

비선형 시스템의 모델링을 통한 퍼지 제어기 설계*

홍진영 · 최원호
전기전자 및 자동화공학부

<요약>

퍼지 제어에서 일반적 제어규칙의 수정방법은 성능 지수표에 의해 과거의 추론된 출력에 보정 함으로써 과거상태의 규칙을 수정하거나 생성한다. 그러나 이러한 방법은 규칙의 수정이나 생성을 직접 제어대상의 실험을 통하여 이루어져야하며, 또한 원하는 성능의 제어규칙을 얻기 위해서는 많은 수정작업이 거쳐야한다. 본 논문에서는 제어대상의 입·출력 값과 퍼지이론을 통하여 제어대상을 모델링하며, 모델링된 제어대상을 통해 제어규칙을 수정하거나 생성한다. 실제 시스템에 최종 제어 값을 적용함으로써, 실 시스템에 대한 적은 수정작업으로 안정된 제어기를 구현하였다.

Design of Fuzzy Controller Using Nonlinear System Identification

Jin-Young Hong · Won-Ho Choi
Dept. of Electronic Engineering

<Abstract>

In fuzzy controllers, it is not easy to optimize linguistic control rules, the input-output gains, and membership functions. The trial-and-error method is often used to adapt these factors, but it needs many effort and time. The control method using simple look-up tables is very efficient in on-line system control, because it needs a few effort to calculate output values.

In this paper, a control method that is based on look-up table control strategy, that can

* 본 연구는 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

optimize control rules is proposed. To optimize the control rules, real plant are modeled by gradient descent training method and then control rules are modified. After the modifying, the control rules are applied to real plant, then the final rule optimizing learning is performed to minimize the difference between the real plant and modeling plant.

By the simulation with nonlinear system, it is shown that the controller using the proposed method can be constructed easily, and that it works stably.

I. 서 론

퍼지 제어기는 전문가의 제어지식을 언어적인 형태로 기술한 제어규칙을 토대로 하여 제어기가 동작하므로 수학적인 모델링이 필요하지 않아서 비선형 특성을 가지고 있는 시스템에 용이하다^[3]. 퍼지 제어기의 성능은 제어규칙, 소속함수, 퍼지추론, 비퍼지화, 입·출력 이득요소의 구성과 선정에 관한 문제로 귀결되어진다. 따라서 원하는 시스템 응답을 얻기 위해 각각의 요소를 적절히 설정할 수 있도록 하는 연구와 제어기 스스로 제어대상에 대한 최적의 응답을 얻기 위해 각각의 파라미터를 스스로 변화하는 제어기 즉 자기동조 제어기가 많이 요구되어지고 있다.

본 논문에서는 제어규칙의 정합을 통하여 원하는 성능의 퍼지제어기를 구현한다. 비선형 제어는 비선형성을 가진 시스템을 대상으로 그 특성과 제어를 연구한다. 비선형 제어는 크게 케환 선형화, 슬라이딩 모드제어, 그리고 비선형 적응제어 등의 세 분야로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 제어규칙의 정합을 통해 적절히 비선형 시스템을 제어하는 것이다.

일반적 제어규칙의 방법은 성능 지수표에 의해 과거의 추론된 출력에 보정함으로써 과거상태의 규칙을 수정하거나 생성한다. 그러나 이러한 방법은 규칙의 수정이나 생성을 직접 실제의 제어대상을 통하여 이루어져야하며, 또한 안정된 제어기를 얻기 위해서는 일반적으로 많은 수정작업이 요구된다. 만약 제어대상에 대한 전문가나 기술자가 없다면, 효과적인 제어기를 구성하는 것은 어려워지게 된다. 따라서 본 논문에서는 이를 보완하기 위해 다음과 같은 방법을 제안한다. 제어대상의 입·출력 값과 퍼지이론을 통하여 제어대상을 모델링하며, 모델링된 제어대상을 통해 제어규칙을 수정하거나 생성한다. 최종적으로 수정된 제어규칙을 실제 제어대상에 적용하게되며, 또한 모델링된 제어대상과 실제 제어대상 사이의 오차를 보상하기 위하여 최종적인 규칙수정을 하게된다. 위의 과정에 의한 규칙수정은, 최종 규칙수정에서 적은 수정작업으로 원하는 성능의 안정된 제어기를 구성할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수정된 알고리즘이 기본 알고리즘에 비해 적은 수정작업으로 안정된 제어기를 구성함과 동시에, 비선형 프로세서에 대해서 그 응답 특성이 우수함을 연구 검토한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 퍼지제어 이론의 개요와 퍼지제어의 구성요소에 대해 설명하였으며, 3장에서는 본 논문에서 제안한 제어규칙 수정방법에 대해서 설명하였다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 방법에 대해 그 성능을 검증하였으며, 5장에서는 논문의 결과를 맺는다.

