

변조함수를 이용하는 하이브리드 퍼지 논리 제어기 Hybrid Fuzzy Logic Controller using Modulation Function

이 평 기 *

Pyeong-Gi Lee *

<Abstract>

In this paper, a self-organizing fuzzy logic controller with hybrid structure is proposed. The structure of the proposed method is composed of a basic fuzzy logic controller and the FARMA SOC(Fuzzy Autoregressive Moving Average Self-organizing Controller). The self-organizing controller with hybrid structure has advantage over the FARMA controller as follows. The proposed controller improves poor performance due to the lack of I/O data to calculate predictive output. I executed some computer simulations on the regulation problem of an inverted pendulum system and compared the results of the proposed method with those of the FARMA SOC method.

Key words : Fuzzy Autoregressive Moving Average Self-organizing Controller, Hybrid Structure

1. 서론

퍼지 제어이론은 제어에서 필요로 하는 제어 대상 시스템에 대한 정확한 모델링이 없이도 제어가 가능하다는 것이 실제 시스템에서의 성공적인 적용에 의해 입증되었다. Mamdani의 퍼지제어 이론에 바탕을 둔 고전적인 퍼지제어기 설계방법은 제어대상 시스템에 대한 전문가의 경험이나 지식이 필수적으로 요구되며 Rule Base에 대한 지식을 전문가가 제공하지 않으면 효과적인 제어기의 구성을 기대할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전문가의 경험 없이 미지의 플랜트를 스스로 식별하여 적절한 퍼지 제어규칙을 생성시킬 수 있는 자기구성

퍼지제어 이론이 연구되어 왔다. 자기구성 퍼지제어 방법은 시스템 동정과 경험에 바탕을 둔 제어기를 결합하여 사용하는 것으로 제어대상 시스템에 대한 많은 지식을 필요로 하지 않고 최소한의 시스템 운용환경만 알면 적용가능하다¹⁻³⁾. 1992년에 Ramaswamy⁴⁾는 규칙들이 퍼지입력 변수들의 함수형태로 파라미터화 한 후 파라미터들을 오프라인으로 자동동조(Automatic Tuning)하는 방법을 사용하여 nuclear reactor에 적용하였다. Jang⁵⁾은 퍼지 추론시스템을 신경회로망으로 구성한 다음 back-propagation 형태의 gradient descent 방법에 의해서 스스로 학습하는 기능을 부여하였다.

Karr 등⁶⁾은 유전알고리즘을 이용하여 고성능

* 정회원 : 위덕대학교 정보전자공학부, 工博
경북대학교 대학원 졸업

* School of Informatin and Electronic Engineering Uiduk University, E-mail : pglee@mail.uiduk.ac.kr

의 퍼지제어기를 얻는 방법을 제안하고 pH제어에 적용하였다. 이러한 방법들은 자기학습의 기능을 가진다는 의미에서 자기구성제어기에 많이 근접한 개념이었다. Park 등⁷⁾은 자기구성 퍼지제어기의 설계방법으로 FARMA(Fuzzy Auto-Regressive Moving Average) Model 퍼지제어기를 제안하였는데 이러한 FARMA 형태 퍼지제어기의 특징은 첫째, 전문가의 지식이나 플랜트의 모델이 없이, 온-라인으로 플랜트를 제어하면서 singleton으로 주어지는 플랜트의 입출력 정보로부터 퍼지 제어규칙을 생성해 나가고, 둘째, 비퍼지화 과정에서 출력값의 예측기능을 가지도록 하여 좀 더 효율적인 제어가 가능하도록 하였으며, 셋째, 매 sampling step마다 자기구성과정(Self-Organizing Procedure)을 통하여 규칙 베이스를 갱신함으로써 시간이 지날수록 더 좋은 성능을 가지는 제어기가 되도록 하였다는 점을 들 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 FARMA 모델을 이용하는 자기구성 퍼지제어기의 가장 큰 문제점은 초기상태에서는 플랜트를 적절하게 제어하는 제어규칙 정보의 부재로 말미암아 특별한 초기조건 이외에는 제어하기가 쉽지 않다. 또한 FARMA 자기구성 퍼지제어기는 플랜트의 예측출력값을 계산하여 임시목표 값과의 비교를 통하여 최종적으로 제어입력을 구하는데 초기에는 예측출력값을 구하기 위한 최소한의 데이터가 확보되지 않으므로 제어입력을 추론해 낼 수가 없다. 이러한 이유에서 초기에 생성되는 제어규칙 역시 적절한 것이 아니기 때문에 시스템에 따라 출력성능이 매우 불안정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 예측출력 값을 구하기 어려운 초기단계에서는 기본적인 P형태의 퍼지제어기로서 시스템을 구동시키고 신뢰할만한 제어규칙이 구성될 때 까지 기본 퍼지제어기와 FARMA 퍼지제어기 사이의 적용강도를 조정하는 변조함수(Modulation function)를 이용하여 시스템의 응답특성을 개선시키는 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기를 제안하고자 한다.

