

지연시간을 갖는 비선형 시스템을 위한 퍼지-신경망 기반 예측제어기 설계

Design of Neuro-Fuzzy-based Predictive Controller for Nonlinear Systems with Time Delay

김성호 · 김주환 · 이영삼

Sung-Ho Kim, Joo-Whan Kim and Young-Sam Lee

군산대학교 전자정보공학부

School of Electronics and Information Eng. , Kunsan National University

요 약

본 논문에서는 지연시간을 갖는 비선형 시스템의 효율적 제어를 위해 퍼지-신경망에 기반한 지연시간 보상기를 제안하였다. 제안된 제어시스템은 ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)라고 불리는 두개의 퍼지-신경망으로 구성되며 이중 하나는 직-병렬 방식으로 동작하고 다른 하나는 병렬 방식으로 동작한다. 직-병렬 방식으로 동작하는 퍼지-신경망은 지연시간을 갖는 비선형 시스템의 응답을 추종하는 특성을 갖으며 병렬 방식으로 동작하는 퍼지-신경망은 지연시간을 보상하기 위한 시스템 출력을 예측하는 기능을 수행한다. 따라서 본 연구에서 제안된 시스템은 전형적인 Smith 예측기의 비선형 시스템에의 적용을 위한 확장이라고 생각할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 지연시간 보상기의 상세한 설계과정을 보였으며 또한 제안된 제어기 설계 기법의 유용성 확인을 위해 비선형 수치시스템에 대한 컴퓨터 모의실험을 수행하였다.

Abstract

In this paper a design of neuro-fuzzy-based predictive controller for nonlinear systems with time-delay is proposed. The proposed control system contains two neuro-fuzzy systems called ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). One is run as a series-parallel mode and the other is run as a parallel mode. An ANFIS running in series-parallel mode emulates the response of the nonlinear system with time-delay. Another ANFIS running in parallel mode generates the predicted output of the nonlinear system to compensate for the time-delays. Therefore, the proposed control system can be thought of as an extension of Smith-predictor scheme to the nonlinear systems with time-delay. A detailed design procedure is presented and finally computer simulations are executed for the effectiveness of the proposed control scheme.

Key words : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System(ANFIS), predictive control, nonlinear system, time-delay

1. 서 론

복잡한 산업용 프로세스의 제어를 위해 아직까지도 PID 제어기법이 널리 사용되고 있다. 이는 PID 제어기의 구조적 단순성뿐만 아니라 외란처리 능력 및 실제 제어 대상 프로세스와 제어기 이득 설정시 사용되는 모델간의 불일치에 대한 강인성에 기인한다. 그러나 실제 산업용 프로세스는 비선형 특성뿐만 아니라 상당한 크기의 지연시간을 포함하고 있으며 따라서 선형 이론에 바탕을 둔 PID 제어기법으로는 고도의 제어성능을 달성하기 힘들다. 특히 제어대상 프로세스가 시정수보다 큰 지연시간을 갖고 있는 경우 원하는 제어 성능을 달성케 하는 제

어기 이득의 선정에는 많은 어려움이 따른다[1-2]. 일반적으로 지연시간을 갖는 시스템의 효율적 제어를 위해서는 지연시간 보상기의 도입이 요구되며 비록 많은 개선점을 갖고 있지만 60년대 초반에 제안된 Smith 예측기가 아직까지도 널리 사용되고 있다[3]. 그러나 Smith 예측기는 요구되는 제어성능을 달성하기 위해서 폐환제어계내에 제어대상에 대한 정확한 수학적 모델을 필요로 하며 따라서 정확한 수학적 모델을 얻기 힘든 비선형이 강한 계통에 이의 직접적인 적용은 어렵게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구자들은 비선형 시스템의 모델링에 효과적으로 도입되고 있는 신경망을 이용한 수정된 Smith 예측기를 제안하고 이의 유용성을 입증해나와 있다[4].

최근 Jang 등에 의해 제안된 퍼지-신경망(ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)은 학습능력을 갖는 신경망과 추론기능을 갖는 퍼지이론을 융합한 것으로 비선형 시스템의 모델링에 효과적으로 도입되고 있다[5]. 이러한 퍼지-신경망은 결론부에 입력변수들의 선형

접수일자 : 2002년 2월 20일

완료일자 : 2002년 4월 8일

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 군산대학교 새만금환경연구센터의 지원에 의한 것입니다.

결합으로 이루어진 구간별 선형화 모델을 갖고 있으며 다양한 학습기법에 의해 입력의 소속 함수와 결론부의 선형 파라미터들을 효율적으로 동정할 수 있다는 특징을 갖는다. 또한 학습완료된 퍼지-신경망은 비선형 시스템의 정적 및 동적 동작을 큰 오차 없이 표현할 수 있기 때문에 범용 근사기로 널리 사용되고 있다. 특히 퍼지-신경망은 기존의 신경망과는 달리 내부에 비선형 시스템에 대한 구간별 선형화 모델을 갖게 되므로 비선형 시스템을 위한 제어기를 설계할 경우, 기존에 잘 정리된 선형제어이론을 적용할 수 있게 함으로 이를 비선형 시스템의 제어에 이용하고자 하는 많은 연구들이 진행되고 있다[6-7].

