

# 시스템 모델링이 불확실한 자동화 설비용 액츄에이터를 위한 간단한 지능제어 방식

(A simple intelligence control method for actuator of an automatic  
installation with the unknown system modelling)

孫東高\* · 李鎔求\*\* · 嚴基煥\*\*

(Dong-Seol Son · Yong-Gu Lee · Ki-Hwan Eom)

## 요 약

본 논문에서는 시스템 모델링이 어렵고 복잡한 자동화 설비를 위한 간단한 지능제어방식을 제안한다. 제안된 방식은 시스템 모델링이 불확실한 시스템에 대하여 입력신호와 직접 관계되지 않은 비선형 함수의 동정은 퍼지-신경회로망을 이용하고, 입력신호와 관계되는 비선형 함수는 동정을 하지 않고 임의의 양의 실수로 놓으므로 기존의 전체함수 동정보다 적은량으로 동정할 수 있고, 동정된 정보를 이용하여 비선형 제어를 설계하는 간단한 제어방식이다. 제안한 제어방식의 유용성을 확인하기 위하여 자동화 설비에 액츄에이터로 많이 사용되는 직류 서보전동기를 이용한 역진자 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 하고, 제안된 제어방식을 기존의 신경회로망 제어방식과 제어성능을 비교 검토한다.

## Abstract

In this paper, we propose a simple intelligent control method for an automatic installation of which system model is unknown and complex. Fuzzy-nural network is used in the identification of the nonlinear function which is not directly related to input signal, and the nonlinear function that are relation of input signal replace an arbitrary real number, with no identification, for unknown systems. Hence, the identification in the proposed control method can be manipulated the reduced calculation over a conventional identification method. And then, it designs a nonlinear controller with identified information and is a simple control method. In order to verify validity of the proposed control method, we compared the proposed control method with the conventional neural network control method through the simulation and experiment by applying a inverted pendulum system with DC servo motor used as an actuator of automatic installation.

\*正會員 : 유한전문대 전자과  
接受日字 : 1996年 11月 11日

\*\*正會員 : 동국대학교 공과대학 전자공학과

## 1. 서 론

현재까지 시스템 모델링이 어렵고 복잡한 전기설비의 자동화나 동작기계의 자동화, 그리고 컨베이어시스템의 제어에 직류 전동기가 많이 쓰이고 있으며, 이러한 복잡한 시스템의 자동화는 부분적으로 리미트 스위치나 각종 센서 등을 이용한 정보의 계측 및 검출, 스위치 트랜지스터, 솔리드 스테이트 논리회로에 의한 제어, 그리고 플립플롭, 카운터, 펄스발생기, 시프트 레지스터 등의 소자를 이용하여 구성되는 시스템 제어회로가 대부분이다. 그러나 이러한 시스템 제어회로는 하드웨어 적으로 구성되므로 시스템의 제어 목적이 약간 변경되었을 때 시스템을 위한 제어회로를 다시 구성하여야 하고 정밀성이 보장되지 않는 시스템인 경우에만 적용가능하게 된다<sup>1)</sup>.

또한 최근에는 하드웨어 및 소프트웨어의 급속한 발전으로 자동화 설비의 정보화·자동화가 급속히 연구되고 있다. 이러한 연구의 기본은 컴퓨터(하드웨어)와 소프트웨어로서, 컴퓨터는 마이크로일렉트로닉스 기술이 그 일익을 담당하며 마이크로일렉트로닉스는 서보기술의 바탕이 되고 있다. 이와 같이 정보화·자동화가 가속됨에 따라 여러가지 복잡한 서보 시스템이 등장하고 있으나 제어대상의 모델링이 어렵고 비선형성이나 주변환경의 변화등으로 종래의 선형제어 이론으로는 원하는 제어 성능을 얻기가 어려운 실정이며, 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근에는 신경회로망 제어방식, 퍼지제어방식, 퍼지-신경회로망 제어방식 등의 지능제어 알고리즘에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>2)~9)</sup>. 1965년 zadeh 교수에 의해 제안된 퍼지이론은 1974년 mamdani의 모형 증기기관제어에 성공적인 적용으로 퍼지제어에 관한 연구와 실용화가 활발하게 진행되어왔다<sup>7)</sup>. 또한 신경회로망은 1980년대 이후 다층퍼셉트론이 출현한 이후 신경회로망 고유의 비선형성, 학습능력 등으로 미지의 비선형 시스템의 제어에 많은 응용이 있었다<sup>2, 3, 4, 5)</sup>. 또한 1990년대에 퍼지논리와 신경회로망의 장점을 최대한 활용하고 단점을 보완하는 퍼지-신경회로망은 퍼지논리시스템에 역전과 알고리즘을 활용

하드웨어로서 기존의 현장 기술자에 의존하던 경험적 지식을 필요로 하지 않고 제어규칙을 자동 생성함으로서 퍼지논리시스템에 적응성을 갖게 함과 더불어 신경회로망의 비선형성, 학습능력 등의 장점을 지니게 되었다<sup>9, 10)</sup>. 최근 wang은 이러한 퍼지-신경회로망을 이용하여 미지의 시스템을 동정하고 제어를 설계하는 제어방식을 연구하여 많은 연구자들에게 연구의 자료가 되고 있다<sup>10)</sup>. 그러나 이 제어방식은 시스템 동정시 많은 계산량과 제어기 설계시에 시스템의 정보를 알아야만 한다.

본 논문에서는 시스템 모델링이 어렵고 복잡한 전기설비의 자동화나 동작기계의 자동화를 위하여 기존의 신경회로망을 이용한 지능제어방식보다 계산량이 적고 간단한 지능제어방식을 제안한다. 제안된 방식은 시스템 모델링이 불확실한 시스템에 대하여 입력신호와 직접 관계되지 않은 비선형 함수의 동정은 퍼지-신경회로망을 이용하고, 입력신호와 관계되는 비선형 함수는 동정을 하지 않고 임의의 양의 실수로 놓는 즉 전체의 시스템을 동정하지 않고 일부만 동정하는 새로운 동정모델을 구성한다. 구성된 동정모델로 시스템 동정을 하고, 동정된 정보를 이용하여 비선형 제어를 설계하는 간단하고 새로운 제어방식이다. 제안한 제어방식의 유용성을 확인하기 위하여 자동화 설비에 액추에이터로 많이 사용되는 직류서보전동기를 이용한 역진자 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 하고, 제안된 제어방식을 기존의 신경회로망 제어방식과 제어성을 비교 검토한다.