II 퍼지 제어 이론 및 일반적인 퍼지제어기

퍼지제어기는 언어적 형식의 제어규칙으로 이루어져 있으며 퍼지 합성규칙에 의해서 제어 입력

이 결정되어 진다. 처음으로 퍼지제어기는 어떤 애매한 오차 입력 값이 들어오면 정량적인 값으로 바꾸어야 하며, 다음에 여러 절차를 거쳐 프로세서를 제어할 수 있는 값으로 결정한다. 그 기본구조가 그림 1에 보이며, 그 구성요소들은 1) 퍼지화 부, 2) 의사결정 부, 3) 지식기반 부, 4) 비퍼지화 부, 5) 프로세서(제어대상) 부로 이루어져 있고 그 기능은 다음과 같다.

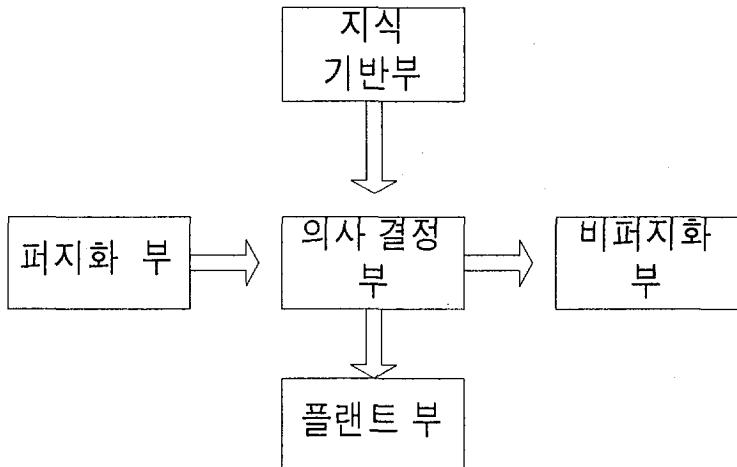


그림 1. 퍼지제어기 기본 구조

1) 퍼지화 부

- 가. 입력변수에 대한 값을 측정한다.
- 나. 입력된 값을 전체집합의 값들로 퍼지 사상시킨다.
- 다. 측정값을 퍼지화 하는 함수를 이용, 적당한 언어 값으로 변환한다.

2) 의사결정 부

구축된 지식 베이스를 계속 참조하면서 퍼지화된 입력 값을 추론의 합성규칙과 퍼지 합축을 이용하여 결론적 퍼지 집합으로 추론하는 단계이다.

3) 지식기반 부

- 가. 프로세서에 대한 지식과 제어목적이 기술된다.
- 나. 지식기반은 제어규칙을 표현한다.

4) 비퍼지화 부

- 가. 출력변수에 할당된 값을 전체집합 위의 값들로 퍼지 사상시킨다.
- 나. 추론된 퍼지제어 값을 하나의 값으로 비퍼지화 한다.

III 플랜트 모델링에 의한 퍼지제어기 구성

본 논문에서는 제어규칙을 생성, 수정하기 위해 실제의 플랜트를 모델링 하였으며, 이를 통해 획득한 제어 값을 안정된 제어기를 구성하기 위해 실제의 플랜트에 다시 적용하였다.

그림 2에서 볼 수 있듯이 일반적 퍼지제어기에 플랜트에 대한 모델링이 추가되어진 형태이다.

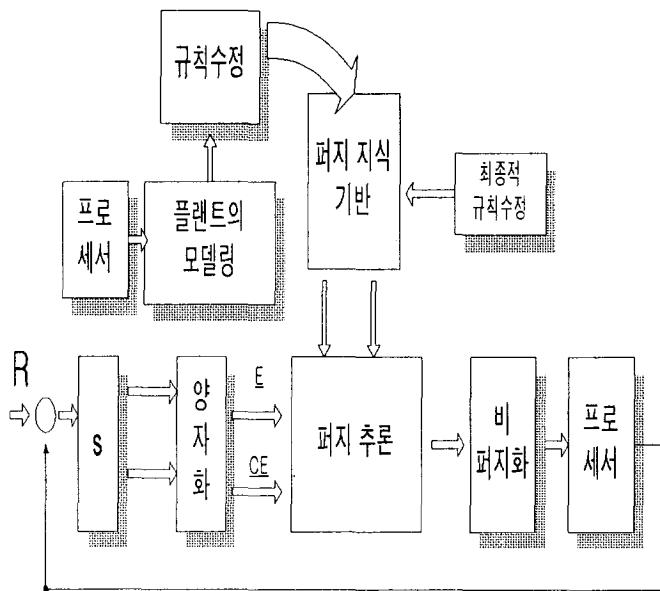


그림 2. 플랜트 모델링에 의한 퍼지제어기

3.1 Gradient Descent Training에 의한 플랜트의 모델링

모델링에 대한 전반적인 개념은 다음과 같다. gradient descent training^[1]을 수행하기에 앞서, 모델링을 위한 퍼지 시스템이 구성되어진다. 퍼지 시스템의 구성에 있어, 퍼지화에 적용된 가우시안 멤버쉽 함수의 폭과 중심이 가변성을 가지도록 하며, 입·출력 데이터의 일치정도에 따라 그 폭과 중심을 결정한다.