본 연구에서는 지연시간을 갖는 선형시스템에만 적용이 가능한 Smith 예측기법의 적용상의 한계를 극복하기 위해 비선형 계통의 모델링에 효과적으로 사용되고 있는 퍼지-신경망을 Smith 예측기에 도입한 새로운 형태의 비선형 시스템의 제어를 위한 지연시간 보상기를 제안하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 Smith 예측기의 구조에 대해 설명하고, 제3장에서는 퍼지-신경망의 기본구조에 대해서 고찰한 후, 제4장에서는 본 연구에서 제안된 퍼지-신경망 기반 지연시간보상기의 설계에 대해 고찰하며 제5장에서는 제안된 제어기법의 비선형 수치 시스템에 적용, 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하며 제6장에서는 결론을 기술하고자 한다.

2. Smith 예측기의 구조

지연시간 보상기로 가장 널리 사용되는 Smith 예측기의 구조를 나타내면 그림 1과 같다. Smith 예측기는 폐환 루프내에 제어하고자 하는 시스템에 대한 수학적 모델을 포함하며 이로부터 시스템에 대한 출력 및 출력에 대한 예측값을 폐환에 사용하게 된다. 이로 인해 전향경로에 존재하는 제어기를 설계할 경우, 전체 시스템에 대한 폐루프 특성방정식에 존재하게 되는 지연시간을 효과적으로 제거할 수 있게 된다는 특성을 갖는다[3]. 그림 1에서 기준입력과 부하외란에 대한 전달함수를 구하면 다음과 같다.

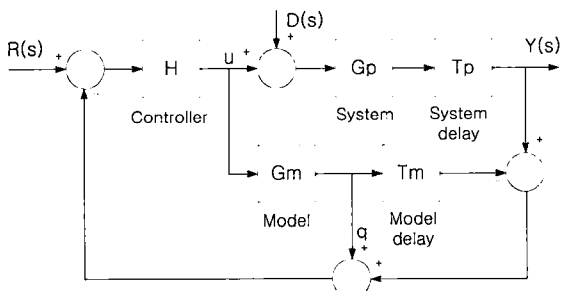


그림 1. Smith predictor의 구조
Fig. 1. Structure of Smith predictor

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G_1(s) = \frac{G_p T_p H}{1 + G_m H - G_m T_m H + G_p T_p H} \quad (1)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = G_2(s) = \frac{G_p T_p (1 + G_m H - G_m T_m H)}{1 + G_m H - G_m T_m H + G_p T_p H} \quad (2)$$

여기서 $R(s)$ 는 기준입력이고, $D(s)$ 는 부하외란이며, $Y(s)$ 는 시스템의 출력이다. 그리고 G_p 는 제어하고자 하는 시스템이고, G_m 은 제어대상 시스템에 대한 수학적 모델이다. 또한 T_p 는 시스템의 시간 지연 요소를 나타내며, T_m 는 모델의 시간 지연 요소이다. 그리고 H 는 전향경로에 존재하는 제어기를 의미한다.

Smith 예측기를 갖는 제어기의 해석은 폐환루프에 존재하는 시스템에 대한 수학적 모델이 실제 제어대상을 오차없이 정확히 표현했다는 가정하에 수행되며 이러한 경우 다음의 관계가 만족되며

$$G_m T_m = G_p T_p \quad (3)$$

식 (1)과 식(2)는 각각 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$G_1(s) = \frac{G_p H}{1 + G_m H} T_p \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{[1 + G_m H(1 - T_m)] G_p T_p}{1 + G_m H} \quad (5)$$

여기서 식(1)과 식(4)를 비교해보면 시간 지연의 영향을 특성방정식에서 효과적으로 제거 할 수 있음을 알 수 있다. 결국 Smith 예측기는 시간 지연을 갖는 시스템을 시간 지연이 없는 시스템처럼 전향경로의 제어기 H 를 설계할 수 있도록 한다는 특성을 갖는다. 그러나 상기의 제어기 설계는 지연시간을 갖는 선형시스템에만 적용하며 지연시간을 갖는 비선형 시스템에의 직접적인 적용이 불가능하게 된다.

3. 퍼지-신경망의 구조 및 특성

퍼지-신경망은 퍼지 시스템의 언어적이고 논리적인 추론 능력과 신경망의 학습 능력을 결합하여 서로의 단점을 보완한 것으로 최근 비선형 계통의 모델링 및 제어에 적극적으로 도입되고 있다. 이와 관련된 많은 연구 중 Jang은 퍼지 추론을 수행하는 퍼지-신경망의 결론부를 입력에 대한 선형 방정식으로 대체한 새로운 형태의 퍼지-신경망을 제안한 바 있으며 이를 나타내면 그림 2와 같다.