## 2. 퍼지-신경회로망을 이용한 간단한 제어기설계

단일입력 단일출력(single-input and single-output : SISO)을 갖는 비선형 시스템은 일반적으로 식 (1)로 된다.

$$\begin{aligned}x^{(n)} &+ f(x^{(n-1)}, x^{(n-2)}, \dots, x^{(1)}, x) \\ &= g(x^{(n-1)}, x^{(n-2)}, \dots, x^{(1)}, x)u \\ y &= x\end{aligned}\quad (1)$$

여기서  $x, u, y \in \mathbb{R}$ (실수)이며, 각각 비선형 시

시스템에 대한 변수, 입력 및 출력을 나타낸다. 식 (1)의 시스템 변수를 식 (2)의 상태 변수로 정의하면,

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^{(1)} \\ x^{(2)} \\ \vdots \\ x^{(n-2)} \\ x^{(n-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \vdots \\ y^{(n-2)} \\ y^{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

이고  $\dot{x}_n = y^{(n)}$ 이 된다. 식 (2)는 식 (3)의 상태 공간 모델로 되고,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= -f(\underline{x}) + g(\underline{x})u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\underline{x}$ 는 벡터  $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 이다. 여기서  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 는 시스템에 따라 결정되는 함수로서  $g(\underline{x})$ 는 일반적으로 영(zero)이 아닌 양의 실수이다<sup>10)</sup>. 시스템모델이 정확한 경우에는 시스템함수  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 를 이용하여 제어를 설계하지만<sup>11)</sup>, 시스템모델이 불확실한 경우에는  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 를 모두 동정하고, 동정된 정보를 이용하여 제어를 설계하는 연구가 현재까지 진행되어왔다<sup>3, 4, 5, 10)</sup>. 본 논문에서는 시스템모델이 불확정한 경우에는  $f(\underline{x})$ 만을 동정하고,  $g(\underline{x})$ 는 동정하지 않고 임의의 실수로 놓고 Lyapunov 안정조건을 만족하도록 하는 제어기설계 방식을 제안한다.

### 2.1 시스템모델이 정확한 경우의 서보제어기 설계

비선형제어기 설계는 시스템출력  $y(t)$ 가 원하는 기준 궤적  $y_d(t)$ 를 추종하도록 제어입력  $u(t)$ 를 계산한다. 오차  $e$ 를 식 (4)로 정의하고, 식 (5)의 조건을 만족하도록 제어입력  $u(t)$ 를 설계한다.

$$e(t) = y(t) - y_d(t) \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (5)$$

식 (3)의 비선형 시스템 모델에서  $g(\underline{x})$ 는 0보

다 큰 실수이므로,  $g(\underline{x})$ 에 대한 역(inverse)가 존재하므로, 비선형 궤환 제어기를 설계하면 식 (6)으로 된다.

$$u(t) = \alpha(\underline{x}) + \beta(\underline{x})v \quad (6)$$

여기서  $\alpha(\underline{x})$ ,  $\beta(\underline{x})$  및  $v$ 는 각각 식 (7), (8), (9)로 된다<sup>11)</sup>.

$$\alpha(\underline{x}) = \frac{-\sum_{i=1}^n k_{i-1}x_i + f(\underline{x})}{g(\underline{x})} \quad (7)$$

$$\beta(\underline{x}) = \frac{1}{g(\underline{x})} \quad (8)$$

$$v = \sum_{i=0}^n k_i y_d^{(i)} \quad (9)$$

식 (9)의  $v$ 는 전향경로로 가해지는 제어기의 일부분으로 전체제어기 (6)에 통합되어 궤환 제어기를 형성하고,  $k_i (i=0, \dots, n)$ 는 시스템이 안정하도록 임의로 지정되는 설계 파라미터이고,  $y_d(t)$ 를  $n$ 번 연속적으로 미분 가능하도록 설계한  $n$ 개 도함수를  $y_d^{(1)}, y_d^{(2)}, \dots, y_d^{(n)}$ 로 나타낸다. 식 (6)을 식 (3)에 대입하고,  $k_n=1$ 로 놓으면 오차다이나믹 방정식은 식 (10)으로 되고,

$$e^{(n)} + k_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + k_1e^{(1)} + k_0e = 0 \quad (10)$$

식 (10)의 오차다이나믹 방정식에 대한 특성 방정식을 구한것이 식 (11)이다.

$$s^n + k_{n-1}s^{(n-1)} + \dots + k_1s + k_0 = 0 \quad (11)$$

식 (11)의 특성 방정식의 근이  $s$ -평면 좌반평면에 존재하도록 설계 파라미터  $k_{n-1}, \dots, k_1, k_0$ 를 지정하면 식 (6)으로 설계된 제어기를 갖는 제어 시스템은 식 (5)를 만족한다.

### 2.2 퍼지-신경회로망을 이용한 시스템동정

시스템동정을 위해 사용하는 퍼지논리 시스템(Fuzzy Logic System : FLS)은 입력신호의 퍼지화, 퍼지규칙에 의한 퍼지 추론, 비퍼지화로 구성된다. 퍼지화부는 그림 1의 가우시안 퍼지 소속 함수를 사용하여 입력변수를 퍼지화하고, 수학적인 표현식은 식 (12)이다.

$$\mu_{F_i^l}(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right] \quad (12)$$

여기서  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 는 입력신호,  $l (l=1, 2, \dots, M)$ 은 퍼지소속 함수의 수를 나타내며,  $x_i^l, \sigma_i^l$

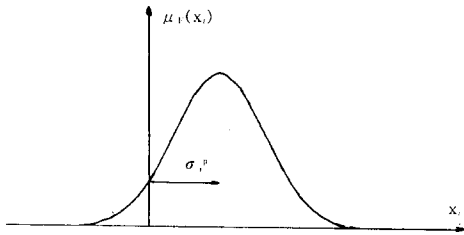


그림 1. 가우시안 형태의 소속함수  
Fig. 1. gaussian-type membership function

은 각각의 퍼지집합에서의 중심값과 표준편차를 나타낸다. 퍼지-추론부는 퍼지추론을 수행하며, T-norm(대수적 연산자)을 사용하면 식 (13)과 같다.