본 논문에서는 퍼지시스템의 구성에 있어 “max - product” 추론기법과, 싱글레톤 퍼지화^[4], “center average” 비퍼지화, 가우시안 멤버쉽 함수를 사용하였다.

\overline{y}' 를 위한 gradient descent algorithm은 다음과 같다.

$$\overline{y}'(q+1) = \overline{y}'(q) - \alpha \frac{f - y}{b} z' \quad (1)$$

$$\overline{x'_i}(q+1) = \overline{x'_i}(q) - \alpha \frac{f - y}{b} (y'(q) - f) z' \frac{2(x_{0i}^p - \overline{x'_i}(q))}{\sigma^p(q)} \quad (2)$$

이된다.

$$\sigma_i^p(q+1) = \sigma_i^p(q) - \alpha \frac{f - y}{b} (y'(q) - f) z' \frac{2(x_{0i}^p - \overline{x'_i}(q))^2}{\sigma^p(q)} \quad (3)$$

이 된다.

여기서 $i=1,2,3, \dots, n$ (입력변수), $l=1,2,3, \dots, M$ (초기 제어 규칙수) 그리고 $q=1,2,3, \dots$

· · · (한 입력에 대한 training 횟수), x_0^p 는 새로운 입력 값이 된다.

$$e^p = \frac{1}{2} [f(x_0^p) - y_0^p]^2 \quad (4)$$

모델링에 대한 전체적인 순서를 간략화 하면,

가) 모델링을 위한 퍼지 시스템을 구성함과 동시에, 가우시안 멤버쉽 함수의 폭과 중심을 초기화한다.

나) 주어진 초기 값으로부터 y^i , \bar{x}_i^i , σ_i^i 를 계산한다.

다) y^i , \bar{x}_i^i , σ_i^i 를 개선하기 위해 gradient descent algorithm를 적용한다.

라) e^p 의 값이 원하는 값이 될 때까지 $q=q+1$ 을 하여 순서 나) 다)를 반복한다.

마) $p=p+1$ 을 하여 다음 데이터에 대해서 나) 다) 라)를 반복한다.

여기서 q 는 e^p 가 원하는 값이 될 때까지 반복하는 횟수이며, p 는 다음 입·출력 값을 의미한다. gradient descent algorithm에 의한 모델링 결과와 모델링시 고려되어져야 할 사항에 대해서 검토하기 위하여, 3개의 비선형 함수를 사용하였다. 식 6, 7은 다중 입·출력 함수이다.

$$y(k) = \frac{y(k-1)y(k-2)(y(k-1)+2.5)}{(1+y(k-1)^2+y(k-2)^2)} + u. \quad (5)$$

$$y_1(k) = \frac{(1.5+y_1(k-1))}{(1+y_2(k-1)^2)} + u_1 \quad (6)$$

$$y_2(k) = \frac{(1.0+y_1(k-1)y_2(k-1))}{(1+y_2(k-1)^2)} + u_2 \quad (7)$$

$$y(k) = \frac{(2.5+5y(k-1)y(k-2))}{(0.5+y(k-1)^2+y(k-2)^2+y(k-3)^2)} + 0.8u \quad (8)$$

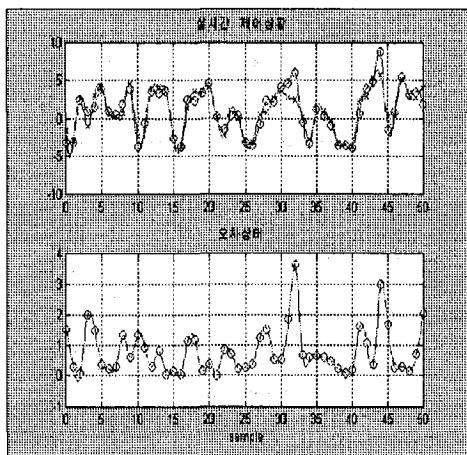


그림 3. 식5의 플랜트와 모델의 실시간 출력(상)과 오차값(하)

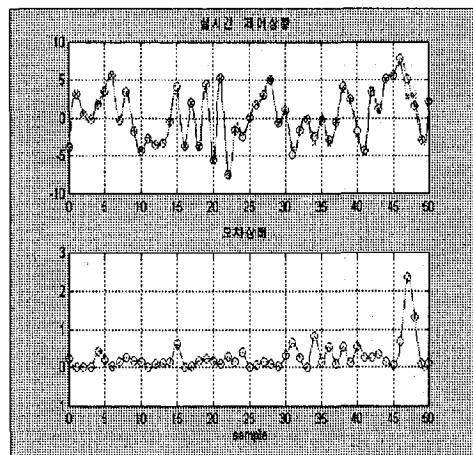


그림 4. 식6의 플랜트와 모델의 실시간 출력(상)과 오차값(하)