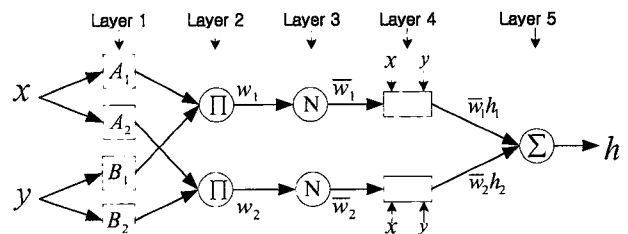


그림 2. 퍼지-신경망의 구조
Fig. 2. Structure of ANFIS

그림 2의 퍼지-신경망을 언어적 규칙으로 표현하면 다음과 같다.

Rule 1: If x is A_1 and y is B_1 , then $h_1 = a_1x + b_1y + c_1$

Rule 2: If x is A_2 and y is B_2 , then $h_2 = a_2x + b_2y + c_2$

여기서 x, y : 입력, A_i, B_i : 각 입력에 대한 소속 함수, h_i : 각 규칙에서의 출력, (a_i, b_i, c_i) : 각 규칙에서의 입력에 대한 선형 파라미터를 의미한다.

그림 2의 layer 1, 4는 동정될 파라미터를 갖고 있으며 layer 2, 3, 5는 단지 규정된 연산만을 수행한다. layer 1의 소속 함수에 대한 파라미터는 출력 오차신호의 backward pass시 gradient-descent법에 의해 조정되며 layer 4의 후건부 선형화 파라미터는 신호의 forward pass시 least-square estimator에 의해 조정된다. 퍼지-신경망의 추론 메커니즘을 나타내면 그림 3과 같다.

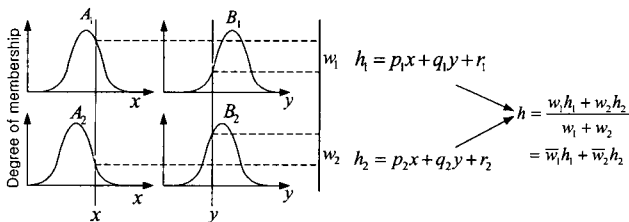


그림 3. 퍼지-신경망의 추론 메커니즘

Fig. 3. Inference mechanism of neuro-fuzzy system

그림으로부터 퍼지-신경망의 최종 출력은 다음과 같이 후건부 파라미터의 선형 조합으로 표현됨을 알 수 있다.

$$h = \frac{w_1}{w_1 + w_2} h_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} h_2$$

$$= \frac{w_1}{w_1 + w_2} (a_1x + b_1y + c_1) + \frac{w_2}{w_1 + w_2} (a_2x + b_2y + c_2)$$

$$= (\frac{w_1}{w_1 + w_2} a_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} a_2)x + (\frac{w_1}{w_1 + w_2} b_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} b_2)y + (\frac{w_1}{w_1 + w_2} c_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} c_2)$$

위 식의 마지막 부분에서 신경망의 입력에 관계된 하중화 파라미터를 얻을 수 있으며 이는 식 (7)와 같이 표현된다.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i a_i}{\sum_{i=1}^2 w_i}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i b_i}{\sum_{i=1}^2 w_i}, \quad c = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i c_i}{\sum_{i=1}^2 w_i}$$

4. 퍼지-신경망 기반 지연시간 보상기

본 연구에서는 다음과 같이 지연시간을 갖는 단일 입력 출력 이산치 비선형 시스템의 제어에 대해 고찰하고자 한다.

$$y(k) = f(y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-d-m))$$

여기서 $y(k), u(k)$ 는 비선형 시스템의 출력과 입력을 나타내며 $f(\cdot)$ 는 미지의 비선형 함수를 나타낸다. 또한 양의 n, m 은 각각 출력 및 입력의 차수를 d 는 지연시간을 의미한다.

본 절에서는 전절에서 설명한 Smith 예측기 제어기법이 선형시스템에만 적용이 가능하다는 적용상의 한계를

극복하기 위해 비선형 시스템의 모델링에 효과적으로 사용되고 있는 퍼지-신경망을 사용하여 식(8)과 같이 표현되는 지연시간을 갖는 비선형 시스템에 적용될 수 있는 새로운 형태의 지연시간 보상기를 제안하고자 한다. 제안된 제어기의 구조를 나타내면 그림 4와 같다.

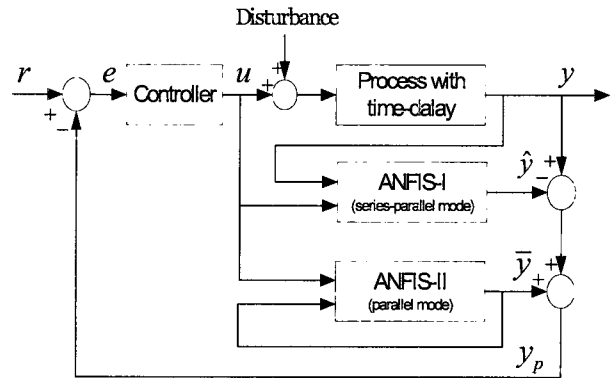


그림 4. ANFIS 기반 지연시간보상기의 구조

Fig. 4. Structure of time-delay compensator based on ANFIS

그림 4로부터 알 수 있듯이 지연시간을 갖는 비선형 시스템의 제어를 위해 제어대상 비선형 시스템의 입/출력 데이터 및 이의 지연된 신호들에 의해 학습완료된 2개의 퍼지-신경망(ANFIS-I, ANFIS-II)이 사용된다. 이 중 ANFIS-I은 전형적인 Smith 예측기에서 수학적 모델이 하는 역할을 수행하며 ANFIS-II는 지연시간이 배제된 즉, 제어대상 시스템의 미래 출력값을 예측하는 예측기로 사용된다. 따라서 전체 구성은 전형적인 Smith 예측기를 갖는 제어기와 같게 된다.