$$O^l = \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \quad (13)$$

여기서  $O^l$ 은 퍼지추론 후의 결과이다. 비퍼지화부는 추론후 퍼지집합을 실수로 변환시키는 역할을 담당하며, 무게중심법을 이용하면

$$\hat{f}(\underline{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left[ \left( - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[ \sum_{i=1}^n \exp \left( - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right]} \quad (14)$$

식 (14)로 된다. 식 (14)의 FLS의 출력  $\hat{f}(\underline{x})$ 가 임의의 함수  $f(\underline{x})$ 를 동정하기 위하여  $\bar{x}_i^l, \sigma_i^l, \bar{y}^l$ 을 역전과 알고리즘을 이용하여 조정하여 최적의 FLS를 구성하므로써 퍼지규칙의 자동생성 및 추

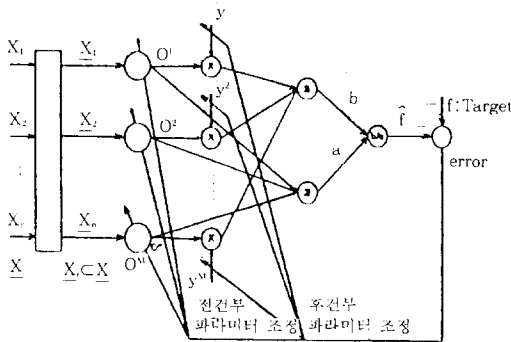


그림 2. 퍼지-신경회로망  
Fig. 2. Fuzzy-neural network

론을 한다. 이러한 FLS에 역전과 알고리즘을 갖는 퍼지 추론망을 퍼지-신경회로망이라 하며, 그림 2는 퍼지-신경회로망을 나타낸다.

퍼지-신경회로망을 이용하여 식 (3)의 비선형 시스템을 동정하기 위한 동정모델은 식 (15)로 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1^* &= x_2^* \\ \dot{x}_2^* &= x_3^* \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1}^* &= x_n^* \\ \dot{x}_n^* &= -\hat{f}(\underline{x}, \bar{x}_i^l, \sigma_i^l, \bar{y}^l) + \hat{g} \cdot u \\ y^* &= x_1^* \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ 은 동정모델의 상태변수이다. 여기서  $\hat{f}(\underline{x}, \bar{x}_i^l, \sigma_i^l, \bar{y}^l)$ 는 퍼지-신경회로망,  $\underline{x}$ 는 퍼지-신경회로망의 입력신호로서 상태변수,  $\bar{x}_i^l, \sigma_i^l$ 은 각각 전건부 소속함수의 중심값과 표준편차,  $\bar{y}^l$ 은 후건부 연결강도이다.

퍼지-신경회로망  $f(\underline{x}, \bar{x}_i^l, \sigma_i^l, \bar{y}^l)$ 가 식 (15)의 동정모델의 일부분으로 식 (16)의 목적함수가 최소화되도록 gradient법을 이용하여  $\bar{x}_i^l, \sigma_i^l, \bar{y}^l$ 를 최적의 값으로 조정한다.

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} [y^{(n)*} - y_d^{(n)}]^2 \\ &= \frac{1}{2} [-\hat{f}(\underline{x}, \bar{x}_i^l, \sigma_i^l, \bar{y}^l) + \hat{g} \cdot u - y_d^{(n)}]^2 \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)의 목적함수 J를 퍼지-신경회로망 함수  $\hat{f}(\underline{x}, \bar{x}_i^l, \sigma_i^l, \bar{y}^l)$ 의 연결강도  $\bar{y}^l$ 에 대하여 gradient descent법을 적용하면

$$\begin{aligned} \bar{y}^l(k+1) &= \bar{y}^l(k) - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \bar{y}^l} \\ &= \bar{y}^l - \eta \cdot [-f + \hat{g} \cdot u - y_d^{(n)}] \cdot \left( - \frac{o^l}{\sum_{l=1}^M o^l} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

로 되고,  $\bar{x}_i^l$ 에 대하여 적용하면 식 (18)로 되고,

$$\begin{aligned} \bar{x}_i^l(k+1) &= \bar{x}_i^l(k) - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \bar{x}_i^l} \\ &= \bar{x}_i^l(k) - \eta \cdot [-f + \hat{g} \cdot u - y_d^{(n)}] \cdot \left( - \frac{\partial \hat{f}}{\partial \bar{x}_i^l} \right) \\ &= \bar{x}_i^l(k) - \eta \cdot [-f + \hat{g} \cdot u - y_d^{(n)}] \cdot \\ &\quad (-1) \frac{\bar{y}^l - \hat{f}}{\sum_{l=1}^M o^l} \cdot o^l \cdot 2 \cdot \frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^{l2}} \end{aligned} \quad (18)$$

연결강도  $\sigma_i^l$ 에 대한 gradient descent법을 적

용하면 식 (19)로 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_i^f(k+1) &= \sigma_i^f(k) - \eta \cdot [-\hat{f} + \hat{g} \cdot u - y_d^{(n)}] \cdot \left( -\frac{\partial \hat{f}}{\partial \sigma_i^f} \right) \\ &= \sigma_i^f(k) - \eta \cdot [-\hat{f} + \hat{g} \cdot u - y_d^{(n)}] \cdot \\ &\quad (-1) \frac{\hat{y}^f - \hat{f}}{\sum_{l=1}^M \sigma_l^f \cdot 2 \cdot \frac{(x_i - x_i^f)^2}{\sigma_l^f}} \end{aligned} \quad (19)$$

식 (15)의 동정모델에서 함수  $g(x)$ 를 동정하기 위한  $\hat{g}$ 는 동정하지 않고 임의의 실수로 대치하고 제어를 설계하는 제어방식을 제안한다.

