

## 성능개선을 위한 룩업테이블 하이브리드 퍼지제어 시스템

### Hybrid Fuzzy Control Systems with Look-Up Table for Good Performance

이평가\*

Pyeong-Gi Lee\*,

#### 〈Abstract〉

I propose a hybrid fuzzy controller with a look-up table to improve the performance of the FARMA(Fuzzy Auto-regressive Moving Average) fuzzy controller. The hybrid structure of the proposed method is composed of a fuzzy controller with a look-up table of the PD type and the FARMA fuzzy controller. The proposed method improves poor performance due to the lack of I/O data to calculate predictive output and shows robust performance over the FARMA fuzzy controller when an incorrect Dmax value is selected by trial and error. I executed some computer simulations on the regulation problem of an inverted pendulum system and compared the results with those of the FARMA fuzzy controller.

#### *Keywords :*

*Look-upTable, FARMA(Fuzzy Auto-regressive Moving Average) Controller, Hybrid Fuzzy Controller*

---

\* 정회원 : 위덕대학교 에너지전기공학부 교수, 공학박사  
경북대학교 대학원 졸업

\* Professor Dept. of School of energy and Electrical  
Engineering Uiduk University, E-mail : pglee@uu.ac.kr

## 1. 서론

고전적 제어기의 설계방식에서는 플랜트의 수학적 모델링이 매우 중요한 역할을 하게 된다. 그러나 복잡한 프로세스에서는 수학적 모델링이 어렵고 모델을 구하더라도 외란이 있는 경우 적절한 제어기 설계가 용이하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 인간의 결정과정을 모방한 재이론을 시스템에 도입하는 방법이 다양하게 연구되었는데 그 방법중 하나가 1965년 Zadeh에 의해 제안된 퍼지 집합 이론이다<sup>1)</sup>. 퍼지집합 이론에 관한 응용은 1974년 영국의 Mamdani에 의한 스팀 엔진제어 연구의 성공으로 그 실용 가능성이 인정되어 퍼지제어 이론이 발전하는 계기가 되었다<sup>2)</sup>. 자기구성 퍼지시스템은 Procky와 Mamdani에 의해 처음 제시된 것으로 숙련자의 경험이나 사전지식으로부터 퍼지규칙을 생성하기 어려울 때 실제 수행 중에 얻어진 정보들을 토대로 미리 설정된 제어 성능을 관측해 가면서 퍼지제어기가 스스로 규칙을 구성해가는 방법이다<sup>3-5)</sup>.

1992년에 Ramaswamy는 규칙들이 퍼지입력 변수들의 함수형태로 파라미터화 한 후 파라미터들을 오프라인으로 자동동조(Automatic Tuning) 하는 방법을 사용하여 nuclear reactor에 적용하였다<sup>6)</sup>. Jang은 퍼지 추론시스템을 신경회로망으로 구성한 다음 back-propagation 형태의 gradient descent 방법에 의해서 스스로 학습하는 기능을 부여하였다<sup>7)</sup>. Karr등은 유전알고리즘을 이용하여 고성능의 퍼지제어기를 얻는 방법을 제안하고 pH 제어에 적용하였다<sup>8)</sup>. 이러한 방법들은 자기학습의 기능을 가진다는 의미에서 자기구성제어기에 많이 근접한 개념이었다. Park등은 자기구성 퍼지제어기의 설계방법으로 Fuzzy Auto-Regressive Moving Average(FARMA) Model 퍼지제어기를 제안하였는데 이러한 FARMA 형태 퍼지제어기의 특징은 첫째, 전문가의 지식이나 플랜트의 모델이 없이, 온-라인으로 플랜트를 제어하면서 singleton