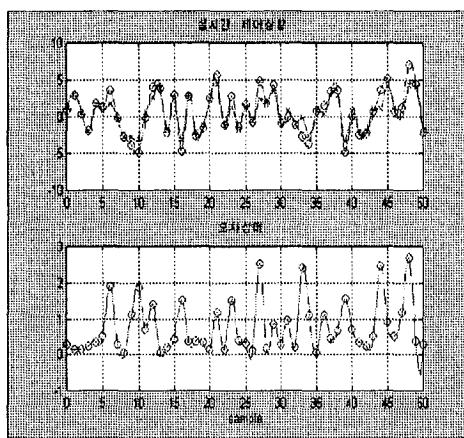


그림 5. 식7의 플랜트와 모델의 실시간 출력(상)과 오차값(하)

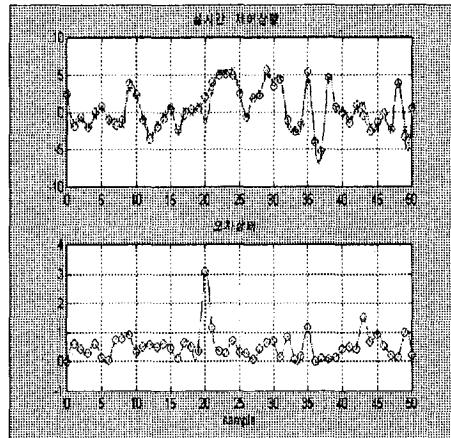


그림 6. 식8의 플랜트와 모델의 실시간 출력(상)과 오차값(하)

그림 3, 4, 5, 6은 식5, 6, 7, 8의 1000회 반복 학습 후, 측정한 실시간 파형을 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 오차상태를 관측하여 보면, 비선형성이 클수록 즉 식 6, 7, 8이 식5보다 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 다중 입·출력 함수일 경우가 다른 함수에 비해 오차가 제일 큼을 알 수 있다. 다음의 그림들은 식 5에 대해 데이터 수, 알파 값이 모델링의 정확성에 어떠한 영향을 미치는 가에 대해 평균오차와 정합횟수로 나타내었다. 여기서 평균오차는 각각의 입·출력 값에 대해 모델과 실제의 시스템사이에 생기는 첫 오차들의 평균이다. 정합횟수는 각각의 데이터에 대해 모델이 실 시스템과의 최소 오차(e)를 얻기 위해 반복한 횟수의 평균이다.

식 5에 대해 사용된 기본 파라미터 값은 다음과 같다.

최소오차 : 0.05, 데이터 수 : 500,
알파 값 : 0.01, 시그마 값 : 0.15,
규칙수 : 75, 최대 정합횟수 : 18

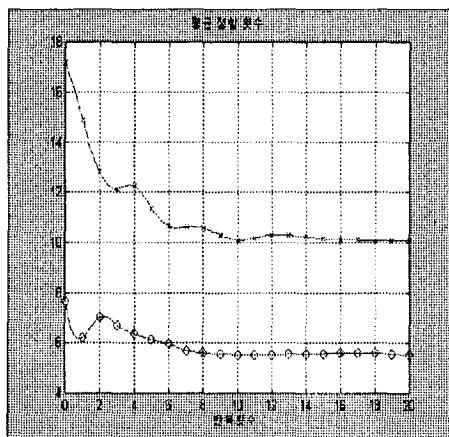


그림 7. 데이터 수 500(x), 5000(0)에 대한 평균오차

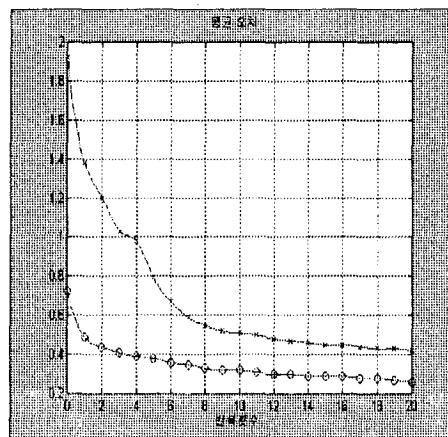


그림 8. 데이터 수 500(x), 5000(0)에 대한 평균 정합횟수

그림 7, 8에서 보듯이 데이터 수가 많을수록 평균오차와 평균 정합횟수가 빠르게 줄어듦을 알 수 있다. 그러므로 모델과 실제의 시스템 사이의 정확성에 있어, 데이터수가 많을수록 더욱 더 향상되게 된다.

