

Singleton 결론부를 갖는 퍼지제어기의 설계에 관하여

채 양 범*

On Design of Fuzzy Controller Expressed by Fuzzy Rules with Singleton Consequents

Yang-Bum Chae

〈目 次〉

| | |
|------------------|------------------------|
| Abstract | 2.2 TSK 퍼지제어기 설계 |
| 1. 서론 | 2.2.1 퍼지제어기의 형태 |
| 2. 알고리즘의 전개 | 2.2.2 퍼지제어기의 설계 |
| 2.1 TSK 퍼지모델의 작성 | 2.3 singleton 퍼지제어기 설계 |
| 2.1.1 퍼지모델의 인식 | 3. 시뮬레이션 |
| 2.1.2 퍼지 입출력모델 | 4. 결론 |

Abstract

TSK fuzzy system can represent effectively the behavior of a complex nonlinear system with a low number of rules as a linear system with the desired accuracy and guarantee the stability of the closed loop system, while the interpretation of the rules is difficult due to the functional nature of the consequents. On the contrary, fuzzy controller with singleton consequents is understandable intuitively and adjustable the rules easily due to linguistic expression of the rules.

Ideally, one would like to combine the positive identification properties of TSK fuzzy system with the advantages of fuzzy controller with singleton consequents. Therefore, this paper suggests a method for designing fuzzy controller with singleton consequents by using TSK fuzzy system when the behavior of a nonlinear system can be described a singleton fuzzy model by human expert.

* 한국해양대학교 운항시스템공학부 부교수

1. 서 론

퍼지이론은 1965년 L. A. Zadeh에 의해 제창되어, 일상생활에서 인간이 자주 사용하는 비확률적이고 애매성에 대한 언어의 의미와 개념을 정성적으로 나타낼 수 있는 수학적인 바탕을 마련하였다. 이러한 퍼지이론은, 시스템의 거동을 나타내는 정확한 수식모델을 얻을 수 없거나 기존의 제어이론으로 제어기 설계가 어려운 복잡하고 비선형적인 시스템을 숙련가가 교묘히 제어하는 경우, 숙련가의 오랜 경험과 지식을 이용하여 그 시스템의 거동을 정성적인 언어로 표현할 수 있다. 그러므로 비선형시스템의 변수 사이의 정확한 수학적인 묘사는 일반적으로 인간의 숙련된 제어지식이 If-then 형식의 정성적인 언어적 규칙으로 대체되어 표현된다.

퍼지이론은 Mandani에 의해 1974년 비선형 시스템인 증기기관의 제어를 위해 다음과 같은 언어적 규칙의 형태로 최초로 적용되어 그 실용 가능성을 나타내었다

$$\text{if } z_1 \text{ is } F_1, z_2 \text{ is } F_2, \dots, z_m \text{ is } F_m \text{ then } y \text{ is } Y \quad (1)$$

여기에서는 F_1, F_2, \dots, F_m 와 Y 는 퍼지집합이다. 특히 (1)의 단순화된 형태의 규칙, 즉 결론부의 parameter Y 가 singleton인 규칙은 Automobile tracking control을 위한 퍼지제어에[9] 최초로 사용된 이후 로봇팔의 제어 등에[4,13] 응용되어 왔으며, 최근에는 무인 헬리콥터의 제어와[12] 같은 실제적 응용에 있어 대단히 유용한 것으로 알려지고 있다.

상기 형태의 제어기는 규칙의 언어적 특성 때문에 이해하기가 쉽고 데이터로부터 인식된 규칙은 시스템에 관한 이전의 지식을 토대로 한 규칙과 직접적인 결합이 가능하지만 구조적으로 데이터로부터 모델의 인식이 어려워 원하는 정확도를 가지는 시스템 거동의 근사화를 위해서는 많은 규칙들이 필요한 특성을 지니고 있다.

반면에 TSK 퍼지모델은 식 (2)와 같이 결론부가 선형식인 퍼지규칙들로 구성되어 있으므로 그 결론부의 함수적 성질 때문에 이해하기가 어렵다. 그러나 TSK 퍼지모델은 시스템의 입출력 데이터를 이용하여 쉽게 인식되어질 수 있으며, [11] 복잡한 비선형 시스템을 적은 수의 규칙들로 원하는 정확도를 가지는 선형 시스템처럼 잘 표현할 수 있다.[2,7,10]

$$\begin{aligned} &\text{if } z_1 \text{ is } F_1, z_2 \text{ is } F_2, \dots, z_m \text{ is } F_m \\ &\text{then } y = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 TSK 퍼지모델로부터 페루프 시스템의 안정성을 보장하는 제어기를 설계할 수 있으면 비선형 시스템의 제어기를 체계적으로 설계할 수 있게 된다. 지금까지 이에 관한 많은 연구들이 발표되었고[3,6,8,14] 행해지고 있다.