2. 성능개선을 위한 Hybrid구조의 자기구성 퍼지제어기

2.1 제안한 방법의 시스템 구조

초기 응답특성을 개선하고 예측출력값이 구

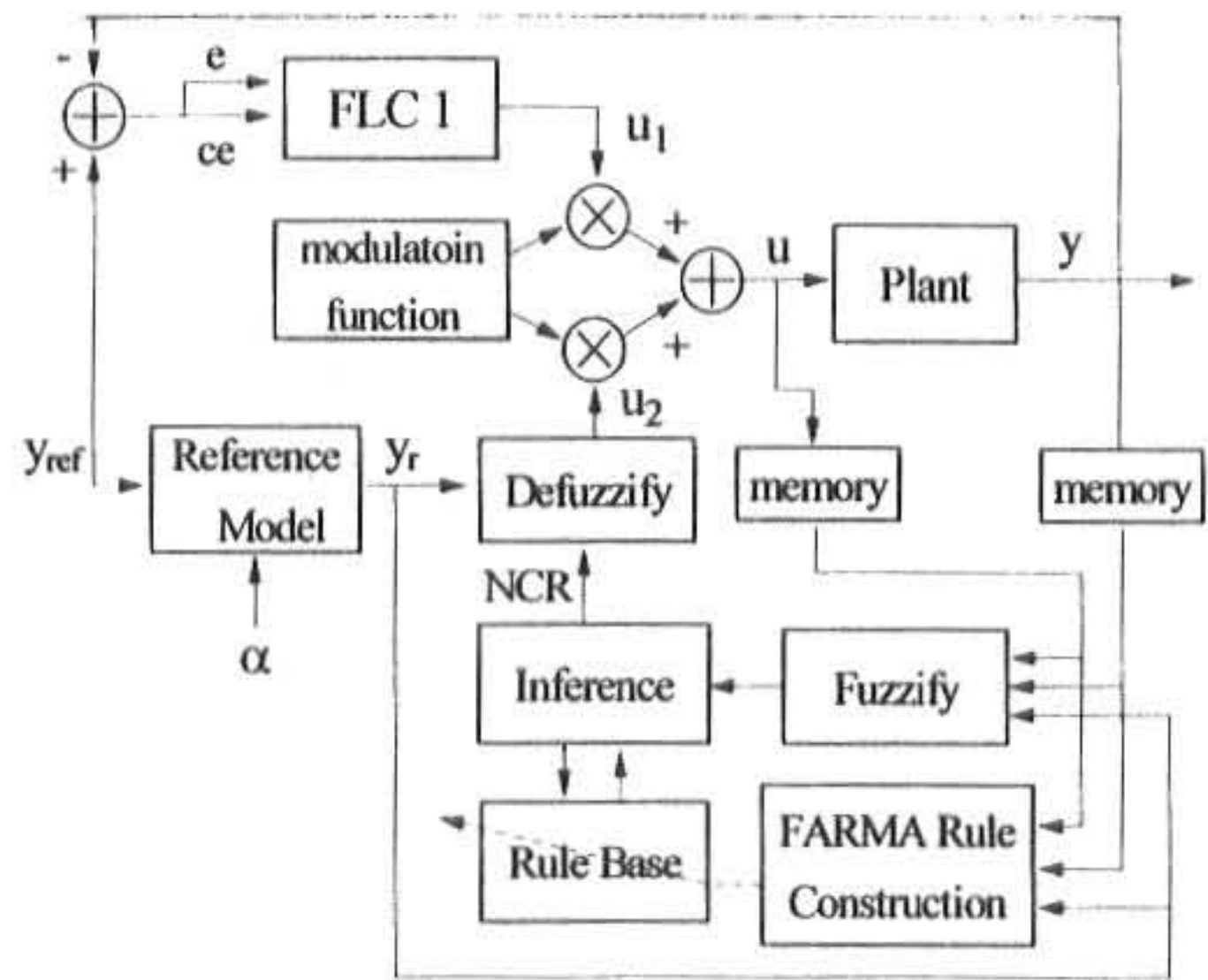


Fig. 1. Overall system by the proposed method

해질 때 까지 P형태의 기본적인 퍼지제어기에 의해서 시스템이 구동되고, FARMA 제어기의 규칙이 생성되고 예측기능을 위한 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 위해서 사용된다.