### 2.3 시스템모델이 불확정한 경우의 서보제어기 설계

가우시안 형태의 퍼지 소속함수, 대수적 연산에 의한 퍼지추론, 무게중심법을 이용한 비퍼지화를 수행하는 FLS에 역전과 알고리즘을 가하여 구성된 퍼지-신경회로망을 이용하여  $\hat{f}(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f)$ 를 동정하고,  $\hat{g}$ 를 임의의 양의 실수로 대치하면, 퍼지-신경회로망에 의한 시스템 동정모델은 식 (15)로 된다. 식 (15)의 동정모델을 이용하여 설계한 제어기는 식 (20)으로 된다<sup>11)</sup>.

$$u_{adapt} = \hat{\alpha}(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f) + \hat{\beta} \cdot v \quad (20)$$

여기서  $\hat{\alpha}(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f) + \hat{\beta} \cdot v$ 는 각각 식 (21), (22), (23)으로 된다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f) \\ = \frac{-\sum_{i=1}^n k_{i-1} x_i + f(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f)}{\hat{g}} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\hat{\beta} = \frac{1}{\hat{g}} \quad (22)$$

$$v = \sum_{i=0}^n k_i y_d^{(i)} \quad (23)$$

비록 제안된 제어방식에서 이용하는 시스템 동정모델의  $f(x, (x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f))$ ,  $g$ 가 각각 시스템을 구성하는  $f(x)$ ,  $g(x)$ 와 정확하게 일치하지는 않으므로, 식 (20)으로 설계된 제어방식은 식 (5)의 조건을 만족할 수 없게되어 안정성을 보장하지 못한다. 따라서 제어시스템의 안정성을 보장하기 위하여 식 (20)의 제어기에 보조제어기  $u_{stable}$ 을 병렬로 추가한 것이 식 (24)이다.

$$u(t)_{adapt} + u_{stable} \quad (24)$$

여기서,  $u_{stable}$ 은 식 (24)의 제어기가 식 (3)의 시

스템에 통합되는 폐환제어계가 Lyapunov의 안정조건을 만족하도록 설계된다. 식 (21), (22), (23)을 식 (20)에 대입하고 나서,  $y_d^{(n)}$ 에 대하여 정리하면 식 (25)로 된다.

$$\begin{aligned} y_d^{(n)} &= \hat{g} \cdot u_{adapt} - \hat{f}(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f) \\ &\quad - \left( \sum_{l=0}^{n-1} k_l y_d^{(l)} - \sum_{l=0}^n k_{l-1} x_l \right) \end{aligned} \quad (25)$$

식 (24)를 식 (3)에 대입하면  $\dot{x}_n$ 은 식 (26)으로 되고,

$$\dot{x}_n = -f(x) + g(x)u_{adapt} + g(x)u_{stable} \quad (26)$$

$\dot{x}_n$ 은  $y^{(n)}$ 과 같으므로, 식 (26)은 식 (27)로 되고,

$$y^{(n)} = -f(x) + g(x)u_{adapt} + g(x)u_{stable} \quad (27)$$

식 (25)와 식 (27)로 부터  $y^{(n)} - y_d^{(n)}$ 을 계산하고 정리하면 식 (28)로 된다.

$$\begin{aligned} e^{(n)} &= -k_n e - k_1 e^{(1)} - \dots - k_{n-1} e^{(n-1)} \\ &\quad - (f(x) - \hat{f}(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f)) \\ &\quad + (g(x) - \hat{g})u_{adapt} + g(x)u_{stable} \end{aligned} \quad (28)$$

오차벡터  $E$ 를  $E = (e \ e^{(1)} \ e^{(2)} \ \dots \ e^{(n-1)})^T = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$ 로 정의하고, 오차벡터를 이용하여 식 (28)을 상태공간모델로 나타내면 식 (29)로 된다.

$$\begin{aligned} \dot{E} &= AE + b[-(f(x) - \hat{f}(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f)) \\ &\quad + (g(x) - \hat{g})u_{adapt} + g(x)u_{stable}] \end{aligned} \quad (29)$$

여기서  $A$ 와  $b$ 는 식 (30)으로 된다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -k_0 & -k_1 & -k_2 & \dots & -k_{n-1} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (30)$$

Lyapunov 함수를 식 (31)로 정의하면,

$$V(E) = E^T P E \quad (31)$$

정정행렬  $Q$ 에 대하여 Lyapunov 방정식을 만족하는 대칭 정정행렬  $P$ 가 존재한다.

$$A^T P + P A = -Q \quad (32)$$

식 (31) Lyapunov 함수에 대한 도함수를 구하면 식 (33)으로 되고,

$$\begin{aligned} \dot{V}(E) &= \dot{E}^T P E + E^T P \dot{E} = -E^T Q E \\ &\quad + E^T P b [ -((x) - f(x, x_i^f, \sigma_i^f, y_i^f)) + (g(x) \\ &\quad - \hat{g})u_{adapt} + g(x)u_{stable} ] \leq -E^T Q E + E^T P b \\ &\quad | g(x)u_{stable} + | E^T P b | [ | (f(x, x_i^f, \sigma_i^f, \\ &\quad y_i^f) | + | g(x)u_{adapt} | + | \hat{g}u_{adapt} | ] \end{aligned} \quad (33)$$

식 (33)에서 Lyapunov 안정조건을 만족하도록  $u_{stable}$ 을 설계하기 위하여 다음의 가정을 한다.

가정 1) 시뮬레이션을 위한 가정  
 함수  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 에 대하여 식 (34), (35)의 bounded condition을 만족한다.

$$|f(\underline{x})| \leq f^u \quad (34)$$

$$g_L \leq |g(\underline{x})| \leq g^u \quad (35)$$

여기서  $f^u$ 는  $f(\underline{x})$ 의 upper bound,  $g^u$  및  $g_L$ 은  $g(\underline{x})$ 의 upper bound, lower bound이다. 시뮬레이션을 위해서는 시스템을 정확한 시스템모델을 이용하므로  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 로부터  $g_L$ ,  $g^u$  및  $f^u$ 를 계산할 수 있다.

가정 2) 실험을 위한 가정

함수  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 에 대하여 식 (34), (35)의 조건을 만족하도록 bounded condition을 만족하므로 미지의 함수  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 에 대하여  $g_L$ ,  $g^u$  및  $f^u$ 가 존재한다.

실험을 위해서는  $f(\underline{x})$ 와  $g(\underline{x})$ 가 미지의 함수이며, 이에 대한  $g_L$ ,  $g^u$  및  $f^u$ 가 설계 파라미터가 된다.