으로 주어지는 플랜트의 입출력 정보로부터 퍼지 제어규칙을 생성해 나가고, 둘째, 비퍼지화 과정에서 출력값의 예측기능을 가지도록 하여 좀 더 효율적인 제어가 가능하도록 하였으며, 셋째, 매 샘플링 순간마다 자기구성과정을 통하여 규칙 베이스를 갱신함으로써 시간이 지날수록 더 좋은 성능을 가지는 제어기가 되도록 하였다는 점을 들 수 있다<sup>9)</sup>. 이러한 장점에도 불구하고 FARMA 모델을 이용하는 자기구성 퍼지제어기의 가장 큰 문제점은 초기상태에서는 플랜트를 적절하게 제어하는 제어 규칙 정보의 부재로 말미암아 특별한 초기조건 이외에는 제어하기가 쉽지 않다. 또한 초기에 생성되는 제어규칙 역시 적절한 것이 아니기 때문에 유사도 함수의 Dmax 값에 따라 출력성능이 매우 불안정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 예측출력 값을 구하기 어려운 초기단계에서는 PD 형태의 룩업테이블로부터 적절한 제어입력을 산출하는 제어기로서 시스템을 구동시키고 그 이후 신뢰할 만한 제어규칙이 구성될 때 까지 변조함수를 이용하여 시스템의 응답특성을 개선시키는 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기를 제안하고자 한다.

## 2. 성능개선을 위한 룩업 테이블 하이브리드 퍼지 제어 시스템

### 2.1 2.1 제안한 방법의 시스템 구조

초기 응답특성을 개선하고 예측 출력 값이 구해질 때 까지 만족스러운 성능을 나타내도록 PD 형태의 룩업테이블로부터 적절한 제어입력을 산출하는 제어기로서 시스템이 구동되고, FARMA 제어기의 규칙이 생성될 수 있는 최소한의 데이터가 확보된 뒤에는 점차적으로 FARMA제어기가 시스템을 제어하며 규칙을 계속 생성해가는 하이브리드 구조의 전체 구성도는 다음 그림과 같으며 변조함수는 두 퍼지제어기 사이에서 부드러운 천이를 하도록 하기 위해

서 사용된다.

제안한 룩업테이블 하이브리드 퍼지 제어 시스템에서 플랜트에 인가되는 제어입력은 상위계층의 룩업테이블에서 구해진 U1과 FARMA제어기에서 산출된 U2값의 조합으로 구성되며 조합의 비를 조정하는 요소로 변조함수가 사용된다. 여기서 yref 는 출력 값이 따라 가야할 목표 값이며 e와 ce는 목표 값과의 오차와 오차변화량을 각각 나타낸다.

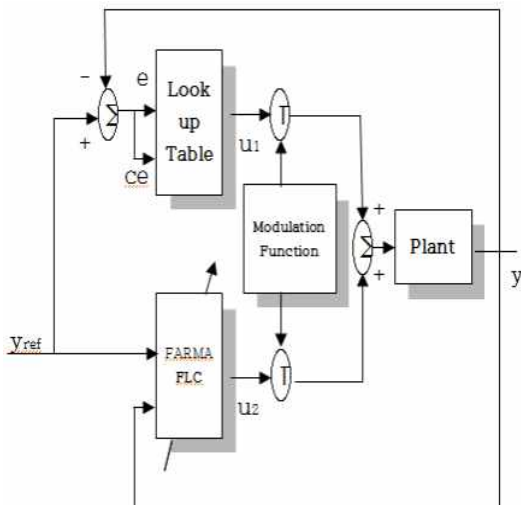


Fig. 1. The diagram of overall system by the proposed method.

### 3. 하이브리드 퍼지 제어기

#### 3.1 상위계층 룩업 테이블

FARMA 모델을 이용하는 자기구성 퍼지제어기의 가장 큰 문제점은 초기상태에서는 플랜트를 적절하게 제어하는 제어규칙 정보의 부재로 말미암아 특별한 초기조건 이외에는 제어하기가 쉽지 않다. 따라서 적절한 제어규칙이 구성되기 전까지

제어량을 산출하는 PD 형태 룩업 테이블을 이용하여 초기 제어량을 산출한다. 룩업테이블의 제어량은 출력값의 목표치와의 오차(e)와 오차변화량(ce) 값을 스캘링 계수에 의해 조정해서 결정되는 양자화된 값으로 산출된다.