2.2 FLC1에 사용된 퍼지제어기

FLC1은 간단한 P형태의 퍼지제어기를 사용했으며 사용된 규칙은 목표치와 출력값과의 오차의 크기를 고려하여 설계하는 규칙으로서 그 형태는 다음과 같다.

$$\text{IF } e \text{ is } A_1 \text{ THEN } U_1 \text{ is } B_1 \quad (1)$$

Table 1 Control rules of the p-type fuzzy controller

e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
u	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB

2.3 FARMA 퍼지제어기

2.3.1 규칙베이스 구성

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

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, u(k), u(k-1), \dots) \quad (2)$$

이러한 식으로부터 다음 단계에서 y_{ref} 의 출력을 얻기 위한 $u(k)$ 의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$u(k) = g (y_{ref}, y(k) y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots) \quad (3)$$

식 (2)와 같은 입출력관계로서 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.

$$R_i : \text{IF } y_{ref} \text{ is } A_{1i}, y(k) \text{ is } A_{2i}, \dots, y(k-n+1) \text{ is } A_{(n+1)i}, \text{ AND } u(k-1) \text{ is } B_{1i}, u(k-2) \text{ is } B_{2i}, \dots, u(k-m) \text{ is } B_m \text{ THEN } u(k) \text{ is } C_i. \quad (4)$$

2.3.2 퍼지화(Fuzzification)

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

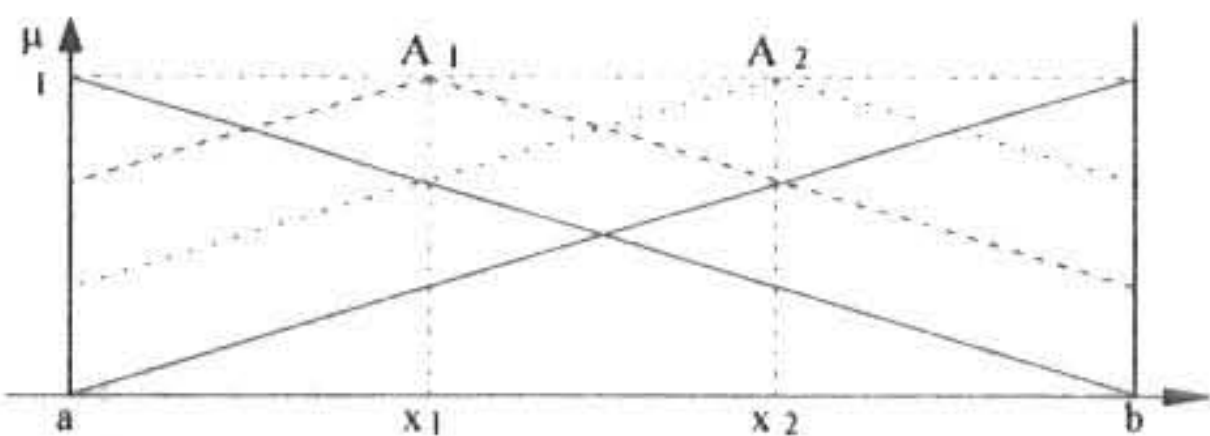


Fig. 2 Fuzzification method

2.3.3 추론방법

fuzzy singleton이 입력으로 들어올 경우 i번째 규칙의 후건부에 영향을 미치는 가중치 ω_i는 다음과 같다.

$$\omega_i = \min [(A_{1i} \wedge x_1), (A_{2i} \wedge x_2), \dots, \dots, (A_{(n+1)i} \wedge x_{(n+1)})] \quad (5)$$

여기서 ω_i는 i번째 규칙에서 구해지는 가중치 (Compatibility; Truth Value), x_j는 입력, ∧는 AND 연산을 나타낸다. 입력변수의 개수가 많아질수록 플랜트에 나쁜 영향을 미치는 추론결과를 도출할 수 있으므로 Euclidean distance를 이용하여 ω_i를 계산한다.

$$D_i = \sqrt{(x_{1i} - x_1)^2 + \dots + (x_{(n+m+1)i} - x_{(n+m+1)})^2}, \quad (\text{for } i\text{th rule}) \quad (6)$$

여기서 x₁, x₂는 실제 입·출력 값들이고, x_{1i}, x_{2i}, ... , 등은 i번째 규칙의 퍼지레이블들을 나타낸다. 유사도 함수(Similarity Function)를 이용하여 각 규칙의 Euclidean distance값(D_i)에 대응되는 적절한 ω_i를 구한다.