자기 회귀를 갖는 이산치 동적 시스템에 대한 퍼지-신경망의 구동 방법에는 크게 병렬 모드와 직-병렬 모드가 있다. 그림에서 ANFIS-I은 시스템의 입력과 출력 및 이의 지연요소들을 입력으로 하는 직-병렬 모드로 구동되며 이는 실제 제어대상 시스템의 출력을 정확히 추종하는 특성을 갖는다. 또한 ANFIS-II는 시스템의 입력 및 퍼지-신경망의 추정 출력 \hat{y} 및 이의 지연된 신호들을 입력으로 하는 병렬 모드로 구동된다. 상기 두 모드의 특징으로는 먼저 직-병렬 모드는 학습시에 학습 수렴 특성이 빠르고 모델링 후의 보간 특성이 좋기 때문에 학습 데이터 외에 프로세스 상태에 대해서도 추종할 수 있는 기능을 갖는다. 이에 반해 병렬 모드는 학습시에 수렴 특성이 직-병렬 모드에 비해 다소 느리며 학습 데이터 외의 데이터에 대해서는 보간 특성이 떨어지는 단점을 가지고 있으나 프로세서의 예측된 출력, 즉 자신의 출력을 입력으로 사용하기 때문에 프로세서의 지연시간과 무관하게 예측된 출력을 추정하는 것이 가능하게 된다.

4.1 퍼지-신경망에 의한 Smith 예측기 구현

그림 4와 같은 퍼지-신경망 기반 지연시간보상기를 설계하기 위해서는 우선 식(8)로 표현되는 제어대상 시스템으로부터 입출력 및 이의 지연된 값을 사용하여 퍼지-신경망을 학습시킨다. 학습에 사용되는 입출력 패턴은 다음과 같다.

$$I_t = [y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-d-m)] \quad (9)$$

$$O_t = y(t) \quad (10)$$

상기의 입출력 패턴에 의해 학습완료된 퍼지-신경망은 두 가지 용도로 사용된다. 이 중 첫째는 지연시간을 갖는 비선형 시스템의 출력을 모사하는 것으로 그림 4의 ANFIS-I에 해당하며 효과적인 추종을 위해 제어대상 시스템으로부터의 입력 및 출력을 사용하는 직-병렬 모드로 구성된다. 즉, ANFIS-I의 입력은 학습시 사용한 입력 패턴이 되며 ANFIS-I은 이러한 입력에 대해 제어대상 시스템과 같은 출력 \hat{y} 을 발생시킨다. 반면 ANFIS-II는 시스템에 인가되는 입력을 기반으로 제어대상 시스템의 출력값을 예측하는 예측기로 사용되며 이를 위해서 다음과 같은 입력 패턴이 사용된다.

$$I_{II} = [\bar{y}(t-1), \dots, \bar{y}(t-n), u(t), \dots, u(t-m)] \quad (11)$$

여기서 $\bar{y}(t)$ 는 ANFIS-II 자신의 출력이며 이러한 입력이 인가된다면 다음과 같은 예측값을 얻게 된다.

$$O_{II} = \bar{y}(t) \quad (12)$$

그림 4의 폐환 신호 y_p 는 다음과 같으며

$$y_p(t) = y(t) - \hat{y}(t) + \bar{y}(t) \quad (13)$$

만일 ANFIS-I이 제어대상 시스템을 정확하게 모사한다고 가정하면 식 (13)은 다음과 같이 표현된다.

$$y_p = \bar{y}(t) \quad (14)$$

식 (14)는 전형적인 Smith 예측기의 경우와 같으며 따라서 전향경로의 제어기는 퍼지-신경망 후전부의 선형화 모델을 이용한다면 체계적으로 설계될 수 있다.