한편 매우 복잡한 비선형 시스템에 대해, 숙련가의 경험과 지식으로 제어 패턴은 정성적인 언어로 표현하기 어렵지만 그 시스템의 거동을 정성적인 언어로 표현할 수 있는 경우에는 그 시스템의 거동을 결론부가 singleton인 퍼지모델로 표현하고 그 퍼지모델로부터 전체 폐루프 시스템의 안정성을 고려하면서 퍼지제어기를 설계할 필요가 있다.

본 논문에서는 결론부가 singleton인 퍼지제어기를 플랜트의 퍼지모델로부터 TSK 퍼지 시스템을 이용하여 설계하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 결론부가 singleton인 퍼지제어기 설계를 위한 알고리즘을 단계별로 전개하고, 3장에서는 제안된 방법의 유효성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 행한다. 그리고 마지막으로 4장에서 결론을 논한다.

2. 알고리즘의 전개

기본적인 물리적 메카니즘에 대한 지식이 불충분하거나 비선형적인 플랜트의 동적 거동이 그 플랜트를 잘 아는 전문가의 경험과 지식에 의해 결론부가 singleton인 퍼지모델로 표현될 수 있을 때, 그 퍼지모델로부터 결론부가 singleton인 퍼지제어기를 설계한다. 이 때 TSK 퍼지 시스템을 이용하며 그 block diagram은 그림 1 과 같다.

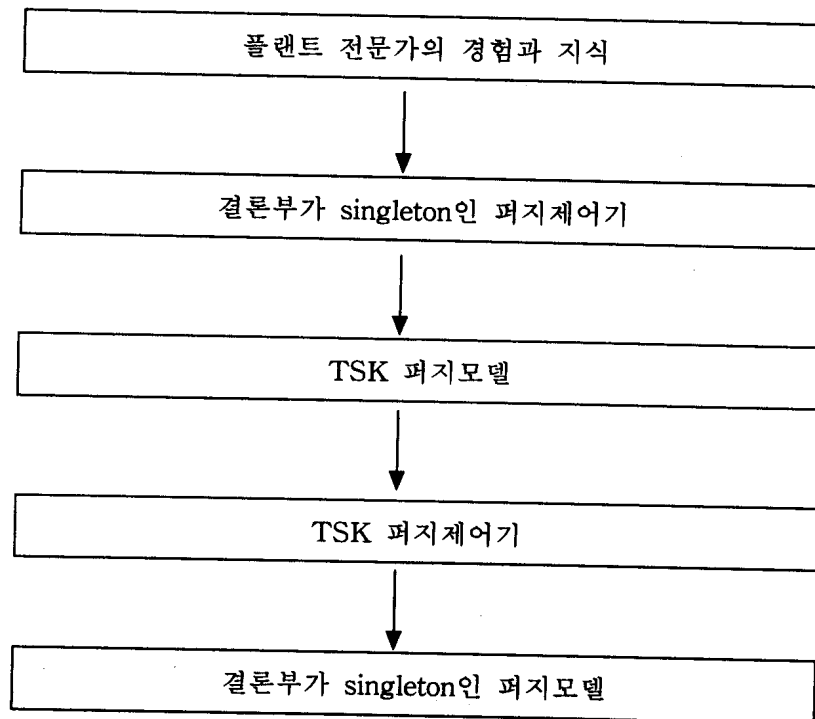


그림 1. algorithms의 전개

2.1 TSK 퍼지모델의 작성

2.1.1 TSK 퍼지모델의 인식

결론부가 singleton인 퍼지모델은(이하 퍼지모델이라 한다.) 비선형 모델이므로 TSK 퍼지 모델로 표현할 수가 있다. TSK 퍼지모델은 시스템의 입출력 데이터를 이용하여 인식되어지므로 퍼지모델로부터 만들어지는 데이터를 이용하여 인식하면 된다. 퍼지모델로부터 만들어지는 입출력 데이터는 입력 공간에서 작업부분의 공간에 골고루 분포하도록 한다. 입출력 데이터를 이용하여 TSK 퍼지모델을 인식하는 알고리즘은 그림 2와 같다.