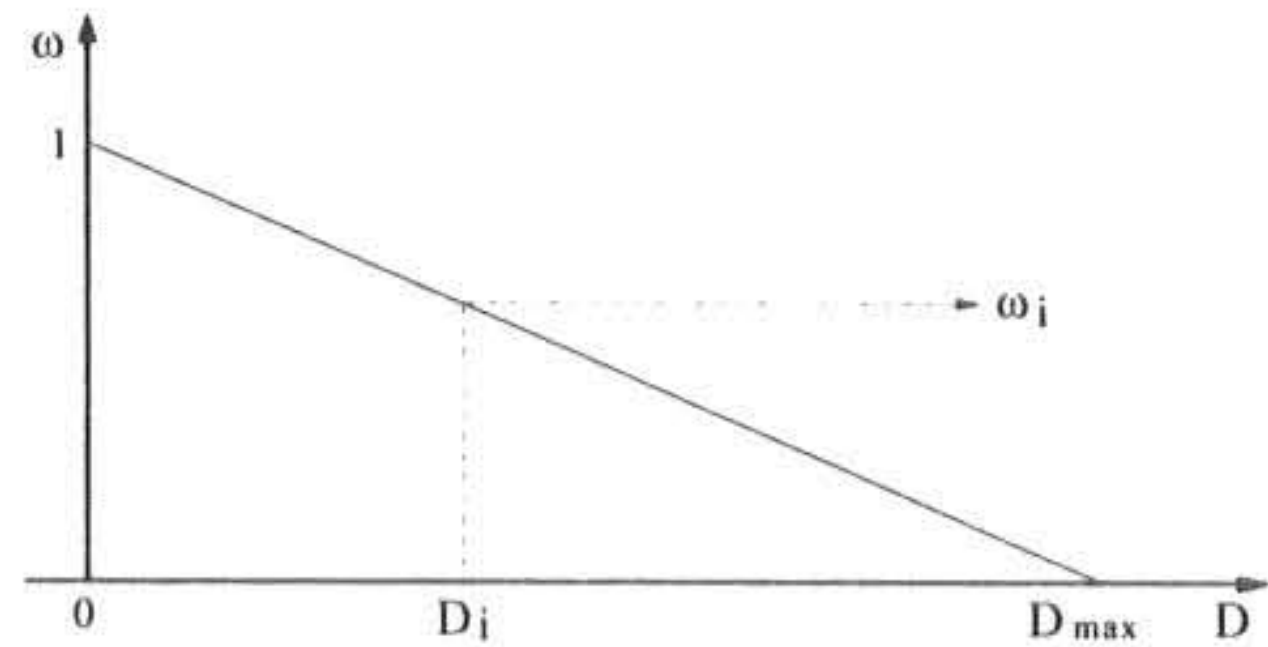


Fig. 3 Similarity Function

계산된 ω_i와 i번째 규칙의 후건부 퍼지집합과의 Ψ연산으로 i번째 규칙에서의 제어입력 퍼지 집합(Ĉ_i)을 추론한다.

$$\begin{aligned} \hat{C}_i &= \omega_i \varphi C_i \\ &= \begin{cases} 1 & \text{if } \omega_i \leq \mu_{C_i} \\ \mu_{C_i} & \text{if } \omega_i > \mu_{C_i}. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

각각의 규칙에서 추론된 퍼지집합들(Ĉ_i)에 MIN연산을 취하여 최종 제어입력 퍼지집합(Net Control Action)을 구한다. 한 예로 i번째 규칙과 j번째 규칙에서 얻어지는 최종 제어영역(NCR)은 다음그림에서와 같이 c와 b의 중복된 구간으로 구해진다.