Lyapunov 함수와 가정 1), 2)의 조건을 이용하여 설계한  $u_{stable}$ 은 각각 식 (36), (37), (38)로 된다.

$$E^T P E < Z \text{인 조건에서 } u_{stable} \text{은}$$

$$u_{stable} = 0 \quad (36)$$

$$E^T P E \geq Z \text{인 조건에서 } E^T P b \geq 0 \text{이면,}$$

$$u_{stable} = -\frac{1}{g_L} [ |f^u - \hat{f}(\underline{x}, \hat{x}_i^f, \sigma_i^f, \hat{y}_i^f)| + |g^u u_{adapt}| + |\hat{g} u_{adapt}| ] \quad (37)$$

$$E^T P E \geq Z \text{인 조건에서 } E^T P b < 0 \text{이면,}$$

$$u_{stable} = \frac{1}{g_L} [ |f^u - \hat{f}(\underline{x}, \hat{x}_i^f, \sigma_i^f, \hat{y}_i^f)| + |g^u u_{adapt}| + |\hat{g} u_{adapt}| ] \quad (38)$$

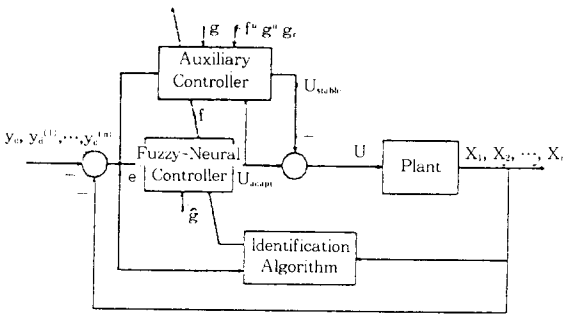


그림 3. 제안된 제어시스템의 블록선도  
 Fig. 3. Block diagram of the proposed control system

로 되며,  $Z$ 는 임의의 양의 실수이다. 식 (36), (37), (38)에서 설계한  $u_{stable}$ 을 식 (33)에 대입하면 식 (39)로 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(E) &< -E^T Q E + |E^T P b| ( |f(\underline{x}) - \hat{f}(\underline{x}, \hat{x}_i^f, \sigma_i^f, \hat{y}_i^f)| + |g(\underline{x}) u_{adapt}| + |\hat{g} u_{adapt}| ) \\ &- \frac{|E^T P b| g(\underline{x})}{g_L} [ |f^u - \hat{f}(\underline{x}, \hat{x}_i^f, \sigma_i^f, \hat{y}_i^f)| + |g^u u_{adapt}| + |\hat{g} u_{adapt}| ] \\ &\leq -E^T Q E \leq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

따라서 식 (24)로 설계된 제어기를 포함한 제어시스템은 그림 3과 같으며, 식 (3)의 시스템에 통합되어 폐환제어계는 안정하게 된다.

제안된 제어방식은 기존의 제어방식 보다 시스템 동정시에 계산량이 감소되며, 오차 다이내믹 방정식에 대한 특성방정식의 근이  $s$ -평면의 좌반평면에 위치하도록  $k_i (i=0, \dots, n)$ 을 적절히 선정함으로써 원하는 제어성능을 얻을 수 있다.

### 3. 시뮬레이션

비선형시스템에 대하여 제안한 제어방식의 유용성을 입증하기 위하여 식 (40)으로 표현되는 역진자 시스템에 대하여 IBM-PC 586상에서 C언어를 사용하여 10[ms] 스텝사이즈로 시뮬레이션 하여 기존의 신경회로망 제어방식과 특성을 비교한다.

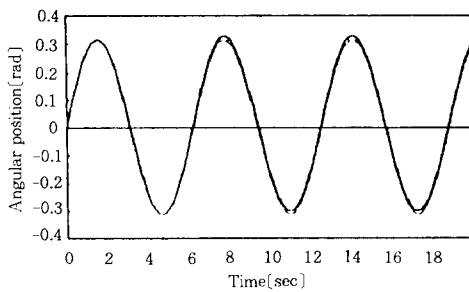
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin x_1 - m \ell x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m} \\ &\quad \ell \left( \frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right) + \frac{\cos x_1}{m_c + m} u \end{aligned} \quad (40)$$

식 (40)에서 파라미터  $m, \ell, m_c, g$ 는 각각 pole의 질량, pole의 길이, cart의 질량, 중력가속도이며,  $x_1$ 은 각변위,  $x_2$ 는 각속도,  $u$ 는 제어입력 신호로서 시스템에 가해진 힘이다.

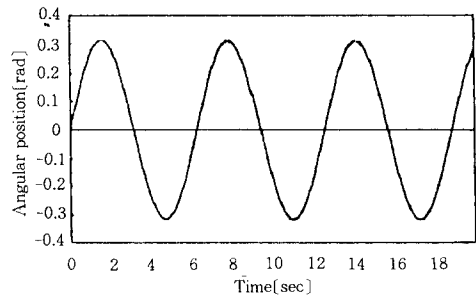
본 연구의 시뮬레이션을 위해  $m=0.1[\text{kg}], \ell=0.5[\text{m}], m_c=1[\text{kg}], g=9.8[\text{m/s}^2]$ 으로 설정하였다. 기준궤적을  $(\pi/10) \cdot \sin(t)$ 로 주고 시스템 함수  $f(x), g(x)$  동정을 각각 3층 구조의 신경회로망  $\hat{f}, \hat{g}$ 를 이용하여 동정하고, 2.1절에서 설계한 제어기 (6), (7), (8), (9)의  $f(x), g(x)$  대신에

$\hat{f}$ ,  $\hat{g}$ 를 이용하는 기존의 신경회로망 제어방식에 대한 시뮬레이션은 그림 4이다. 여기서  $f(x)$ 의 동정은 2-20-1 구조를 갖고,  $2/(1+e^{-x})-1$  형태의 시그모이드함수를 이용하고,  $[-0.01, 0.01]$ 의 랜덤값을 갖는 초기값 0.05의 학습률을 갖는 신경회로망을 이용하였으며,  $g(x)$ 의 동정은 2-10-1 구조,  $1/(1+e^{-x})$  형태의 시그모이드함수, 0.01의 상수 초기값, 0.05의 학습률을 갖는 신경회로망을 이용하였다.

