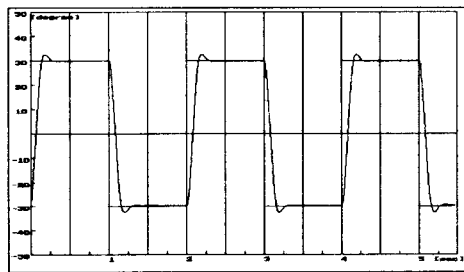
Fig 6. Response of The expanded I-PD Control system

그림7의 계응답상태를 개선하기 위해서  $b_1(0)$

=0.396로 한 계응답이 그림8이다. 그림8의 계응답에서 과도응답상태가 완전히 제거되고 상승시간도 상당히 개선된 것을 알 수 있다. 그러므로  $b_f(0)$ 을 적게 할수록 즉 전치보상기 전달함수의 상수항 계수  $h_0$ 이 클수록 상승시간이 단축되고 과도응답상태가 제거된 것을 알 수 있다.



(a) Angularvelocity



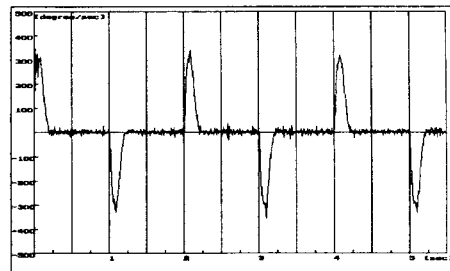
(b) Reference input and angular position

그림 7.  $b_f$ 을 변화 시켰을 때 속도응답( $c_f=0.057$ ,  $b_f=1$ )

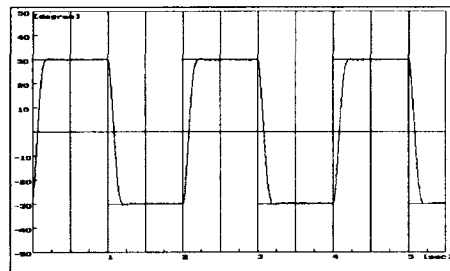
Fig 7. Response of system varying  $b_f$

#### IV. 결론

I-PD 제어기로 제어되는 제어계에서 제어기의 동작시 발생하는 불필요한 잡음이 발생한다. 이러한 잡음을 제거하기 위해서 전치보상기를 설계할 수 있는 방법을 제시하여 이 I-PD 제어기와 전치보상기를 2개의 은닉층을 갖는 신경망으로 구성하였다. 이 신경망의 연결강도는 제어기의 각 이득에 대응되게 하였으며 연결강도의 수정식은 제어대상이 선형이라고 가정하여 역전파 알고리즘으로 유도하였다. 제안한 제어기법을 직류 서보계를 적용하여 실험하여 다음



(a) Angular velocity



(b) Reference input and angular position

그림 8.  $c_f$ 을 변화 시켰을 때 속도응답( $c_f=0.057$ ,  $b_f=0.396$ )

Fig 8. Response of system varying  $c_f$

과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

전치보상기의 특성방정식에서 1) 상수항의 값이 작을수록 상승시간은 단축되지만 2) 1차항의 계수 값이 작을수록 과도응답제거에 효과적 이다.

이상의 결과에서 일반 제어계에서 전치보상기를 적절히 설계하여 사용하므로써 양호한 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 참고문헌

[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] Katsuhisa Endo, Yoshihisa. Ishida and Takashi Honda "Gain Adjustment of I-PD control system" T. IEE. Japan. Vol. 113-C, No. 6, pp. 409~416. 1993

- [3] G. Lightbody and G. W. Irwin "Direct neural model reference adaptive control" IEE. proc-control Theory. Appl., Vol. 142. No. 1, pp. 31~43. 1995.
- [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] 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.
- [9] 하동철 "위치 제어계에서 I-PD 제어기에 의한 위치제어" 석 사학위 논문. 동의대학교 전자공학과 대학원 1994.



하 홍 곤(Hong-Gon Ha)  
 1972년 동아대학교 전자공학과 졸  
 1977년 동아대학교 대학원 공학 석사  
 1984년 중앙대학교 대학원 공학 박사

현재 동의대학교 공과대학 전자공학과 교수  
 \*관심분야: 제어이론, 지능형 및 비선형제어등