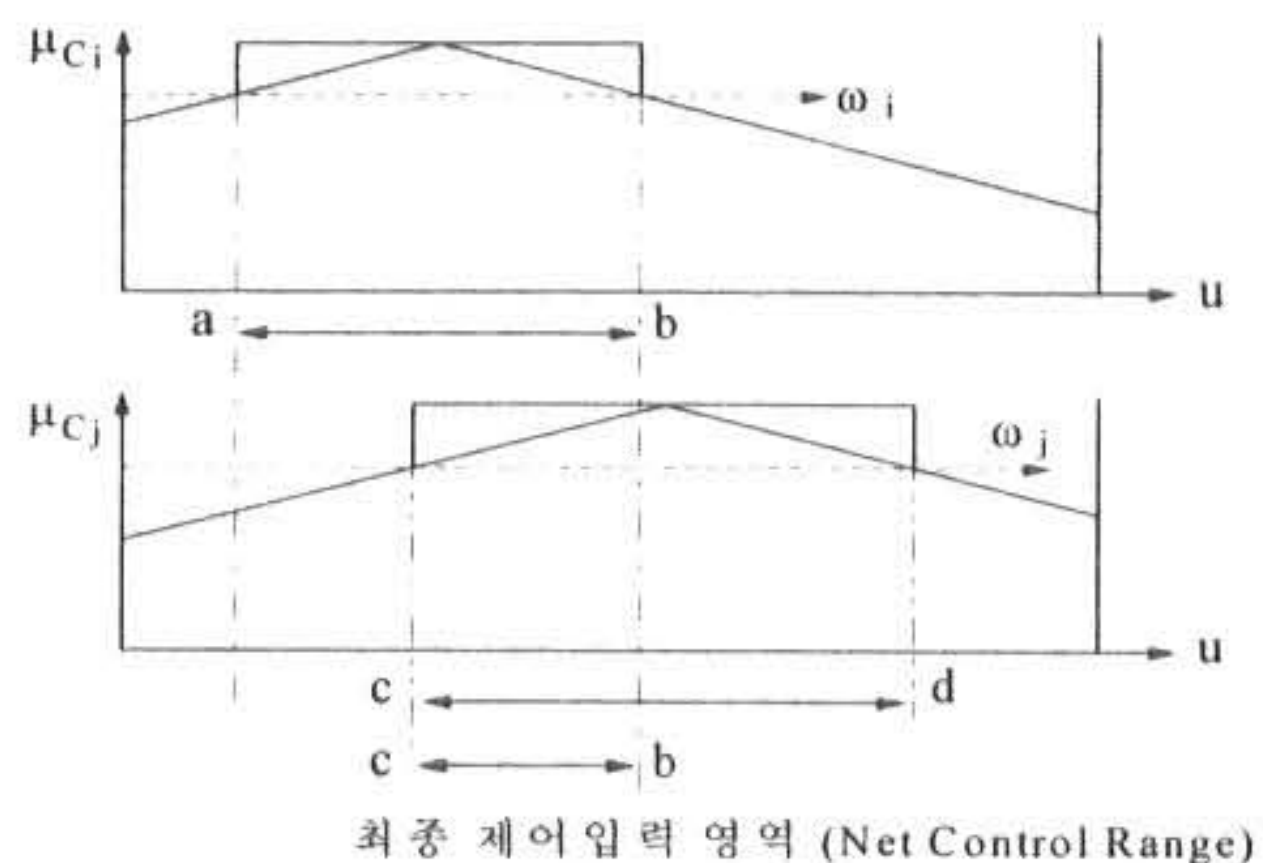


Fig. 4. Net control range

2.3.4 비퍼지화 (Defuzzification)

최종적인 제어입력 퍼지집합으로 부터 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.