4.2 퍼지-신경망으로부터 공칭 모델의 추출

식 (8)로 표현되는 미지의 비선형 시스템은 전건부 입력변수의 수와 각각의 변수에 할당된 소속함수의 곱 (l 개)만큼의 구간별 선형화 모델을 갖는 퍼지-신경망에 의해 효과적으로 모델링 될 수 있다. l 개의 선형화모델 중 i 번째의 시스템 표현 규칙을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M^i: & \text{ If } y(k-1) \text{ is } F_{11}^i \dots u(k-d) \text{ is } F_{21}^i \dots u(k-d-m) \text{ is } F_{2m}^i \\ & \text{ Then } y(k)^i = a_0^i + a_1^i y(k-1) + \dots + a_n^i y(k-n) + b_1^i u(k-d) \\ & \quad + \dots + b_m^i u(k-d-m) \quad (i=1, 2, \dots, l) \end{aligned} \quad (15)$$

만일 후전부의 차분방정식으로 표현된 시스템을 z -변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M^i: & \text{ If } y(k-1) \text{ is } F_{11}^i \dots u(k-d) \text{ is } F_{21}^i \dots u(k-d-m) \text{ is } F_{2m}^i \\ & \text{ Then } \frac{Y(z)^i}{U(z)^i} = \frac{b_1^i z^{-1} + \dots + b_m^i z^{-m}}{1 - a_1^i z^{-1} - \dots - a_n^i z^{-n}} \cdot z^{-d} + D(z)^i \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $D(z)^i$ 은 식 (8)의 비선형 시스템을 i 번째 선형화 모델로 표현하였을 경우 발생하게 되는 모델링 편차를 의미한다. 이에선 전달함수 표현시 고려하지 못한 선형화 모델 파라미터중 직류 바이어스항 a_0 등이 포함된다.

따라서 식 (8)로 표현되는 비선형 시스템은 퍼지-신경망에 의해 식 (16)과 같이 표현되는 l -개의 선형모델로 근사화될 수 있다. 또한 l -개의 선형모델은 식(7)로 표현되는 하중화 방법에 의해 다음과 같이 섭동 파라미터를 갖는 하나의 선형 모델로 근사화하는 것이 가능하게 된다.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 - a_1 z^{-1} - \dots - a_n z^{-n}} \cdot z^{-d} \quad (17)$$

여기서 전달함수의 계수는 각각 다음과 같다.

$$a_p = \frac{\sum_{i=1}^l w_i \cdot a_p^i}{\sum_{i=1}^l w_i} \quad (p=1 \dots n) \quad (18)$$

$$b_q = \frac{\sum_{i=1}^l w_i \cdot b_q^i}{\sum_{i=1}^l w_i} \quad (q=1, \dots, m) \quad (19)$$

여기서 w_i 는 i -번째 선형 모델의 적합도를 의미한다.

식(17)은 전형적인 Smith 예측기의 수학적 모델 대신에 사용될 수 있으며 따라서 전향경로에 존재하는 제어기는 이를 기반으로 체계적으로 설계하는 것이 가능하게 된다.

4.3 전향경로 제어기 설계

식(17)을 이용한다면 전체 폐루프 제어시스템의 안정도 및 제어 성능을 보장할 수 있는 지연시간 보상기는 다양한 방법에 의해 설계가 가능하다.

본 연구에서는 외란처리 능력 및 강인성으로 범용적으로 사용되고 있는 PI 제어기를 사용하였으며 이에 대한 제어기는 다음과 같다.

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{k_p(1-z^{-1}) + \frac{k_I T}{2}(1+z^{-1})}{1-z^{-1}} \quad (20)$$

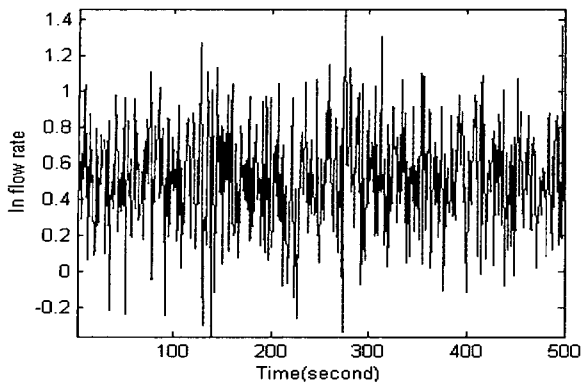
5. 적용 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 제어기의 유용성 확인을 위해 다음과 같이 지연시간을 갖는 비선형 수치시스템에 적용하고자 한다.

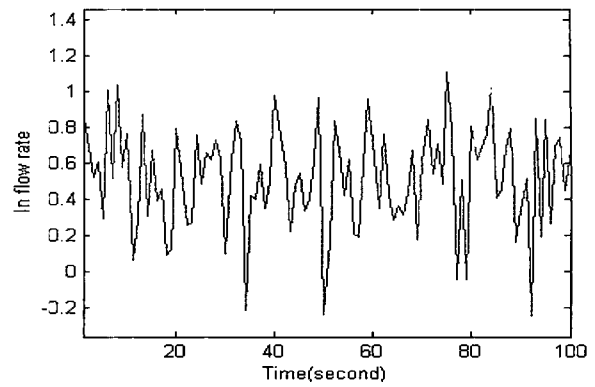
$$y(t) = \frac{y(t-1)y(t-2)y(t-3)u(t-d)[y(t-3)-1] + u(t-d-1)}{1 + y^2(t-1) + y^2(t-2)} \quad (21)$$

여기에서 $d=20$ 이다.