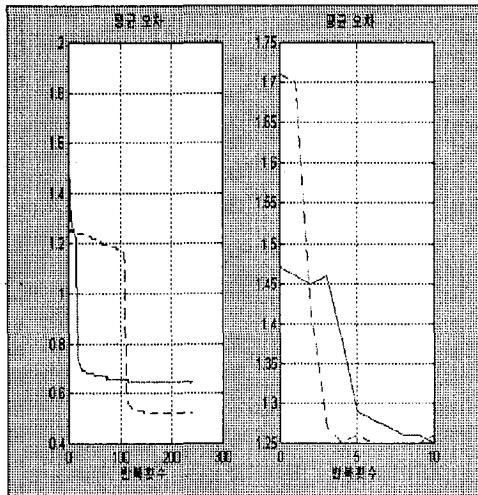


그림 9. 알파(0.01, 0.7)값에 대한
평균오차(점선:0.01, 실선:0.7)

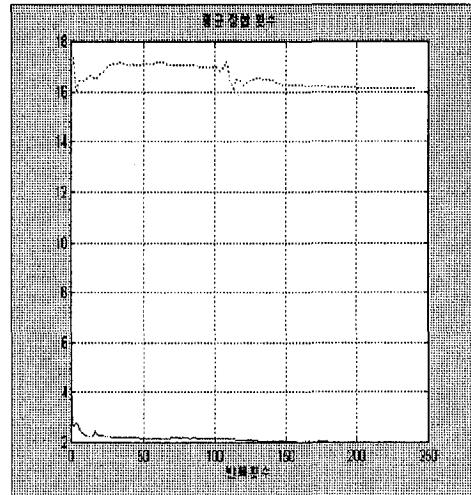


그림 10. 알파(0.01, 0.7)값에 대한
평균 정합횟수(점선:0.01, 실선:0.7)

그림 9, 10에 알파 값의 크기에 따른 평균 오차와 평균 정합횟수를 나타내었다. 그림9에서 보듯이 알파 값이 큰 경우에는 초기 오차는 적지만, 반복횟수가 증가할수록 오차의 감소는 둔감하게 되며, 일정값 이하로는 감소하지 않는다. 알파 값이 작은 경우에는 초기오차는 크며, 반복횟수가 증가할수록 일정값 이하로는 오차가 떨어지지 않는다. 그러나 최종적인 결과를 살펴볼 때 알파 값이 작은 경우가 최종적인 오차가 더 적음을 알 수 있다. 그림 10에는 평균 정합횟수를 나타내고 있으며, 알파 값이 큰 경우가 작은 경우에 비해서 그 값이 훨씬 작음을 알 수 있다.

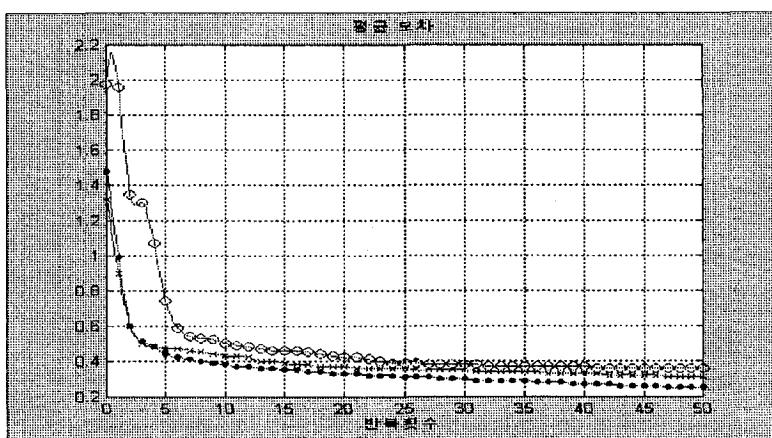


그림 11. 같은 조건에서 세 함수에 대한 평균오차

그림 11에 같은 조건(규칙수 75, 시그마 0.15, 데이터 500, 알파 0.05)에서 세 함수에 대해 모델링한 결과를 나타낸 것이다. 그림표시에서 (0)는 식 8을, (x)은 식 6을 (·)은 식 5를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 비선형성이 제일 작은 식 5가 다른 함수에 비해 반복 횟수가 많아짐에 따라, 빠르게 평균오차가 줄어듦을 볼 수 있다.

3.2 실제 제어대상에 적용될 퍼지제어기 설계

본 논문에서는 제어규칙의 정합을 위한 퍼지 제어기의 구성에 있어 “max - min”추론기법과, 싱글레톤 퍼지화, 무게중심법 비퍼지화, 가우시안 멤버쉽 함수를 사용하였다. α 값은 1.73으로 하였고, 각 퍼지변수간의 폭은 2.0으로 하였다.

IV 성능평가 및 검토

컴퓨터 시뮬레이션은 그림 12와 같이 진행된다. 제안한 퍼지제어기의 성능을 평가하기 위해서 식5, 6, 7, 8을 사용하였다. 입·출력이들은 $GO=1.5$, $GE=2.3$, $GCE=0.5$ 를 사용하였다. GE와 GCE는 모든 비선형 시스템에 공통으로 적용하였다.