그림 4의 (a)는 제어기 설계 파라미터  $k_1=8$ ,  $k_0=64$ 로, (b)는  $k_1=8$ ,  $k_0=128$ 로 설정한 경우의 추종제어특성으로 여러번의 시뮬레이션을 통하여  $k_1$ ,  $k_0$ , 신경회로망의 구조, 신경회로망의 초기값 설정, 학습률 설정을 하였으며, 다른 값을 설정하므로써 다소 다른 특성을 기대할 수 있다. 그림 5는 제안된 제어방식으로 퍼지-신경회로망의 초기값  $\hat{x}_i^0$ 을  $[-1, 1]$ 사이의 랜덤값,  $\sigma_i^0$ 은  $[-2, 2]$  사이의 랜덤값, 제어기 설계

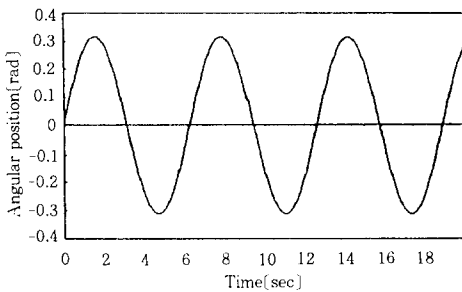


(a)  $k_1=8, k_0=64$

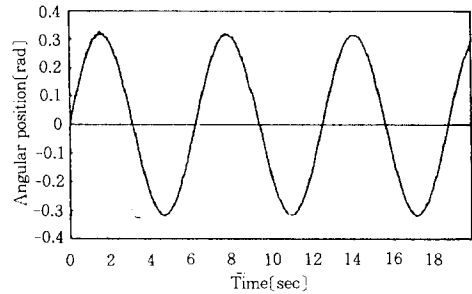


(b)  $k_1=8, k_0=128$

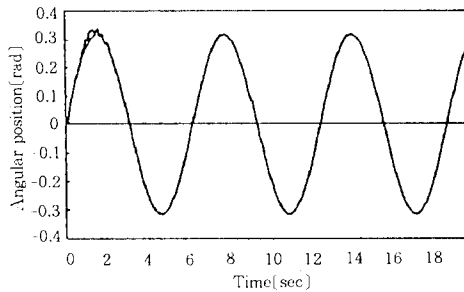
그림 4. 기존의 신경회로망 제어방식의 추종제어  
Fig. 4. Tracking control of the conventional neural network control method



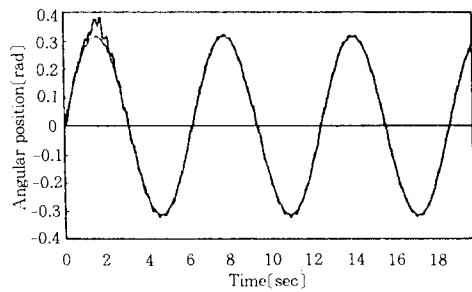
(a) tracking control of proposed method( $\hat{g}=0.1$ )



(b) tracking control of proposed method( $\hat{g}=0.5$ )



(c) tracking control of proposed method( $\hat{g}=1.0$ )



(d) tracking control of proposed method( $\hat{g}=1.5$ )

그림 5. 비선형시스템에 대한 제안된 제어방식의 추종제어  
Fig. 5. Tracking control of the proposed control method for nonlinear system

시에  $k_1=9$ ,  $k_0=6$ ,  $Z=0.01$ ,  $Q=I$ ,  $g^U=1.46$ ,  $g_l=1.12$ ,  $f^U=15.78+0.0366 \cdot x_2^2$ 로 하고, 0~20 [sec]까지 10[ms] 간격으로 한 시뮬레이션이다.

식 (40)의 시스템에서  $g(x_1, x_2)$ 의 함수가 각 변위  $x_1$ 의 cosine과 cosine 자승항을 포함하여 시간에 따라 복잡하게 변하는 시변(time-varying) 특성을 갖음에도  $g(x_1, x_2)$ 를 동정하지 않고  $\hat{g}$ 를 각각 임의의 양의 실수 0.1, 0.5, 1.0, 1.5로 설정한 그림 5의 (a), (b), (c), (d)는  $(\pi/10) \cdot \sin(t)$ 의 기준궤적에 대하여 그림 5의 기존의  $f(x_1, x_2)$ 와  $g(x_1, x_2)$ 를 모두 동정하여 제어기를 설계하는 제어방식과 유사한 좋은 추종제어특성을 나타내고 있다. 따라서 제안된 제어방식은  $g(x_1, x_2)$ 를 동정하지 않고도 좋은 제어성을 나타내므로 계산량이 감소되며, 선형시스템인 직류전동기 등의 제어에 쉽게 적용 가능하다. 수차례의 시뮬레이션의 결과로  $\hat{g}$ 를 0.1~2.0 사이의 임의의 값으로 설정하였을 때 좋은 추종제어성을 갖음을 확인하였다.

#### 4. 실험 및 검토

시뮬레이션에 의한 결과를 실험상으로 확인하기 위하여 실험장치를 제작하였다.

표 1. 직류서보전동기의 사양

Table 1. Specification of DC Servo Motor

Moment of inertia $J_m$	$32 \times 10^{-6} [\text{Kg} \cdot \text{m}^2]$
(motor plus gearbox/tacho)	$28 \times 10^{-6} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
Back-emf constant of motor $K_b$	$67 \times 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
Torque constant of motor $K_t$	$68 \times 10^{-3} [\text{Vs rad}^{-1}]$
Motor static friction torque (mainly due to brushes)	$10 \times 10^{-3} [\text{N} \cdot \text{m}]$
Motor time constant	$250 \times 10^{-3} [\text{s}]$
Motor armature resistance	5.5[Ohms]
Motor armature inductance	$7.2 \times 10^{-3} [\text{H}]$
Gear ratio	30/1 [N]

첫째, 비선형시스템의 구성은 길이 0.2[m], 질량 0.2[kg]의 pole을 표 1의 사양을 갖는 DC 서보모터에 부착하여 역진자 시스템을 제작하였다. 둘째, 역진자 시스템과 IBM-PC 586과의 인터페이스를 위해 2개의 8255를 사용하여 병렬

입·출력 포트가 최대 6개를 사용할 수 있게 하고, 하드웨어 인터럽트를 3개까지 사용 가능하게 하며 시스템 클럭을 4분주하여 사용하게 하였다. 모터 구동회로는 D/A 변환기와 PWM방식을 사용하고, 드라이버는 Dual full-bridge driver IC L298N을 사용하며, 센서로는 Rotary 엔코더를 사용하였다. 실험장치의 구성도는 그림 6과 같다.

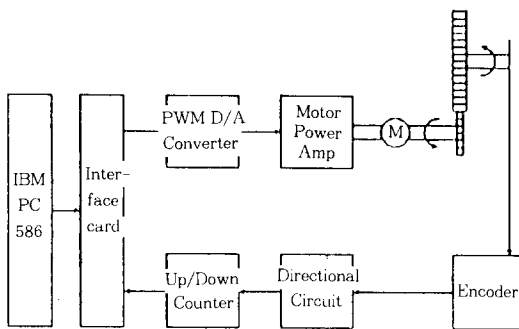


그림 6. 실험장치 블록선도

Fig. 6. Block diagram of the experiment device

그림 6의 실험장치 블록선도에 대한 실험장치 사진은 그림 7이다.