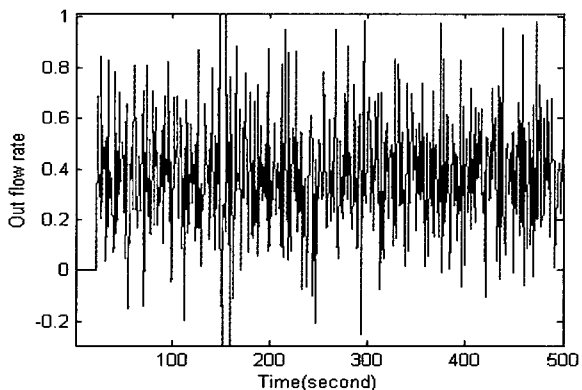
일반적으로 비선형 시스템의 효율적인 학습을 위해서는 시스템의 가능한 모든 상태를 여기할 수 있는 다양한 주파수 성분을 갖는 신호를 입력으로 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 그림 5(a)과 같이 평균이 0.5이고 분산이 0.09인 가우시언 분포를 갖는 랜덤 신호를 계통의 입력으로 사용하였으며 이때의 응답특성을 나타내면 그림 5(b)와 같다. 퍼지-신경망의 학습을 위해 5개의 입력 ($u(k-20)$, $u(k-21)$, $y(t-1)$, $y(t-2)$, $y(t-3)$)을 사용하였고 각 입력당 2개의 소속함수를 할당하였다.



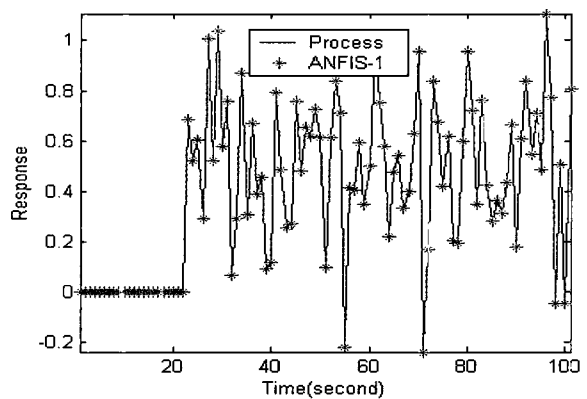
(a) 퍼지 신경망의 입력 데이터



(a) 입력 데이터



(b) 퍼지-신경망의 출력 데이터



(b) ANFIS-I의 응답특성

그림 5. 퍼지-신경망의 학습을 위한 입·출력 데이터
Fig. 5 I/O training data for ANFIS learning

상기의 데이터를 사용하여 퍼지-신경망을 학습하였으며 이때의 학습편차는 그림 6과 같다.

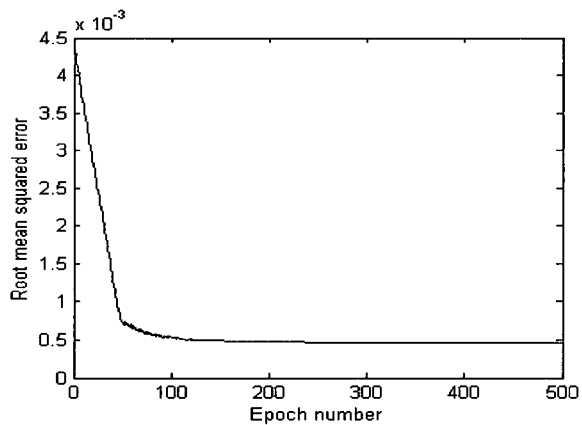
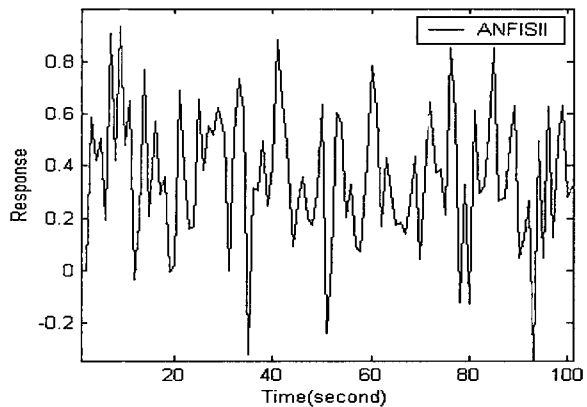


그림 6. ANFIS 학습시의 학습편차
Fig. 6. RMS error for ANFIS learning

또한 학습 완료된 퍼지-신경망의 모델링 특성을 확인하기 위해 학습시와는 다른 평균이 0.4이고 분산이 0.09인 그림 7(a)와 같은 입력을 인가하였으며 이때의 응답특성은 그림 7(b), (c)와 같다.



(c) ANFIS-II의 응답특성

그림 7. 학습된 퍼지-신경망의 모델링 특성

Fig. 7. Modeling characteristic for trained ANFIS

그림 7(b)에서 실선은 제어대상 비선형 시스템의 출력이며 +는 ANFIS-I의 출력을 나타낸다. 또한 그림 7(c)는 예측기로 사용되는 ANFIS-II의 출력을 나타낸 것으로 제어대상 시스템의 출력을 효율적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그림 7로부터 학습완료된 퍼지-신경망의 입력을 달리함으로써 예측기로 사용이 가능하게 된다.