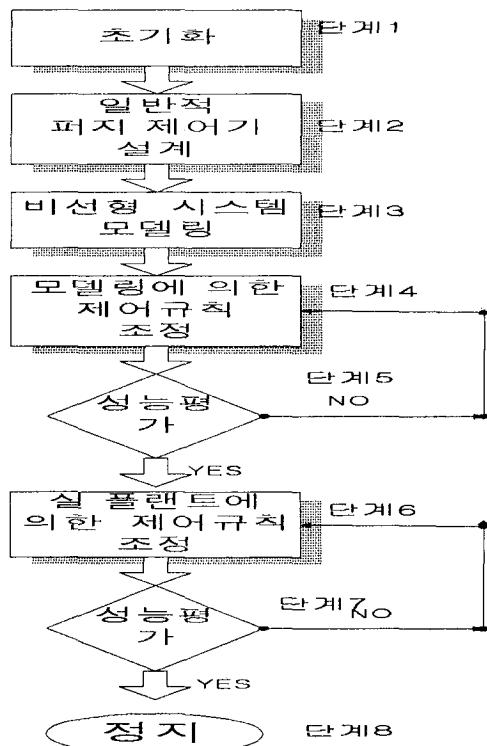


그림 12. 컴퓨터 시뮬레이션 순서도

4.1 적용사례

4.1.1 적용사례 1

식 5와 같은 비선형 시스템에 대해서 제안된 퍼지제어의 성능을 검증하였으며, 기준 값은 5로 하였다.

그 외 적용된 파라미터는 다음과 같다.

$$u : [-4 \quad - \quad +4],$$

데이터 : 500, 규칙 : 75, 시그마 : 0.15

알파 : 0.01, 반복 : 18, 기준오차 : 0.05

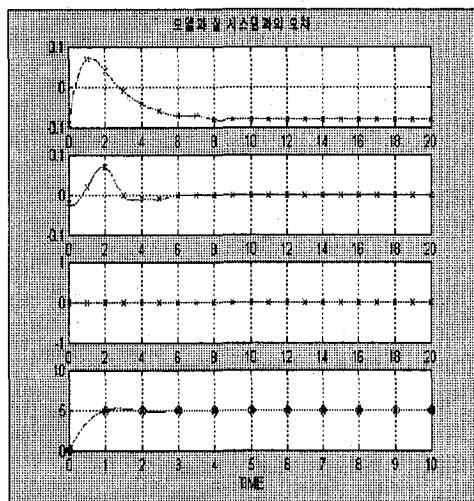


그림 13. 사례1에 대해 모델링된 시스템을 이용한 제어결과(기준 5)

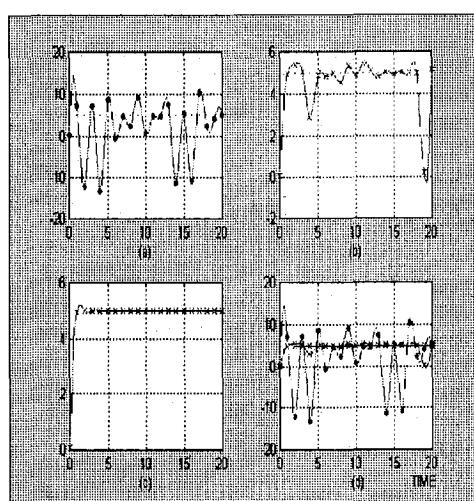


그림 14. 사례1에 대해 실제 제어대상을 이용한 최종 제어결과(기준 5)

그림 13에 사례1에 대한 제어결과를 나타내었으며, 기준 값은 5로 하였다. (a)는 제어초기 파형이며, (b)는 중간결과이다. 그리고 (c)는 최종결과이며, (d)는 전체적 흐름을 한 화면에 나타낸 것이다. (a)에서 보듯이 큰 값의 출력이득으로 인해, 전체적 시스템이 불안정한 것을 알 수 있다. 그러나 (b)에서 전체적으로 파형이 안정화 되어감을 알 수 있다. 또한 (c)에서는 파형이 완전히 안정화되었음을 나타내고 있다. 그러나 초기 파형에 비해 상승시간이 더 길어졌음을 알 수 있다. 그림 14에서 첫 번째 파형이 초기, 두 번째 파형이 중간, 세 번째 파형이 최종 오차 파형이 된다. 마지막 파형은 최종 정합된 시스템 파형과 기준모델 파형을 나타낸다.

그림 14에서 보듯이 초기에는 모델링과 시스템사이에 오차가 발생함을 알 수 있다. 그러나 중간파형에서 정합횟수가 증가할수록 그 차는 줄어들었으며, 최종 파형에서는 오차가 없어졌음을 알 수 있다. 마지막 파형에서 나타냈듯이 최종 정합된 파형과 기준모델 파형이 완전히 일치함을 알 수 있다.

4.1.2 적용사례 2

식 6과 7과 같은 다중 입·출력 특성을 가지고 있는 비선형 함수에 대해 제안된 제어기 를 실험하였다.