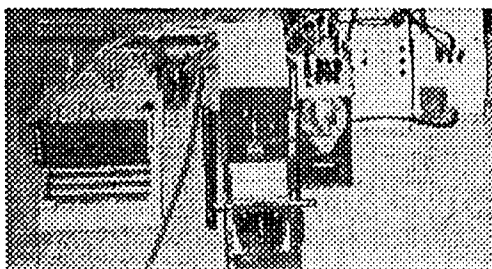


그림 7. 실험장치사진

Fig. 7. Photograph of experiment device

제작한 그림 7의 실험장치를 이용하여 실험을 하기 위해 시뮬레이션에서 사용하였던 C-언어를 그대로 이용하고, 시스템으로 사용된 Runge-Kutta 알고리즘을 역진자 시스템으로 바꾸고 실험을 하였다. 실험을 위한 하드웨어의 단순성을 기하기 위하여 각 변위  $x_1$ 만을 로타리 엔코더로 센싱하고, 각속도  $x_2$ 는 식 (41)로 계산한다.

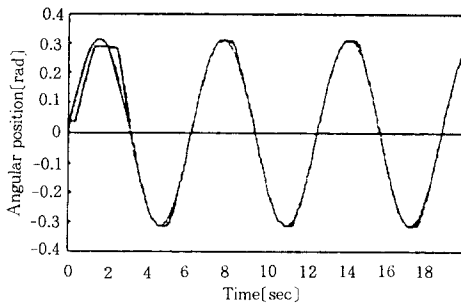
$$x_2 = \frac{x_1^{\text{present}} - x_1^{\text{past}}}{h} \quad (41)$$



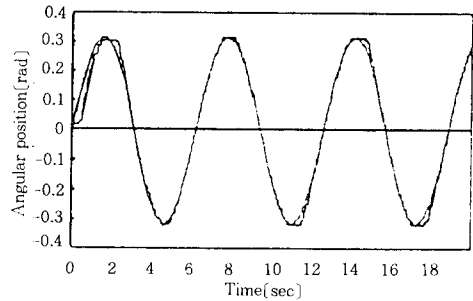
여기서  $x_1^{present}$ ,  $x_1^{past}$ 는 각각 엔코더로부터 센싱된 현재의 각변위와 바로 전에 센싱된 각변위이고,  $h$ 는 step size를 나타낸다. 센싱된  $x_1$ 과 식 (4)로 계산된  $x_2$ 를 신경망 또는 퍼지-신경망의 입력신호로 이용하여 시스템함수  $f(x_1, x_2)$ ,  $g(x_1, x_2)$ 의 동정을 한다. 그림 8은 기준레적  $\pi/10\sin(t)$ 로 준 기준의 신경회로망 동정에 의한 제어방식에 대한 추종제어특성이다. 시스템 함수  $f(x)$ 의 동정은 2-20-1 구조를 갖고,  $2/(1+e^{-x})-1$

형태의 시그모이드 함수를 이용하고,  $[-0.01, 0.01]$ 의 랜덤값을 갖는 초기값, 0.0006의 학습률을 갖는 신경회로망을 이용하였으며,  $g(x)$ 의 동정은 2-10-1 구조,  $1/(1+e^{-x})$  형태의 시그모이드함수, 0.01의 상수 초기값, 0.0001의 학습률을 갖는 신경회로망을 이용하였다.

그림 8의 (a)는 제어기설계 파라미터  $k_1=8$ ,  $k_0=16$ 로, (b)는  $k_1=8$ ,  $k_0=32$ 로 설정한 경우의 추종제어특성으로 여러번의 실험을 통하여  $k_1, k_0$

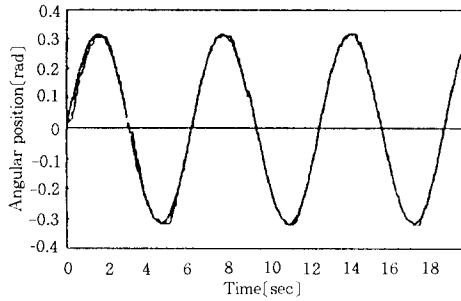


(a)  $k_1=8, k_0=16$

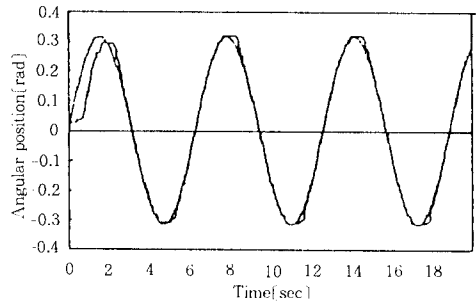


(b)  $k_1=8, k_0=32$

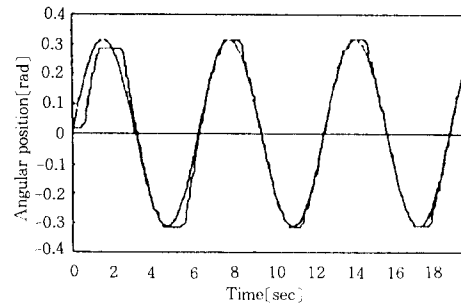
그림 8. 기존의 신경회로망 제어방식의 추종제어  
Fig. 8. Tracking control of the conventional neural network control method



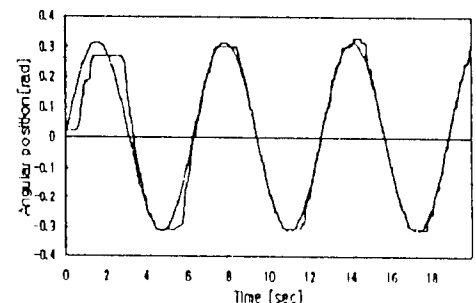
(a) tracking control of proposed method( $g=1$ )



(b) tracking control of proposed method( $g=2$ )



(c) tracking control of proposed method( $g=4$ )



(d) tracking control of proposed method( $g=6$ )

그림 9. 비선형시스템에 대한 제안된 제어방식의 추종제어  
Fig. 9. Tracking control of the proposed control method for nonlinear system

를 설정하였으며, 다른 값을 설정하므로써 다소 다른 특성을 기대할 수 있다. 기준계적  $\pi/10\sin(t)$ 에 대하여 제어기설계 파라미터를  $k_1=8$ ,  $k_0=16$ ,  $Z=0.01$ ,  $Q=I$ ,  $g^u=0.0035$ ,  $g_L=0.0025$ ,  $f^u=390$ 로 설정한 제안한 제어방식에 대한 실험결과를 그림 9이다.