제안된 수치시스템에 대한 시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 수행되었으며 시뮬레이션을 위한 시뮬링크 블록

도를 나타내면 그림 8과 같다

시뮬레이션을 위해서는 그림 4의 전향경로에 존재하는 제어기의 설계가 요구되며 본 논문에서는 식(20)으로 표현되는 PID 제어기법을 사용하였다. 식(21)로 표현되는 수치시스템에 대한 하중화된 전달함수는 식(22)와 같다.

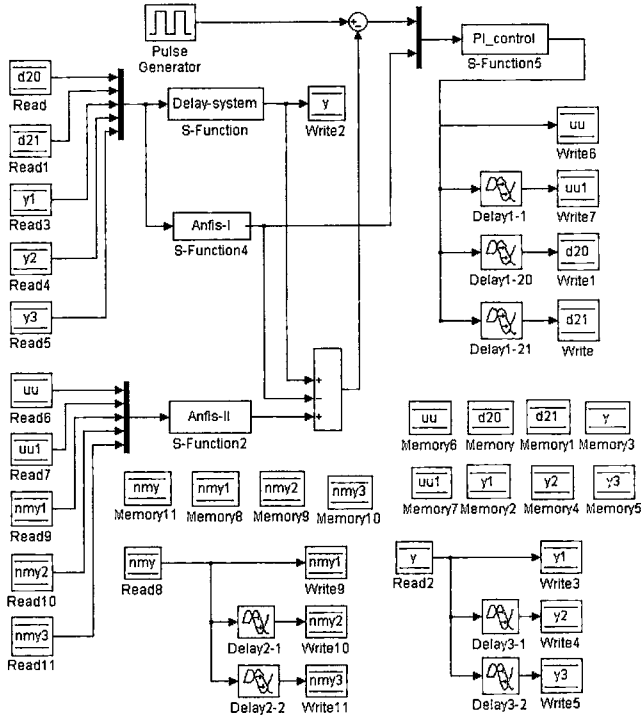


그림 8. 시뮬레이션을 위한 Simulink block diagram
Fig. 8. Simulink block diagram for simulation

$$G_m = \frac{Y_m(z)}{U_m(z)} = \frac{b_1 + b_2 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - a_3 z^{-3}} \quad (22)$$

동작범위에 따른 파라미터의 섭동은 다음과 같다.

$$a_1 \in (0.0593, 0.1462) \quad (23)$$

$$a_2 \in (-0.0221, 0.1668) \quad (24)$$

$$a_3 \in (-0.0806, 0.0462) \quad (25)$$

$$b_1 \in (-0.0337, -0.0003) \quad (26)$$

$$b_2 \in (0.6630, 1.1544) \quad (27)$$

제어기의 매개변수인 비례상수 K_p , 적분상수 K_I 를 각각 $K_p = 0.2$ 와 $K_I = 0.2$ 로 하였다. 이를 기반으로 설계되는 전향경로 제어기는 다음과 같다.

$$C(z) = \frac{Y_c(z)}{U_c(z)} = \frac{0.2(1-z^{-1}) + 0.1T(1+z^{-1})}{1-z^{-1}} \quad (28)$$

제안된 퍼지-신경망 기반 지연시간 보상기의 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 그림 9는 제어대상 비선형 시스템의 지연시간과 ANFIS-I의 지연시

간이 같을 경우의 응답을 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이 지연시간이 일치할 경우의 응답 특성은 매우 양호함을 알 수 있다. 이는 퍼지-신경망의 후건부 선형모델로부터 구해지는 하중화된 선형모델이 식(21)로 표현되는 지연시간을 갖는 비선형 시스템을 효율적으로 표현할 수 있음에 기인한다. 그러나 일반적으로 Smith 예측기의 제어성능 평가는 제어대상 시스템과 사용된 모델간의 불일치 특히, 지연시간의 불일치가 발생할 경우의 응답 특성을 고려해야 한다. 이를 위해 본 연구에서도 제어대상 시스템의 지연시간이 학습시와 다른 $d = 19$ 및 $d = 21$ 로 변한 경우의 응답특성을 고찰하였으며 각 경우의 응답 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 그림으로부터 ± 1 정도의 지연시간의 불일치가 발생하였을 경우에도 제안된 지연시간보상기의 응답 특성이 양호함을 알 수 있다.