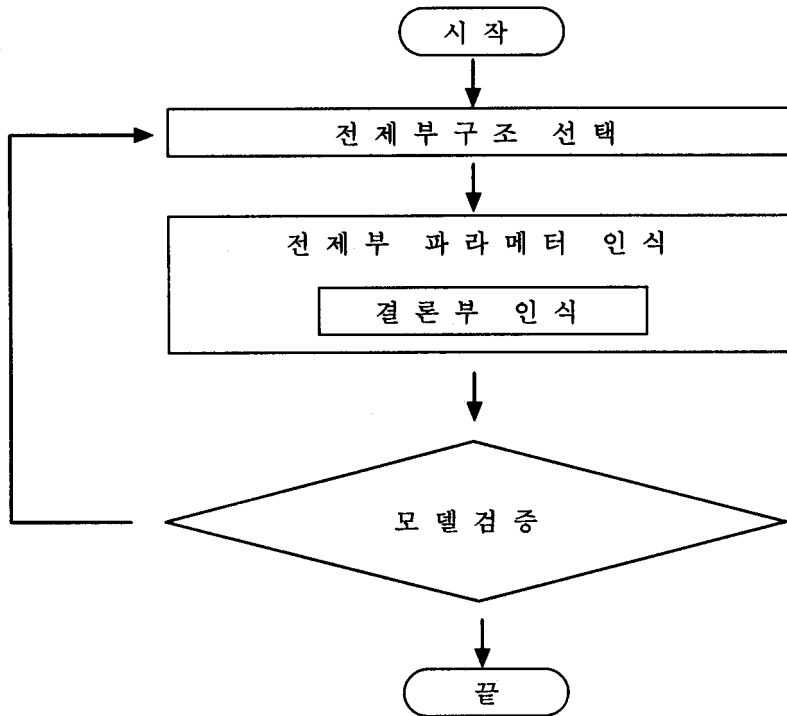


그림 2. TSK 퍼지모델의 인식

그림 2에서 전제부구조 선택이란 입력공간의 퍼지분할 방법을 찾는 것이다. 이 때 퍼지분할한 수가 퍼지규칙의 수이며, 그 선택 방법은 입력 공간을 전혀 분할하지 않는 모델 즉 선형모델로부터 출발하여 모델의 검증 값이 최소가 될 때까지 입력 공간의 퍼지분할 수를 늘여 나간다.

전제부 파라미터 인식은 퍼지집합의 멤버십 함수를 특징짓는 파라메타를 찾는 것으로 출력 오차의 평방합을 최소로 하는 것을 목적함수로 하여 비선형 계획법을 이용하여 구한다.

이 때 사용되는 비선형 계획법으로는 complex법, genetic algorithms 등이 있다.

결론부 인식은 출력 y 가 결론부 파라미터들의 한 개 선형식으로 표현되므로 선형시스템에서 하는 방법을 이용할 수 있다.

2.1.2 TSK 퍼지 입출력모델

시스템의 입출력 데이터를 이용하여 인식되는 TSK 퍼지모델의 일반적인 형태는 다음과 같은 퍼지규칙들로 구성된다.

$$\begin{aligned} M^i: & \text{if } z_1 \text{ is } F_1^i, \dots, z_m \text{ is } F_m^i \\ & \text{then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_n^i x_n \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 M^i 는 i 번째 규칙임을 뜻하고, z_j 와 x_j 는 각각 전제부 및 결론부 변수, F_j^i 는 퍼지 집합, a_j^i 는 결론부 파라미터, y^i 는 규칙 M^i 로부터의 출력을 의미한다. 출력 y 는 다음과 같이 구한다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r w^i(z) y^i}{\sum_{i=1}^r w^i(z)} \quad (4)$$

$$w^i(z) = \prod_{j=1}^m F_j^i(z_j) \quad (5)$$

여기서 r 은 규칙의 개수이고 $w^i(z)$ 는 i 번째 규칙의 적합도를 나타내며 $F_j^i(z_j)$ 는 퍼지 집합 F_j^i 에서 z_j 의 멤버쉽 값이다.

2.2 TSK 퍼지제어기의 설계

2.2.1 TSK 퍼지제어기의 형태

앞에서 구한 TSK 퍼지모델로부터 폐루프 시스템의 안정성을 보장하는 퍼지제어기의 설계 방법을 제안한다. TSK 퍼지모델은 결론부가 한 개의 선형식으로 표현되는 퍼지 규칙들로 구성되며 여러 선형 시스템의 각각에 해당하는 적합도 q^i 를 곱하여 그 합으로 하나의 비선형 시스템을 다음과 같이 표현한다.

$$y = \sum_{i=1}^r q^i \times \text{output from (linear system)}^i$$

따라서 TSK 퍼지제어기로부터 제어입력을 다음과 같이 구할 경우 폐루프 시스템의 거동을 원하는 정확도로 만들 수 있음을 기대할 수 있을 것이다.

$$u = \sum_{i=1}^r q^{*i} \times \text{output from (linear controller)}^i$$

여기서 $(\text{linear controller})^i$ 는 $(\text{linear system})^i$ 로부터 설계되는 제어기이며 q^{*i} 는 q^i 를 변형한 것이다. 그러므로 TSK 퍼지제어기의 형태는 TSK 퍼지모델과 같은 수의 퍼지 규칙들로 구성되게 되며 그 전제부는 TSK 퍼지모델의 전제부와 동일하게 된다.