Table 1. Look-up table

e \ ce	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	0	1	1	2	2	3	3	4	4
-3	-1	0	1	1	2	2	3	3	4
-2	-1	-1	0	1	1	2	2	3	3
-1	-2	-1	-1	0	1	1	2	2	3
0	-2	-2	-1	-1	0	1	1	2	2
1	-3	-2	-2	-1	-1	0	1	1	2
2	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	1	1
3	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	1
4	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0

### 3.2. FARMA 퍼지제어기

#### 3.2.1 규칙베이스 구성

일반적인 단입출력(SISO) 이산시간 시스템은 다음과 같은 비선형함수의 형태로 표현된다.

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, u(k), u(k-1), \dots) \quad (1)$$

이러한 식으로부터 다음 단계에서 y\_ref의 출력을 얻기 위한 u(k)의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$u(k) = g(y_{ref}, y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots) \quad (2)$$

식 (2)와 같은 입력관계로서 규칙을 구성하면 ARMA 모델과 그 형태가 비슷하게 되므로

Fuzzy ARMA(FARMA) 규칙이라고 한다. 이러한 FARMA 제어기는 매 단계마다 샘플링한 플랜트의 실제 입출력정보로부터 규칙을 생성하여 규칙 베이스에 저장한다.

$R_i$  : IF  $y_{ref}$  is  $A_{1i}$ ,  $y(k)$  is  $A_{2i}$ ,  $\dots$ ,  $y(k-n+1)$  is  $A_{(n+1)i}$ , AND  $u(k-1)$  is  $B_{1i}$ ,  $u(k-2)$  is  $B_{2i}$ ,  $\dots$ ,  $u(k-m)$  is  $B_m$  THEN  $u(k)$  is  $C_i$  (3)

3.2.2 퍼지화(Fuzzification)

시스템의 실제 입출력정보로 부터 규칙베이스에 저장될 퍼지레이블들을 만드는 퍼지화방법은 다음 그림과 같이 적절히 가정된 universe of discourse상에서 샘플링된 실제 입출력 데이터를 소속함수값이 최대가 되도록 하는 삼각형 퍼지 레이블형태로 퍼지화한다.

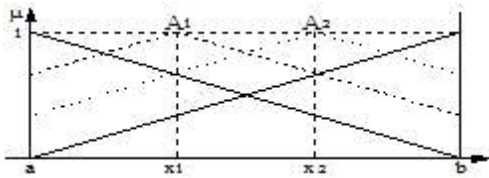


Fig. 2. Fuzzification method.

3.2.3 추론방법

fuzzy singleton이 입력으로 들어올 경우  $i$ 번째 규칙의 후건부에 영향을 미치는 가중치  $\omega_i$ 는 다음과 같다.

$$\omega_i = \min \left[ (A_{1i} \wedge x_1), (A_{2i} \wedge x_2), \dots, (A_{(n+1)i} \wedge x_{(n+1)}) \right] \quad (4)$$

여기서  $\omega_i$ 는  $i$ 번째 규칙에서 구해지는 가중치(Compatibility; Truth Value),  $x_j$ 는 입력,  $\wedge$ 는 AND 연산을 나타낸다. 입력변수의 개수가

많아질수록 플랜트에 나쁜 영향을 미치는 추론 결과를 도출할 수 있으므로 Euclidean distance를 이용하여  $\omega_i$ 를 계산한다.

$$D_i = \sqrt{(x_{1i} - x_1)^2 + \dots + (x_{(n+m+1)i} - x_{(n+m+1)})^2} \quad (5)$$