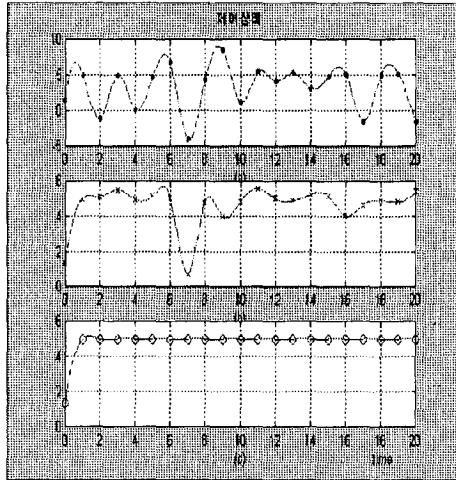


그림 15. 사례2(식 6)에 대해 모델링된 시스템을 이용한 제어결과(기준 5)

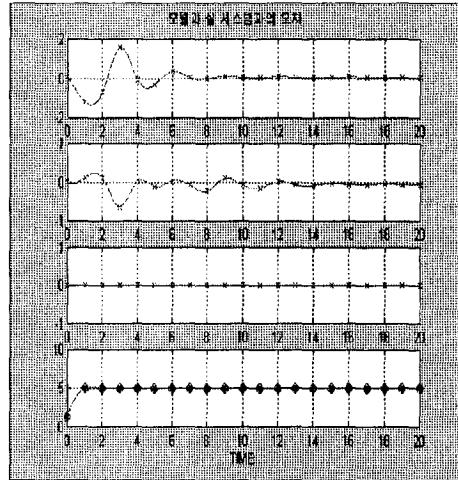


그림 16. 사례2(식 6)에 대해 실제제어 대상을 이용한 제어결과(기준 5)

그림 15는 식 11에 대해 모델링된 플랜트를 이용한 제어결과를 나타내고 있다. 그림에서 (a)는 초기, (b)는 중간, (c)은 최종 결과 파형이다. 사례 1에서와 같이 초기의 불안정한 파형에서 점차 안정화됨을 알 수 있다.

그림 16에 사례 2에 대해 실제의 제어대상에 대해서, 모델을 이용해 얻은 최종 제어 값을 적용한 결과를 나타내었다. 그림에서 (a)는 초기, (b)는 중간, (c)은 최종 결과 파형이다. 초기 파형을 사례1의 초기 파형과 비교하여 보면, 정확성이 떨어짐을 알 수 있다. 그것은 사례 2의 다중 입·출력시스템이 더욱 더 비선형성이 큼을 의미한다. 그러나 사례1에서와 같이 적은 정합횟수로 기준모델과 최종 정합 파형이 일치하였다. 식 6에 대해서는 반복 정합회수 12회가, 식 7에 대해서는 13회가 사용되었다.

4.1.3 적용사례 3

식 8과 같은 비선형 시스템에 대해 제안된 피지제어기를 적용하였다.

그림 18에 사례 3에 대해 실제의 제어대상에 대해서, 모델링을 이용해 얻은 제어 값을 적용한 결과를 나타내었다. 그림에서 첫 번째 파형이 초기, 두 번째 파형이 중간, 세 번째 파형이 최종 오차 파형이 된다. 마지막 파형은 최종 정합된 시스템 파형과 기준 모델 파형을 나타낸다. 그림에서 보듯이 정합횟수가 증가할수록 그 차는 줄어들며, 최종 파형에서는 오차가 없어졌음을 알 수 있다.

초기 파형을 사례 1의 초기 파형과 비교하여 보면, 정확성이 떨어짐을 알 수 있다. 그것은 사례 3의 시스템이 더욱 더 비선형성이 큼을 의미한다. 그러나 사례 1이나 2와 같이 적은 정합횟수로 기준모델과 최종 정합 파형이 일치하였다. 즉 모델과 실제의 제어대상이 일치하는데 반복 정합횟수 10회가 사용되었다. 그렇지만 이것은 사례 1의 5,6,7에 비해 많은 횟수가 된다.

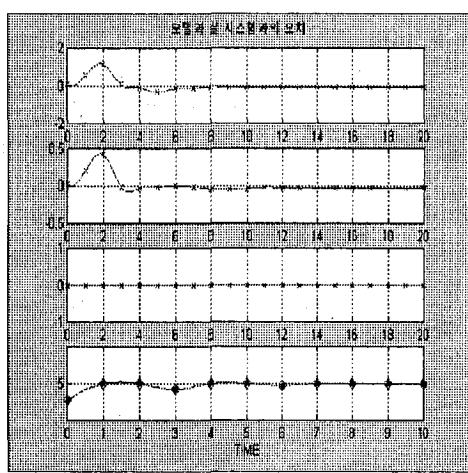


그림 17. 사례3에 대해 모델링된
제어대상을 이용한 제어결과(기준 5)

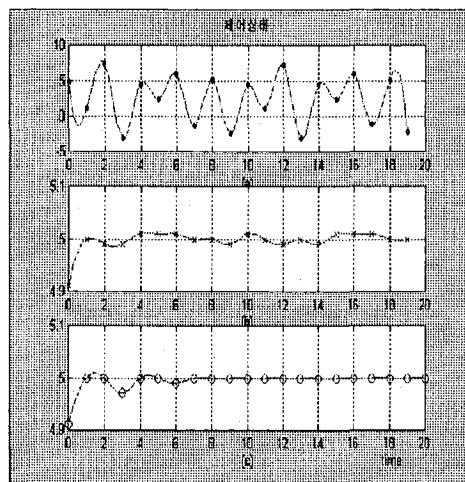


그림 18. 사례3에 대해 실제 제어대상을
이용한 제어결과(기준 5)