2.2.2 TSK 퍼지 입출력모델로부터 TSK 퍼지제어기의 설계[5]

일반적인 TSK 퍼지 입출력모델의 i 번째 규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M^i: & \text{ if } z_1 \text{ is } F_1^i, \dots, z_m \text{ is } F_m^i \\ & \text{ then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_n^i x_n + b^i u \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 u 는 제어입력 변수이며, 모든 i 에 대하여 $z_i = u$ 라고 가정한다. 위의 퍼지모델로부터의 출력은 다음과 같다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r w^i(z) (a_0^i + \dots + a_n^i x_n + b^i u)}{\sum_{i=1}^r w^i(z)} \quad (7)$$

원하는 출력을 y_d 라고 하자. TSK 퍼지제어기는 TSK 퍼지모델의 각 규칙들로부터 설계된다. TSK 퍼지모델의 i 번째 규칙에 해당하는 TSK 퍼지제어기의 규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C^i: & \text{ if } z_1 \text{ is } F_1^i, \dots, z_m \text{ is } F_m^i \\ & \text{ then } u^i = (y_d - a_0^i - a_1^i x_1 - \dots - a_n^i x_n) / b^i \end{aligned} \quad (8)$$

규칙 C^i 의 전제부는 규칙 M^i 의 전제부와 동일하다. 제어입력 u 를 식 (9)와 같이 구하면 퍼지모델의 출력은 식 (10)과 같이 원하는 출력이 된다.

$$u = \sum_{i=1}^r \left(\frac{w^i(z) b^i}{\sum_{k=1}^r w^k(z) b^k} \right) u^i \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y &= \left(\sum_{i=1}^r w^i(z) (a_0^i + \dots + a_n^i x_n + b^i u) \right) / \sum_{i=1}^r w^i(z) \\ &= \left(\sum_{i=1}^r w^i(z) (a_0^i + \dots + a_n^i x_n) + \sum_{i=1}^r w^i(z) b^i u \right) / \sum_{i=1}^r w^i(z) \\ &= \left(\sum_{i=1}^r w^i(z) (a_0^i + \dots + a_n^i x_n) + \sum_{i=1}^r w^i(z) b^i u^i \right) / \sum_{i=1}^r w^i(z) \\ &= y_d \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)를 consistence condition이라 부르며 TSK 퍼지제어기로부터 제어입력을 추론하는 방법으로 사용한다.

2.3 singleton 결론부를 갖는 퍼지제어기의 설계

TSK 퍼지제어기로부터 결론부가 singleton인 제어기를 설계하기 위하여 TSK 퍼지제어기의 입력공간을 complementary 퍼지분할한다.[1] 이 분할된 입력공간으로 새로운 규칙들의 전제부 구조를 만들어 singleton인 결론부를 인식하면 된다.

이 논문에서 제시하는 complementary 퍼지분할법을 간단히 설명하기 위하여 다음과 같은 SISO시스템의 모델을 가정하자.

$$R_j : \text{if } x \text{ is } A_j \text{ then } y \text{ is } a_j x + b_j$$

퍼지집합 $A = \{ A_j \mid j=1, \dots, K \}$, K 는 퍼지분할에 있어 퍼지집합의 수 즉 규칙의 수이다. 이 분할은 전체 $X \subset R$ 에서 정해지는 1차원 정규퍼지집합들로 이루어진다. 퍼지집합 A_j 의 분포배열을 다음과 같이 하면 각 집합의 core는 접하지 않는다.

$$\sup \text{core } A^i < \inf \text{core } A^{i+1}, i=1, 2, \dots, K-1 \quad (11)$$

$$\text{core } A^i \cap \text{core } A^j = \emptyset, \forall i, j=1, \dots, K, i \neq j \quad (12)$$

정규화 연산자 norm을 사용하여 $C = \{ c_k \}$ 를 다음과 같은 점들의 집합이라 하자.

$$C = \{ \inf \text{ core } A^i, \sup \text{ core } A^i, \text{ core norm}(A^i \cap A^{i+1}), \inf \text{ core } A^{i+1}, \sup \text{ core } A^{i+1}, \dots \} \quad (13)$$

complementary 퍼지집합 A_c 는 다음과 같이 core C 을 가지는 삼각형 퍼지집합들의 한 분할로 정해진다.

$$c_k = \text{core } A_{ck} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{\max} \mu_{A_{ck}}(x) = 1, \quad \forall x \in X \quad (15)$$

그림 3은 이 개념을 나타낸다.

그리고 식 (10)을 고려해 보면 m 은 입력공간의 차원이다. 이 규칙의 연속된 형태 때문에 Cartesian 곱의 공간 $Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_m \subset M^m$ 으로 정해지는 다차원 퍼지분할은 전체부 변수 각각에 대한 M 개의 1차원 분할들로 분해할 수 있다.