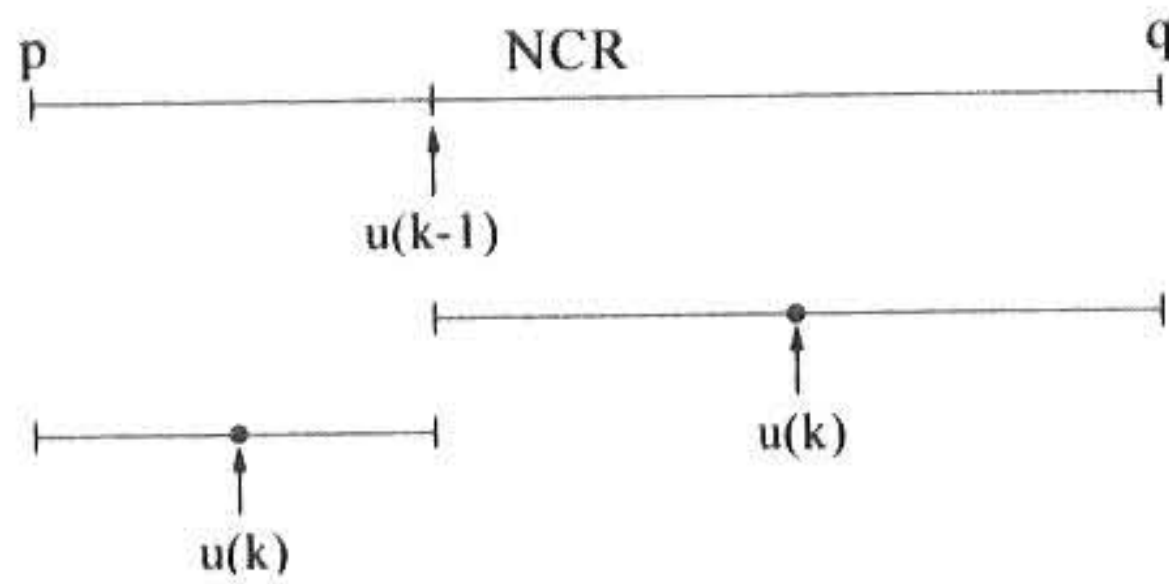


Fig. 5. Defuzzification method

2.3.5 규칙베이스 자기구성과정

규칙 베이스의 자기구성과정은 매 샘플링 단계에서 생성된 규칙이 그 영역에 다른 규칙이 저장되어 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.

$$J = [y_r(k+1) - y(k+1)] \quad (8)$$

3. 변조함수(Modulation function)

제어입력은 FLC1과 FARMA FLC에서 각각 추론되어 나오는 u_1 , u_2 값의 조합이며 조합의 비를 조정하는 요소로서 변조함수가 사용된다.

$$u(k) = m(k) * u_1(k) + (1 - m(k)) * u_2(k) \quad (9)$$



Fig. 6. Modulation function

4. 제어 알고리즘

제안한 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지 제어기의 제어알고리즘을 단계별로 요약하면 다음과 같다.

단계 1 : 따라가야 할 목표값과 초기값을 부여하고 FLC1의 규칙을 구성한다.

단계 2 : 변조함수의 k_1 시점까지 PD형태인 FLC1으로 제어입력을 구하여 플랜트에 인가한다.

단계 3 : 예측출력값이 구해지는 시점에서 FARMA 규칙을 생성하고 FLC1과 FARMA 제어기에서 각각 얻어지는 제어입력값들을 구한 후 변조함수를 이용하여 제어입력을 구하여 플랜트에 인가한다.

단계 4 : 플랜트의 출력값이 허용할 수 있는 오차범위내에 들어오면 끝내고 그렇지 않으면 단계 3을 반복한다.