여기서  $x_1, x_2$ 는 실제 입출력 값들이고,  $x_{1i}, x_{2i}, \dots$ , 등은  $i$ 번째 규칙의 퍼지레이블들을 나타낸다. 유사도 함수(Similarity Function)를 이용하여 각 규칙의 Euclidean distance값( $D_i$ )에 대응되는 적절한  $\omega_i$ 를 구한다. 유사도 함수에서 계산된  $\omega_i$ 와  $i$ 번째 규칙의 후건부 퍼지집합과의  $\phi$ 연산으로  $i$ 번째 규칙에서의 제어입력 퍼지집합( $\hat{C}_i$ )을 추론한다.

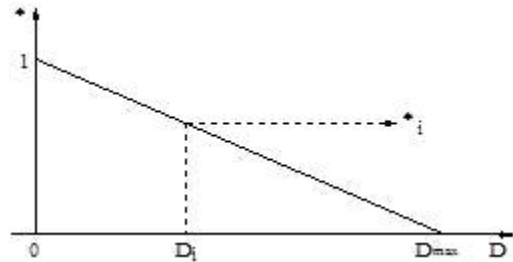


Fig. 3. Similarity Function.

$$\hat{C}_i = \omega_i \phi C_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \omega_i \leq \mu_{C_i} \\ \mu_{C_i} & \text{if } \omega_i > \mu_{C_i} \end{cases} \quad (6)$$

각각의 규칙에서 추론된 퍼지집합들( $\hat{C}_i$ )에 MIN연산을 취하여 최종 제어입력 퍼지집합(Net Control Action)을 구한다. 한 예로  $i$ 번째 규칙과  $j$ 번째 규칙에서 얻어지는 최종 제어영역(NCR)은 다음그림에서와 같이  $c$ 와  $b$ 의 중복된 구간으로 구해진다.

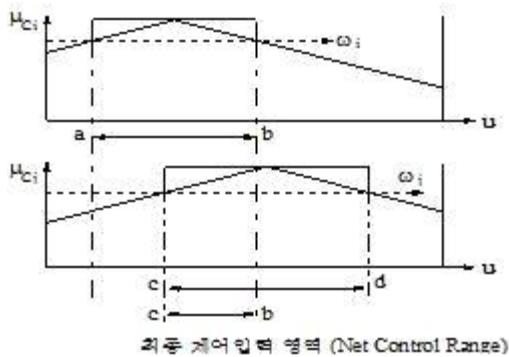


Fig. 4. Net control range.

### 3.2.4 비퍼지화 (Defuzzification)

최종적인 제어입력 퍼지집합으로부터 플랜트에 인가할 물리적인 제어입력량을 구하기 위해 비퍼지화 과정이 필요하다. NCR이 형성되는 경우 외삽법을 이용해서 출력의 변화추세로부터 다음 단계에서의 플랜트 출력을 예측하여 현재 단계에서 가해야 할 제어입력의 방향을 설정해주므로 좀 더 신뢰할 수 있는 입력을 가할 수 있다. 그림 5에서 만약 예측출력 값이 따라 가야할 목표 값보다 적을 경우에는 NCR에서 우측  $u(k)$ 가 적용되며 그렇지 않을 경우에는 좌측  $u(k)$ 가 제어량이 된다.

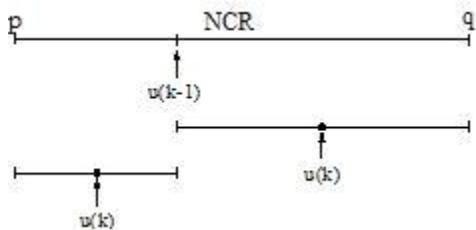


Fig. 5. Defuzzification method.