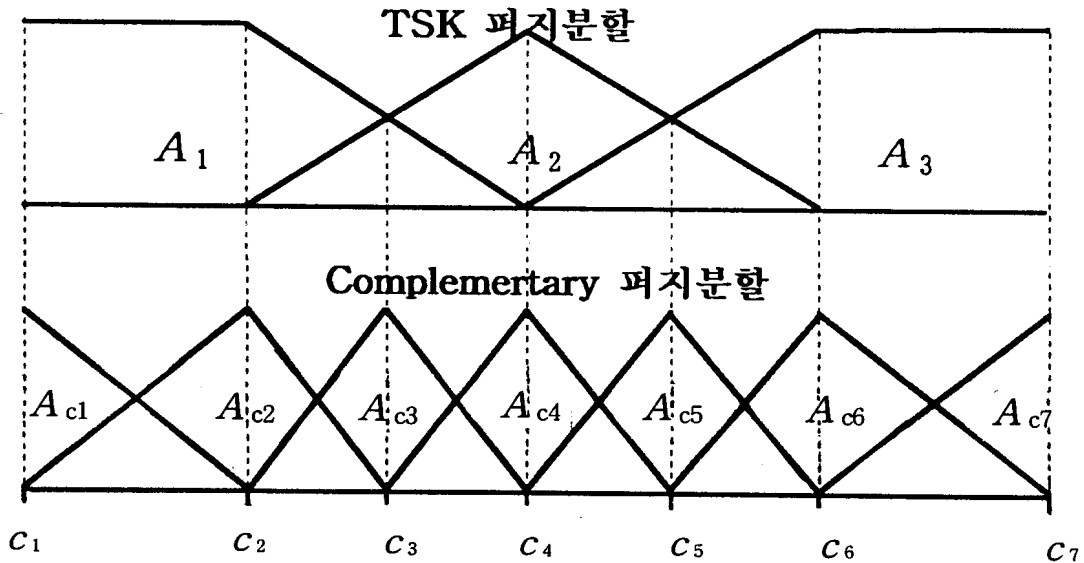


그림 3. Complementary 퍼지분할

3. 시뮬레이션

(a) singleton 퍼지모델

정확한 수학적 표현이 어려운 비선형 시스템의 거동을 숙련가의 능숙한 제어 경험과 지식에 근거하여 <표 1>과 같은 정성적인 언어로 표현되는 규칙들로 구성되는 결론부가 singleton(실수)인 퍼지모델을 가정하였다.

<표 1>에서 음영 처리된 부분의 규칙을 예로 들면 다음과 같다.

if $u(k)$ is NB and $y(k)$ is NE then $y(k+1)$ is -11

이 singleton 퍼지모델 규칙들의 전제부 변수 $u(k)$, $y(k)$ 에 대한 퍼지집합은 그림 4와 같다.

<표 1> singleton 퍼지모델의 규칙

| $u(k)$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|--------|----|-------|-----|----|----|
| $y(k)$ | | | | | |
| NE | | -10.7 | -10 | -8 | -2 |
| ZE | -1 | -0.7 | 0 | 2 | 8 |
| PO | 7 | 7.3 | 10 | 14 | 20 |

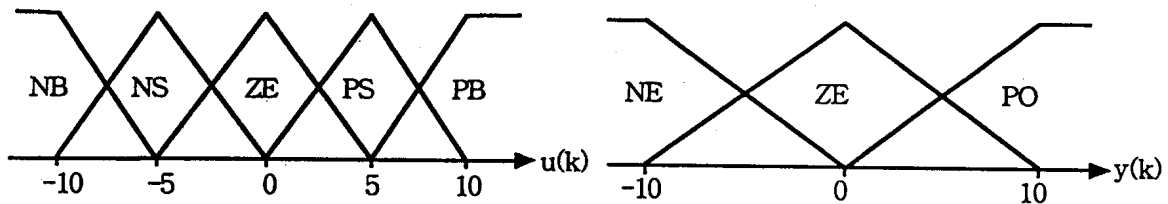


그림 4. $u(k)$, $y(k)$ 에 대한 퍼지집합

(b) TSK 퍼지모델

singleton 퍼지모델로부터 400개의 입출력 데이터를 만들어 TSK 퍼지모델의 인식용 데이터로 사용하였다. 인식된 TSK 퍼지모델은 식(16)과 같으며, 퍼지집합 $F_1 \sim F_3$ 는 그림 5와 같다.

그림 6은 singleton 퍼지모델과 TSK 퍼지모델의 출력을 비교한 것으로 거의 근사하며 비선형적임을 보인다.