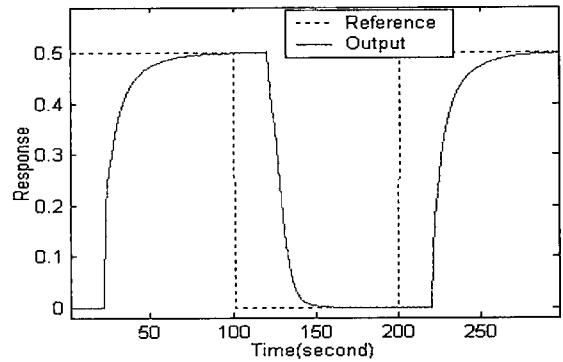


그림 9. 지연시간 불일치가 없을 경우의 응답특성
Fig. 9. Response characteristic when there is no mismatch in time-delay

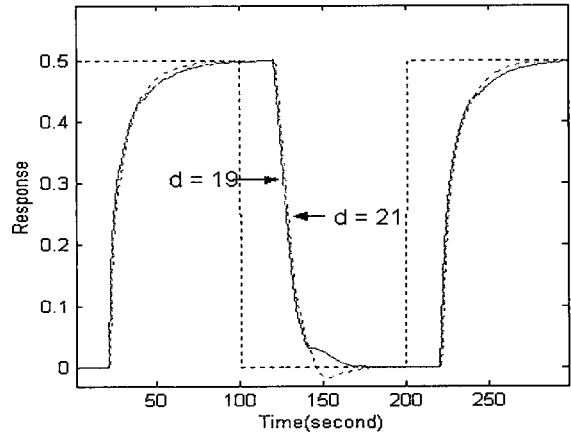


그림 10. 지연시간 불일치시의 응답특성
Fig. 10. Response characteristics when there is a mismatch in time-delay

그림 11은 지연시간 불일치가 크게 발생한 경우의 응답특성을 나타내며 그림으로부터 알 수 있듯이 지연시간의 불일치가 커질수록 시스템 응답특성이 저하됨을 알 수 있다.

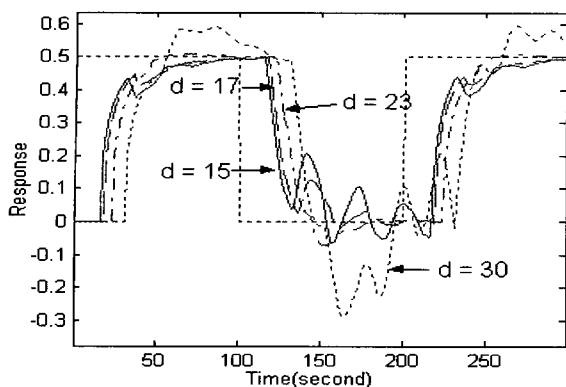


그림 11. 지연시간 불일치가 큰 경우 응답특성
Fig. 11. Response characteristics when there is a large mismatch in time-delay

6. 결과

본 논문에서는 전형적인 Smith 예측기가 지연시간을 갖는 선형 시스템에만 적용이 가능하다는 적용상의 한계를 극복하기 위해 지연시간을 갖는 비선형 시스템에도 효과적으로 도입될 수 있는 새로운 형태의 지연시간 보상기를 제안하였다. 제안된 시스템은 기존 Smith 예측기의 수학적 모델을 퍼지-신경망으로 대체한 것으로 한번의 학습을 통해 얻어진 퍼지-신경망을 직-병렬 및 병렬 모드로 구동시킴으로써 제어 대상시스템의 출력 추종 및 이의 예측값을 효율적으로 얻을 수 있다는 특성을 갖는다. 또한 학습완료된 퍼지-신경망으로부터 구간별 선형 모델을 얻을 수 있으며 이로 인해 비교적 잘 정리된 선형 제어이론에 근거하여 전향경로에 존재하는 제어를 효율적으로 설계할 수 있다는 장점을 갖는다. 제안된 지연시간 보상기의 성능 확인을 위해 비선형 수치시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 결과 지연시간의 불일치가 발생할 경우에도 효과적인 지연시간의 보상이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] Astrom, K., Haggglund, T., "PID controllers: Theory, Design and Tuning", 2nd Ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1996
[2] Morari M., Zafiriou E., "Robust process control", Prentice-Hall International Editions, 1989.
[3] Smith O.H., "Closed control of loops with dead times," *Chem, Eng. Prog.*, vol. 53, no. 6, pp. 217-219, 1957

[4] Tan. Y, Keyser. DE., "Neural network based predictive control for nonlinear processes with time-delay," Conference on 1994 IEEE, 1994
[5] J.-S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, pp. 665-685, May 1993.
[6] J. Buckley, "Sugeno type controllers are universal controller", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 53, pp. 199-303, 1993
[7] M. Sugeno and G. Kang, "Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 18, pp. 329-346, 1986

저 자 소 개



김성호(Sung-Ho Kim)
1984년 : 고려대학교 공과대학 학사
1986년 : 고려대학교 대학원 석사
1991년 : 고려대학교 대학원 박사
1995-1996년 : JAPAN HIROSHIMA UNIVERSITY POST-DOC.
1991-현재 : 군산대 전자정보공학부 부교수

관심분야: 고장진단, 공장 자동화, 뉴로-퍼지 응용, 마이크로 프로세서응용



김주환(Joo-whan Kim)
2000년 : 군산대학교 제어계측공학과 학사
2002년 : 군산대학교 대학원 전자정보공학부 석사
2002-현재 : (주) 플러스 기술

관심분야: 고장진단, 공장 자동화



이영삼(Young-Sam Lee)
2001년 : 군산대학교 제어계측공학과 학사
2001-현재 : 대학원 전자정보공학부 석사과정

관심분야: 고장진단, 공장 자동화