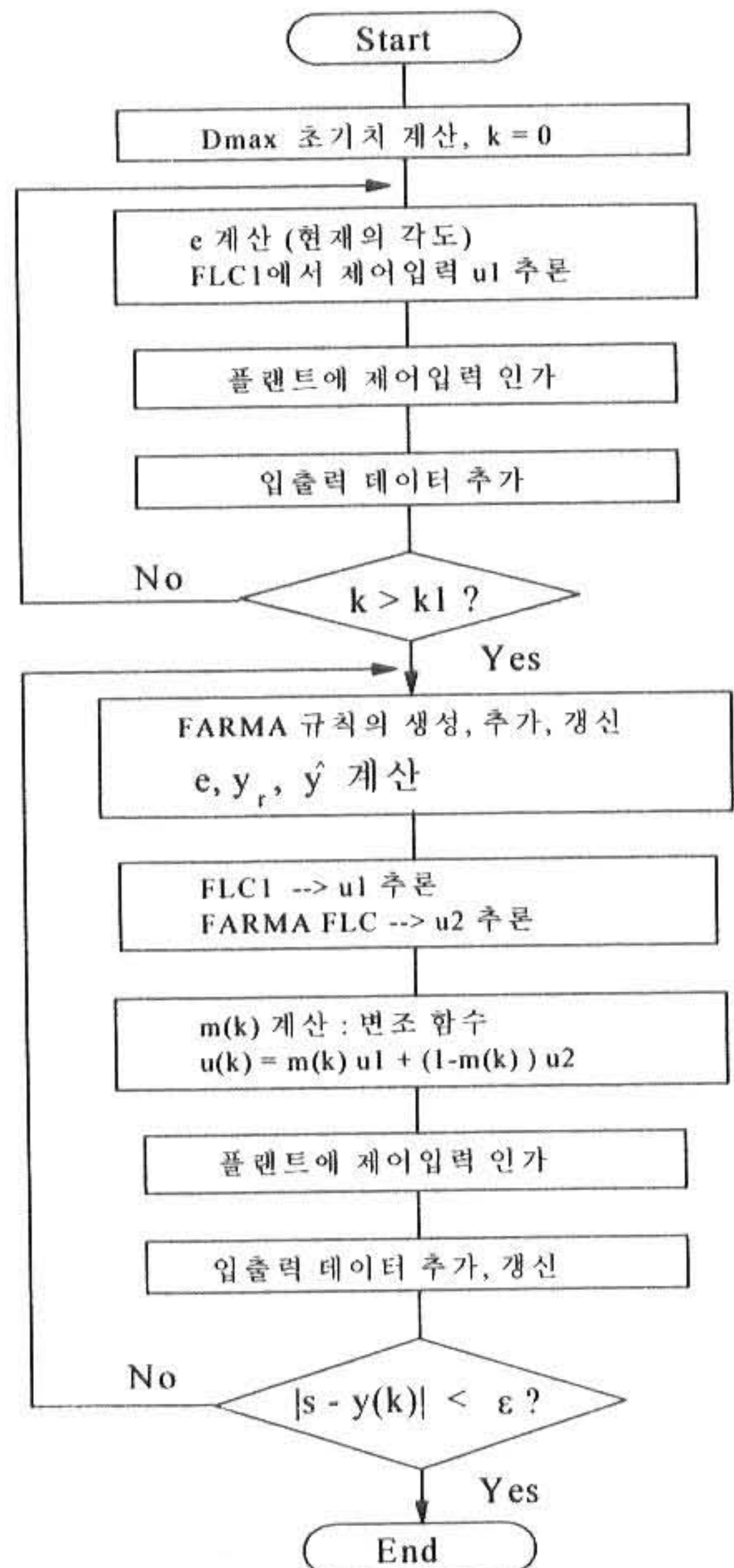


Fig. 7. Flowchart of the control procedure

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