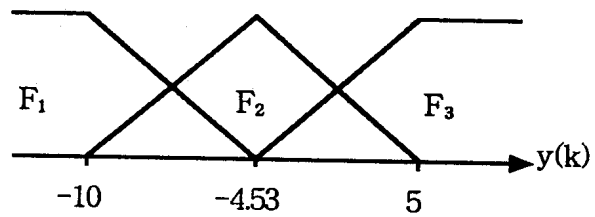


그림 5. TSK 퍼지모델의 퍼지집합

$$\begin{aligned}
 &\text{if } y(k) \text{ is } F_1 \text{ then } y^1(k+1) = 7.821 + 0.933y(k) + 0.898u(k) \\
 &\text{if } y(k) \text{ is } F_1 \text{ then } y^2(k+1) = 3.328 + 0.980y(k) + 0.906u(k) \\
 &\text{if } y(k) \text{ is } F_1 \text{ then } y^3(k+1) = -3.404 + 1.192y(k) + 1.101u(k)
 \end{aligned} \tag{16}$$

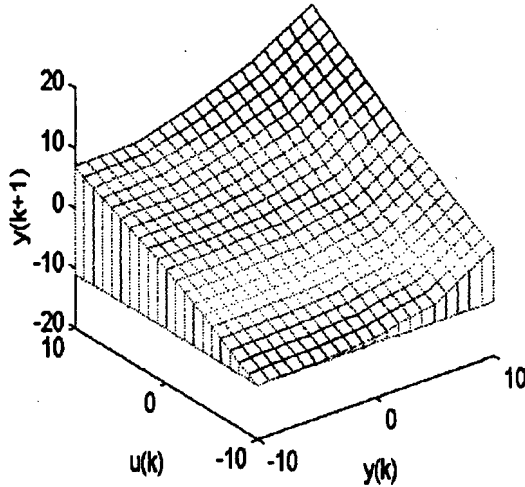
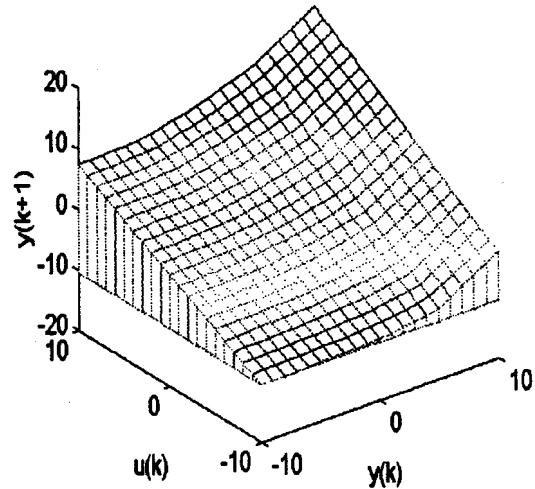


그림 6 (a) singleton 퍼지모델 출력



(b) TSK 퍼지모델 출력

(c) TSK 퍼지제어기

폐루프 시스템의 pole을 0.9로 하여 TSK 퍼지모델로부터 퍼지제어기를 설계하였다. 이 때 시정수는 약 9.49sec, overshoot는 0% 였다. TSK 퍼지제어기의 전제부는 TSK 퍼지모델의 전제부와 동일하며 그림 5와 같고, 제어기의 규칙은 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{if } y(k) \text{ is } F_1 \text{ then } u^1(k) = \frac{-7.821}{0.898} + \frac{(0.9-0.933)y(k)}{0.898} \\
 &\text{if } y(k) \text{ is } F_2 \text{ then } u^2(k) = \frac{-3.328}{0.906} + \frac{(0.9-0.980)y(k)}{0.906} \\
 &\text{if } y(k) \text{ is } F_3 \text{ then } u^3(k) = \frac{3.404}{1.101} + \frac{(0.9-1.192)y(k)}{1.101}
 \end{aligned} \tag{17}$$

(d) singleton 퍼지제어기

TSK 퍼지제어기의 입력공간을 complementary 퍼지분할하여 이 분할된 입력공간으로

새로운 규칙들의 전제부 구조를 그림 7과 같이 만들고 TSK 퍼지제어기를 이용하여 식 (18)과 같은 규칙들로 구성되는 singleton 퍼지제어기를 설계하였다.