### 3.2.5 규칙베이스 자기구성과정

규칙 베이스의 자기구성과정은 매 샘플링 단계에서 생성된 규칙이 그 영역에 다른 규칙이 저장

되어 있지 않으면 그 규칙은 규칙 베이스에 저장되고, 만약 같은 영역에 다른 규칙이 이미 저장되어 있으면 일단 현재 생성된 것을 더 나은 규칙이라 가정하여 규칙 베이스에 저장시킨 후에 성능을 다음 식에 의해 평가하여 규칙을 갱신한다.

$$J = [y_r(k+1) - y(k+1)] \quad (7)$$

## 4. 변조함수(Modulation function)

제어입력은 룩업테이블과 FARMA FLC에서 각각 추론되어 나오는  $u_1, u_2$ 값의 조합이며 조합의 비를 조정하는 요소로서 변조함수가 사용된다.

$$u(k) = m(k) * u_1(k) + (1 - m(k)) * u_2(k) \quad (8)$$

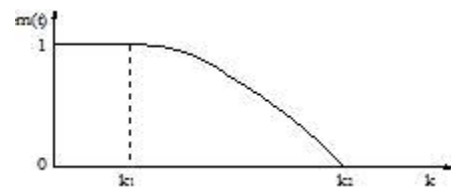


Fig. 6. Modulation function.

## 5. 제어 알고리즘

제안한 룩업 테이블 하이브리드 구조의 제어 알고리즘을 단계별로 요약하면 다음과 같다.

- 단계 1 : 신뢰할만한 규칙이 구성되기 전 상태에서 따라가야 할 목표값과 초기 값을 부여하고 정량화된 오차와 오차변화량에 대한 제어량인 룩업 테이블을 구성한다.

- 단계 2 : 변조함수의 k1시점까지 PD형태인 룩 업테이블로부터 오차와 오차변화량에 따른 제어입력을 구한 후 플랜트에 인가한다.
- 단계 3 : 예측출력값이 구해지는 시점에서 FARMA 규칙을 생성하고 룩업 테이블과 FARMA 제어기에서 각각 얻어지는 제어량을 산출한 후 변조함수의 조합에 의해 제어입력을 구하여 플랜트에 인가한다.
- 단계 4 : 플랜트의 출력값이 허용할 수 있는 오차범위내에 들어오면 끝내고 그렇지 않으면 단계 3을 반복한다.

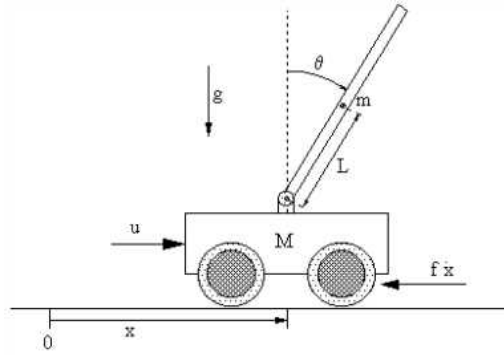


Fig. 7. Inverted pendulum system.

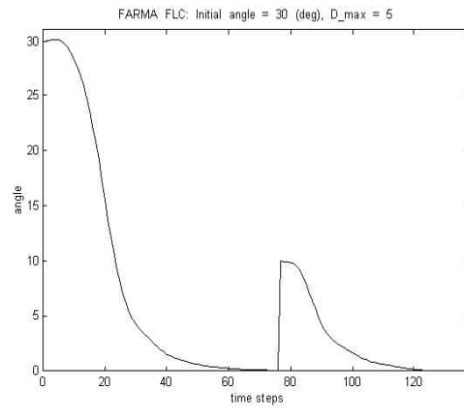
### 6. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해서 다음과 같은 도립진자(Inverted pendulum) 시스템에 제안한 방법과 FARMA 제어기의 성능을 비교, 검토해보기로 한다.