4.1.4 기준 20에 대한 적용결과

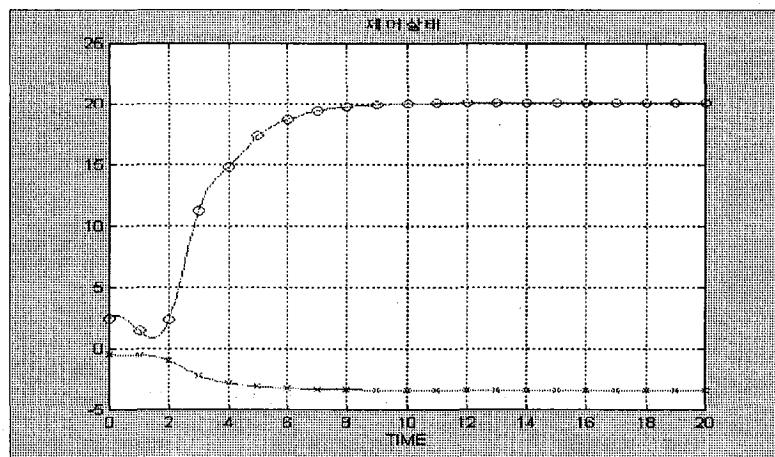


그림 19. 기준20에 대해 실 제어대상을 이용한 제어결과[-30 ~ +30]

그림 19에서 동그라미(0)는 적용사례 1에서 사용되었던 데이터 500에 해당하며, (x)는 데이터 5000에 해당한다. 데이터 500에서는 $[0 - 20]$ 사이의 오차가 발생하였으며, 데이터 5000에서는 $[0 - 3]$ 의 오차가 발생하였다. 위의 결과로부터 한정된 적은 데이터로는 오차를 효과적으로 줄일 수 없음을 알 수 있다.

V. 결론

일반적인 정합 폐지제어기에서는 입·출력이득이나, 멤버쉽 함수, 제어규칙을 정합하기 위해, 실시간으로 제어대상에 대해 실험을 수행하여야 하며, 또한 안정된 제어기를 구성하기 위해 많은 수정작업을 필요로 한다. 또한 제어대상에 대한 전문가가 없다면, 효과적인 제어기를 구성하는 것이 어려워지게 된다.

본 논문에서는 비선형적 특성을 가지는 시스템에 대해 폐지이론과 gradient descent training을 이용하여 플랜트를 모델링 하였으며, 이에 사용된 폐지 구성요소 중 멤버쉽 함수는 가우시안 멤버쉽 함수를 사용하였다. 즉 가우시안 멤버쉽 함수의 폭과 중심을 가변하여 비선형성을 표현하는 적절한 값을 찾도록 하였다.

위의 모델링과정을 통한 제어규칙 수정방법은, 실제 시스템이 아닌 모델링된 시스템이므로, 원하는 성능을 얻기 위해 필요한 많은 반복 수정작업을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 시뮬레이션을 통해, 빠른 상승시간을 얻기 위해 적용한 높은 출력이득으로 인한 불안정한 시스템이, 계속적인 반복 수정작업을 통해 안정화됨을 확인할 수 있었다. 모델링된 시스템에 의해 정합된 제어규칙은 실제 시스템에도 역시 반영됨을 실험을 통해 확인하였다. 그러나 실 제어대상에 대한 초기의 파형은 기준 모델과 정확히 일치하지 않았다. 이는 플랜트의 모델링이 완전하지 않았기 때문에 발생한 것이다. 본 논문에서는 이를 위해 실제 시스템에 대해서도 몇 번의 학습을 실시하여, 기준 모델과 실제 시스템이 일치하도록 하였다. 그러나 gradient descent training 방법은 입·출력데이터의 범위에 대해 많은 영향을 받는다. 따라서 제한된 입·출력데이터 수에 대해, 그 범위가 커지면 플랜트의 모델링 성능이 떨어지게 된다.

추후 과제로는 제한된 데이터 수에 대해 모델링한 시스템과 실제 시스템과의 오차를 효과적으로 줄이는 방법을 모색하는 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] L. X. Wang, " A Course In Fuzzy Systems And Control. " Prentice Hall, 1997.
- [2] C. J. Harris, C. G. Moore & M. Brown, "Aspects Of Fuzzy Logic and Neural Nets" in World Scientific Series in Robotics and Automated Systems. Vol.6, pp175-179, 1993
- [3] 채석, 오영석, "폐지이론과 제어", 청문당, 1995
- [4] Mizimoto, "Fuzzy controls by fuzzy singleton-type reasoning method", Fifth IFSA World Congress(1993), 945-948
- [5] C. C. Lee, " Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, Part II" , IEEE Trans Systems Man Cybernet, 20(1990) 419-435
- [6] Wang, L. X.; Mendel, J .; (1992) " Generating Fuzzy Rules by Learning From Examples," IEEE Trans. on Syst. Man and Cybernetics, vol. 22, no. 6, july