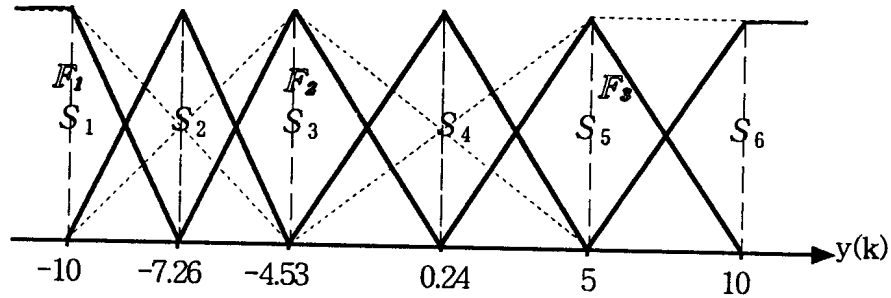


그림 7. singleton 퍼지제어기의 전제부 구조

$$\begin{aligned}
 \text{if } y(k) \text{ is } S_1 \text{ then } u^1(k) \text{ is } -8.34 \\
 \text{if } y(k) \text{ is } S_2 \text{ then } u^2(k) \text{ is } -5.92 \\
 \text{if } y(k) \text{ is } S_3 \text{ then } u^3(k) \text{ is } -3.27 \\
 \text{if } y(k) \text{ is } S_4 \text{ then } u^4(k) \text{ is } -0.003 \\
 \text{if } y(k) \text{ is } S_5 \text{ then } u^5(k) \text{ is } 1.97 \\
 \text{if } y(k) \text{ is } S_6 \text{ then } u^6(k) \text{ is } 0.44
 \end{aligned} \tag{18}$$

그림 8. TSK 퍼지제어기를 사용한 제어 결과

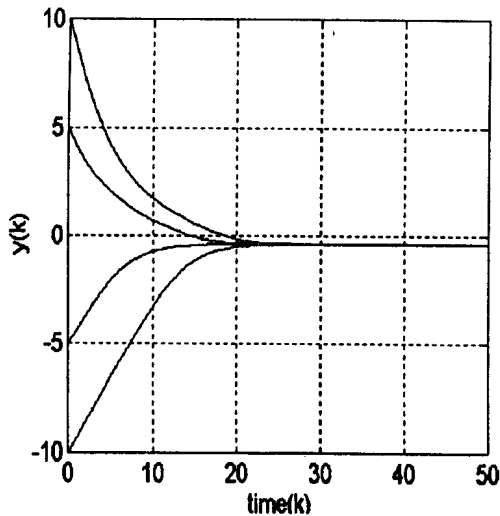


그림 9. singleton 퍼지제어기를 사용한 제어 결과

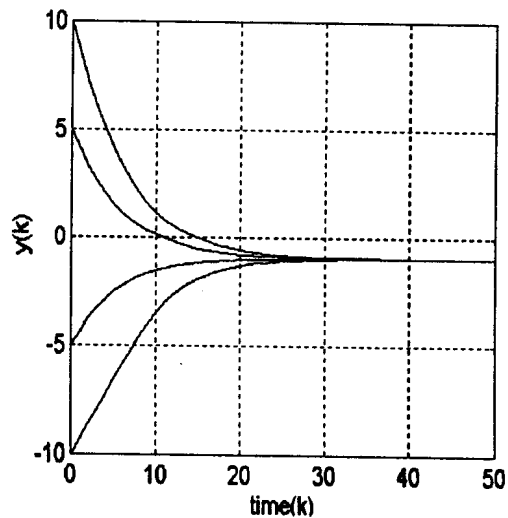


그림 8, 9는 각각 TSK 퍼지제어기와 singleton 퍼지제어기를 사용한 제어 결과를 나타내는 것으로 약간의 정상오차가 있음을 알 수 있다. 따라서 이 정상오차를 없애기 위해 singleton 퍼지제어기 전제부 구조를 시스템의 전체 거동에 영향을 미치지 않으면서 국부적으로 수정하고 이에 따른 규칙들을 조정하여 그림 10과 같은 전제부 구조를 갖고 singleton 퍼지제어기의 4번째 규칙이 식 (19)와 같이 수정된 singleton 퍼지제어기를 설계하였다.

이 수정된 singleton 퍼지제어기에 의한 제어결과는 그림 11과 같다.

$$\text{if } y(k) \text{ is } S_4' \text{ then } u^4(k) \text{ is } 0 \quad (19)$$