제안된 제어방식을 역진자시스템에 적용하여 실험한 그림 9의 추종제어 성능은  $\hat{g}$ 를 1, 2, 4, 6으로 설정한 결과, 기존의  $f(x_1, x_2)$ 와  $g(x_1, x_2)$ 를 모두 동정하여 제어기를 설계한 그림 8과 유사한 좋은 추종제어특성을 나타내고 있다. 특히  $\hat{g}$ 를 1 가까이 설정하였을 때 좋은 제어성능을 나타내고 있다.

이와 같이 제안된 제어방식은 시스템 함수  $f(\cdot)$ 만을 동정하므로써 적은 계산량으로 구현 가능하고 적절한  $\hat{g}$ 의 선정으로 좋은 제어성능을 가짐을 확인하였다. 그러나 여러번의 실험 결과로는  $\hat{g}$ 를 0.5 보다 작거나 또는 8이상의 값으로 설정하였을 때에는 제어성능이 떨어지는 현상을 알 수 있었다. 여러번의 시뮬레이션 및 실험결과로  $\hat{g}$ 의 설정은 임의의 양의 실수로 선정이 가능하였다. 또한 좋은 제어성능을 갖도록 설정된  $\hat{g}$ 의 값 부근에서도 좋은 제어성능을 가짐을 확인하였다. 따라서 제안된 제어방식에서의  $\hat{g}$ 는 설계자에 의해 설정되는 설계파라미터가 된다.

## 5. 결 론

신경회로망이나 퍼지-신경회로망을 이용하여 미지의 시스템을 동정하고 동정된 정보를 이용하여 제어기를 설계하는 기존의 제어방식은 현재까지 시스템 함수  $f(\cdot)$ 와  $g(\cdot)$ 를 모두 동정하여 제어기를 설계하는 제어방식으로 많은 계산량을 필요로 하였다.

본 논문에서는 제어기 설계시에 적은 계산량으로 좋은 제어성능을 가질수 있도록 시스템 함수  $f(\cdot)$ 만을 동정하여 제어기를 설계하는 간단한 제어방식을 제안하였다. 제안된 제어방식은 시스템 함수  $f(\cdot)$ 만을 퍼지-신경회로망을 이용하여 동정하고,  $g(\cdot)$ 는 동정하지 않고 임의의 실수로 설정하여 동정모델을 구성하여 동정하고 제

어기를 설계함으로써 시스템 동정시의 계산량을 감소시킬 수 있었으며,  $\hat{g}$ 의 설정은 양의 실수로써 임의로 설정될 수 있고, 좋은 제어성능을 갖도록 설정된 값 부근에서도 일관적으로 좋은 제어성능을 갖음을 확인하였다.

제안한 제어방식의 유용성을 확인하기 위하여 자동화설비에 액추에이터로 많이 사용되는 직류 서보전동기를 이용한 역진자 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 하였고, 제안된 제어방식을 기존의 신경회로망 제어방식과 제어성능을 비교 검토한 결과 적은량의 학습으로도 기존의 지능제어방식과 유사한 제어성능을 확인할 수 있었다. 이와 같이 제안된 제어방식은 적은량의 계산으로 미지의 시스템에 좋은 제어성능을 나타내므로 마이크로프로세서 등으로 구현하여 시스템 모델링이 어려운 전기 기계 자동화 설비등의 자동화에 쉽게 적용 가능할 것으로 사료된다.

본 논문은 유한전문대학 학술 연구비에 의하여 연구되었습니다. 연구비를 지원해 준 유한전문대학에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 홍순석, 전자응용 및 산업전자공학, 도서출판생능, 1992.
- 2) T. Fukuda and T. Shibata, "Theory and Application of Neural Networks for Industrial Control Systems", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol.39, No.6, Dec. 1992.
- 3) L. Jin, P.N.Nikiforuk and M.M.Gupta, "Direct adaptive output tracking control using multilayered neural networks", IEEE Proceedings-D, Vol. 140, No. 6, pp.393~398, Nov., 1993.
- 4) F. C. Chen, "Back-propagation Neural Network for Nonlinear Self-tuning Adaptive Control", IEEE International Symposium on Intelligent Control 1989, pp.274~279, 1989.
- 5) K.S.Narendra, K.Parthasarathy, "Identification and Control of Dynamical Systems using Neural Networks", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol.1, No.1, pp.4~27, March, 1990.
- 6) R. Johnston, "FUZZY LOGIC CONTROL", GEC JOURNAL OF RESEARCH, Vol. 11, No.2, pp. 99~109, 1994.
- 7) Mamdani,E.H, "Applicaton of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant," IEEE Proc. Control &

Science, Vol.121, No.12, pp.1585~1588, Dec., 1974.  
8) Yong-Gu Lee, Dong-Seol Son and Ki-Hwan Eom, "Hybrid Fuzzy Control Method for Motion Control", 1st International Workshop on Advanced Macronics, pp.92~95, 1995.12.1.  
9) Y.M.Chen, K.F.Gili, "Fuzzy-Neuro Control of Robotic Manipulators", The Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision, pp.1729~1733, 1994.

10) Li-Xin Wang. ADAPTIVE FUZZY SYSSEMS AND CONTROL : DESIGN AND STABILITY ANALYSIS, Prentice-Hall International, Inc., 1994.  
11) A. Isidori, Nonlinear Control Systems, Springer~Verlag, 1989.

◇ 著 者 紹 介 ◇



손 동 설(孫東高)

1952년 8월 18일생. 1978년 동국대 전자공학과 졸업. 1994년 동국대 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1989년 3월~현재 유한전문대학 전자과 부교수.



엄 기 환(嚴基煥)

1949년 10월 8일생. 1972년 동국대 전자공학과 졸업. 1985년 2월 동국대 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1994년~현재 동국대 전자공학과 부교수.



이 용 구(李鎔求)

1963년 7월 28일생. 1987년 동국대 전기공학과 졸업. 1993년 동국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 동국대 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1994년~현재 유한전문대, 서울산업대, 동국대 시간강사.