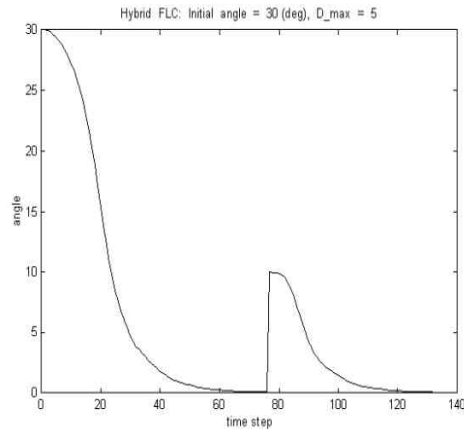
$$\ddot{x} = \frac{1}{(M/m) + \sin^2\theta} \left( \frac{u}{m} + \dot{\theta}^2 L \sin\theta - g \sin\theta \cos\theta \right)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{L(M/m) + \sin^2\theta} \left( -\frac{u}{m} \cos\theta - \dot{\theta}^2 L \cos\theta \sin\theta + \frac{m+M}{m} g \sin\theta \right) \quad (9)$$

여기서 m, M, L은 각각 진자의 질량, 수레의 질량, 진자의 무게중심까지의 길이를 나타낸다. 먼저 L=1m, M=1kg, m=0.1kg, g=9.8m/s<sup>2</sup>, 초기 각도 30도, 수렴후 10도의 외란을 인가하여 컴퓨터 모의실험을 통해 Dmax=5인 경우



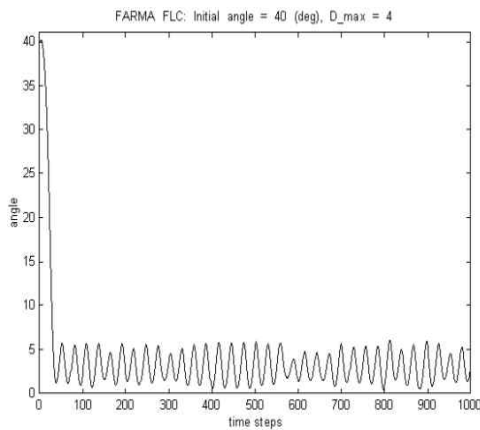
(a) Angle response by the FARMA method



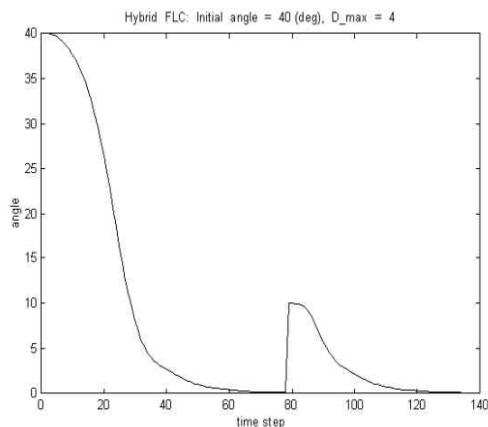
(b) Angle response by the proposed method.  
Fig. 8. Comparison of the angle responses.

Table. 2 Comparison of output responses. (initial angle 30 degree, D\_max=5)

	초기각 수렴성			외란 후 수렴성	
	수렴 시점	생성 규칙 수	오차 합	수렴시점	생성 규칙 수
FARMA FLC	76 steps	30	637.34	122 steps	49
제안한 제어기	74 steps	28	604.06	122 steps	44



(a) Angle response by the FARMA method.



(b) Angle response by the proposed method.  
Fig. 9. Comparison of the angle responses.

FARMA 제어기에 의한 성능과 제안한 방법을 비교해 보면 각도응답의 수렴성에서는 거의

차이가 없으나 초기 단계에서의 응답은 제안한 방법이 다소 개선됨을 알 수 있었다.