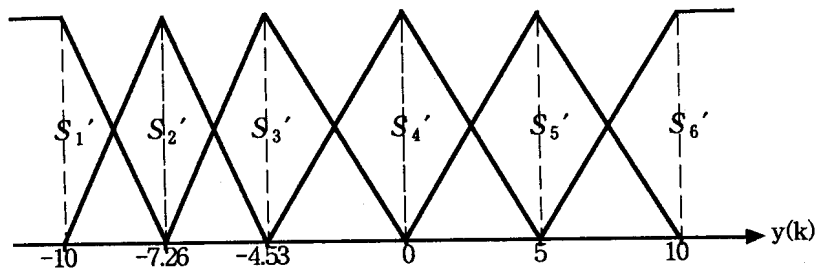


그림 10. 수정된 singleton 퍼지제어기의 전제부 구조

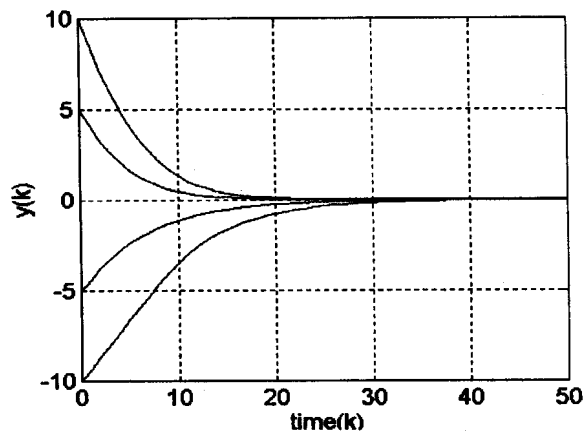


그림 11. 수정한 singleton 퍼지제어기를 사용한 제어결과

4. 결론

본 논문에서는 시스템의 거동을 나타내는 정확한 수식모델을 얻을 수 없거나 기존의 제어 이론으로 제어기 설계가 어려운 비선형시스템을 숙련가의 경험과 지식에 근거하여 singleton 결론부를 갖는 퍼지모델로 표현할 수 있을 때 TSK 퍼지시스템을 이용하여 설계 되는 singleton 결론부를 갖는 퍼지제어기의 형태와 설계 방법을 제안하였다.

TSK 퍼지제어기는 극점배치법을 이용하여 원하는 정확도를 가지고 또한 페루프 시스템의 안정성을 보장하는 제어기를 체계적으로 설계할 수 있는 반면 제어기의 이해가 어렵고 설계 후 조정이 어려운 특성을 가지고 있다. 그러나 singleton 퍼지제어기는 퍼지모델로부터 직접 설계하는 것이 어려우나 제어기 설계 후 그 규칙들의 언어적 특성 때문에 직관적으로 이해할 수 있으며, 원하는 제어결과를 얻기 위해 제어기 규칙을 전체 시스템의 거동에 영향을 미치지 않고 손쉽게 조정할 수 있는 특성이 있음을 시뮬레이션을 통하여 보였다.

참 고 문 헌

- [1] R.Babuska and H.B.Verbruggen, "A New Identification Method for Linguistic Fuzzy Models," Proc. of Int. Joint Conf. of 4th FUZZ-IEEE and 2nd IFES, 905/912, Yokohama, 1995
- [2] J.Buckley, "Sugeno type controllers are universal controller", Fuzzy Sets and Systems, vol.53, pp.199-303, 1993
- [3] D.Driankov, R.Palm, and U.Rehfuess "A Takagi-Sugeno Fuzzy Gain-Scheduler", in Proc. IEEE International Conference on Fuzzy System, vol. 2, pp. 1053-1059, 1996.
- [4] T.Ishikawa, "A Study on Fuzzy Control of an Arm Robot," B.E. Thesis supervised by M.Sugeno, Dept. of Control Engineering, Tokyo Institute of Technology, 1988.
- [5] G. Kang , "Fuzzy Modelling of systems and Design of Fuzzy Controllers" ph.D. Thesis, Tokyo Institute of Technology , 1987
- [6] G.Kang and W.Lee, "Design of Fuzzy State Controllers and Observers", in Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.1355-1360, 1995
- [7] M. Kim and G. Kang, "Design of Fuzzy Controller Based on Fuzzy Model for Container crane System", in Proc. International Fuzzy Systems Association World Congress, pp.1250-1253, 1993

- [8] K. Kiriakidis and A.Tzes, "Application of Implicit Self-Tuning Fuzzy control to Nolinear Systems", in Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.1419-1426, 1995
- [9] M. Maeda and S.Murakami, "An Automobile Tracking Control with Fuzzy Logic," Proc. of 3rd Fuzzy System Symposium, 61/66, 1987 (in Japanese)
- [10] M.Sugeno and G.Kang, "Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator", Fuzzy Sets and Systems, vol.18, pp.329-346, 1986
- [11] M.Sugeno and G.Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model", Fuzzy Sets and Systems, vol. 28, pp.15-33, 1988
- [12] M.Sugeno et al, "Intelligent Control of an Unmanned Helicopter Based on Fuzzy Logic, "Proc. of Americal Helicopter Society 51st Annual Forum 791/803, Texas, 1995.
- [13] H. Takeda and T.Ishikawa, "Adaptive Fuzzy Control for Catch-ball System," Proc. of 4th Fuzzy System Symposium, 77/82,1988 (in Japanese).
- [14] H.O.Wang, K.Tanaka, and M.F.Griffin, "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues", IEEE Trans.. on Fuzzy System, vol. 4, pp.14-23, Feb. 1996