결과를 분석해 보면 FARMA제어기는 적합하지 않는 Dmax 값인 4인 경우에 도립진자의 초기각 40도에 대해 목표 값에 수렴하지 못함을 알 수 있고 반면에 제안한 방법인 룩업테이블 하이브리드 퍼지 제어기는 목표 값에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 도립진자 시스템에서 컴퓨터 모사한 결과 제안한 방법이 FARMA 퍼지 제어기에 비해 응답특성이 개선되며 좀 더 견실한 제어가 됨을 알 수 있다.

Table. 3 Comparison of the output responses. (initial angle 40 degree, D\_max=4)

	초기각 수렴성			외란 후 수렴성	
	수렴 시점	생성 규칙 수	오차 합	수렴시점	생성 규칙 수
FARMA FLC	수렴 못함	62	3879.7	-	-
제안한 제어기	64 steps	24	942.49	130 steps	41

## 7. 결론

FARMA 자기구성 퍼지제어기는 플랜트의 예측출력 값을 계산하여 임시목표 값과의 비교를 통하여 최종적으로 제어입력을 구하는데 초기에는 예측출력 값을 구하기 위한 최소한의 데이터가 확보되지 않으므로 적절한 제어입력을 추론해 낼 수가 없다. 본 논문에서는 예측출력 값을 구하기 어려운 초기단계에서는 출력 값과 목표치와의 오차와 오차변화량에 따라 스킴링 계수로 양자화된 제어량 산출을 위한 PD형태의 룩업 테이블로서 시스템을 구동시키고 신뢰할만

한 제어규칙이 구성될 때 까지 룩업 테이블 제어기와 FARMA 퍼지제어기 사이의 적용강도를 조정하는 변조함수를 이용하여 시스템의 응답특성을 개선시키는 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기를 제안한다. 또한 신뢰할 만한 예측 출력 값이 구해해지 전 상태에서는 제어량 추론에 있어 중요한 영향을 미치는 유사도 함수의  $D_{max}$  값을 시행착오적으로 최적의 값을 찾는 것은 쉽지 않으며 잘못된  $D_{max}$  값은 컴퓨터 모의실험의 결과에서와 같이 시스템 성능을 매우 나쁘게 할 수 있는데 제안한 방법은 이러한 부분을 보완하는 좀 더 견실한 성능 개선이 있는 제어를 제안하였다.

## 참고문헌

- [1] Zadeh L. A. : Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 3, pp. 28-44, (1973)
- [2] King P. J. and Mamdani E. H. : The Application of Fuzzy Control System to Industrial Process, Automatica, vol. 13, pp. 235-242, (1977)
- [3] Procyk T. J. and Mamdani E. H. : A Liguistic Self-Organizing Process Controller. Automatica, vol. 15, pp. 15-30, (1979)
- [4] Tanscheit R. and Scharf E. M. : Experiments with the Use of a Rule-Based Self-Organizing Controller for Robotics Applications, Fuzzy Sets and System, vol. 26, pp. 195-214, (1988)
- [5] Shao S. : Fuzzy Self Organizing Controller and Its Application for Dynamic Processes, Fuzzy Sets and System, vol. 26, pp. 151-164, (1988)
- [6] Ramaswamy P., Edwards R. M., and Lee K. Y.: An Automatic Tuning Method of a Fuzzy Logic Controller for Nuclear Reactors, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 40, no. 4, pp. 1253-1262, August (1993)
- [7] Jang J. S. : Self-Learning Fuzzy Controllers Based on Temporal Back Propagation, IEEE Transationc on Neural Networks, vol. 3, no. 5, pp. 714-723, (1992)
- [8] Karr C. L. and Gentry E. J. : Fuzzy Control of pH Using Genetic Algorithm, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol. SMC-19, no. 4, pp. 745-755, (1989)
- [9] Young-Moon Park, Un-Chul Moon, and Kwang Y. Lee : A Self-Organizing Fuzzy Logic Controller for Dynamic Systems Using a Fuzzy Auto Regressive Moving Average (FARMA) Model, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 3, no. 1, February (1995)