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

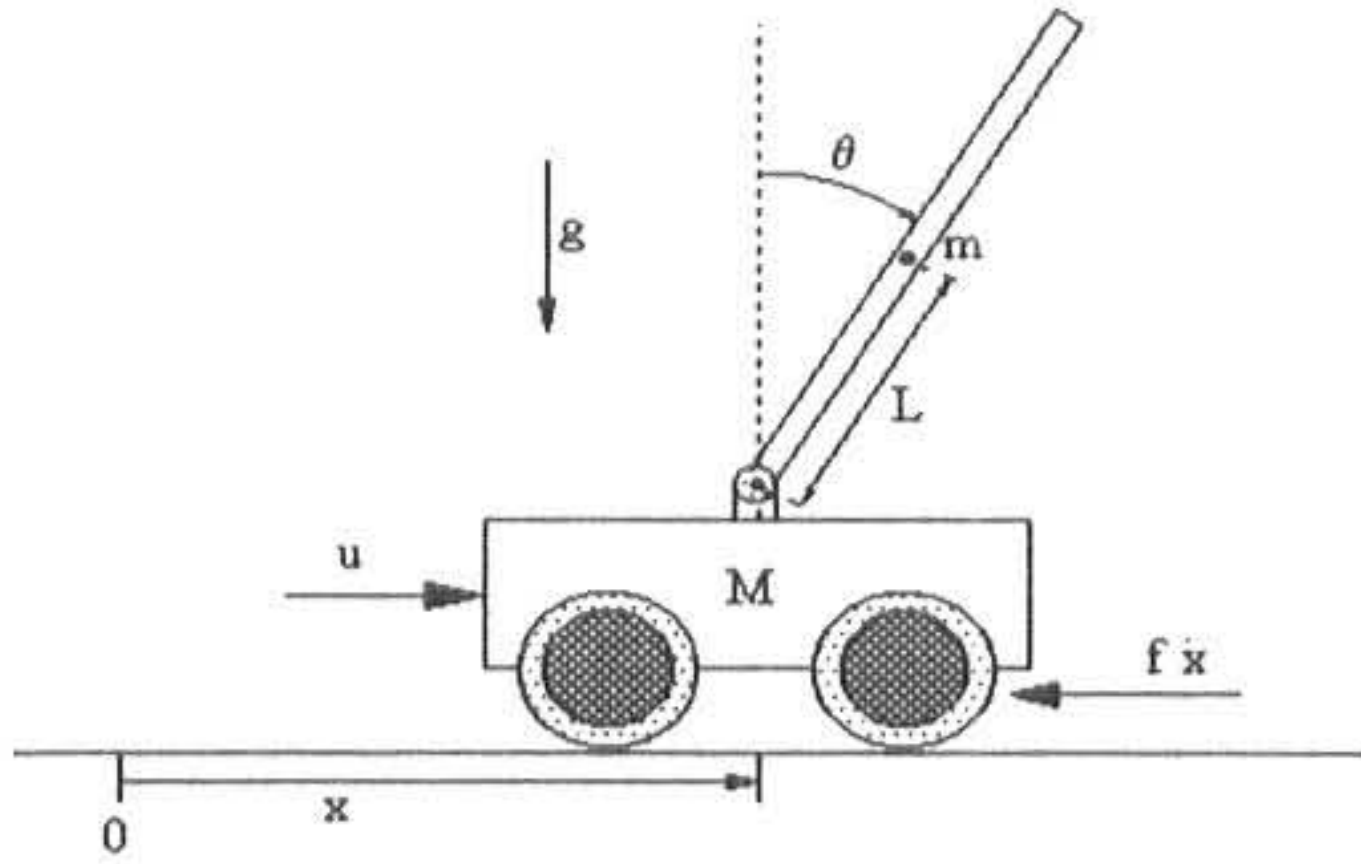
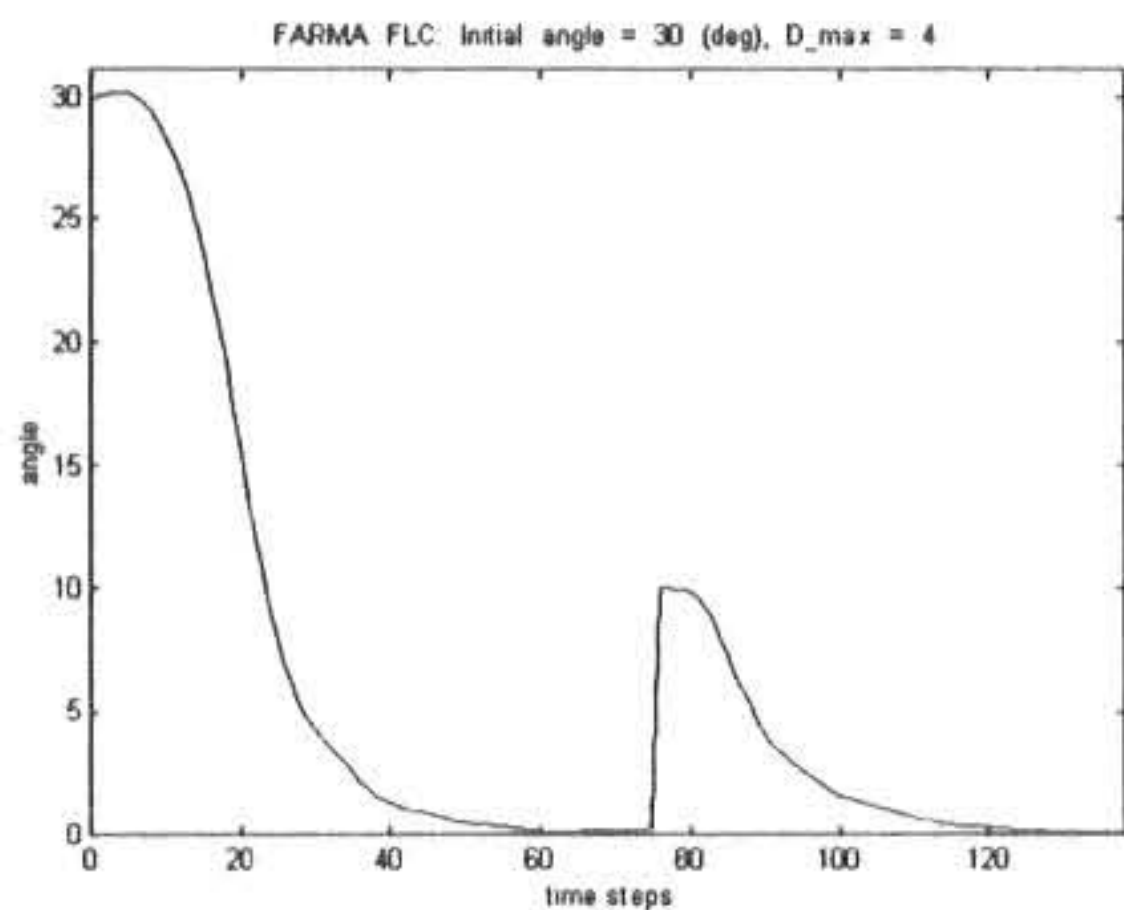


Fig. 8. Inverted pendulum system

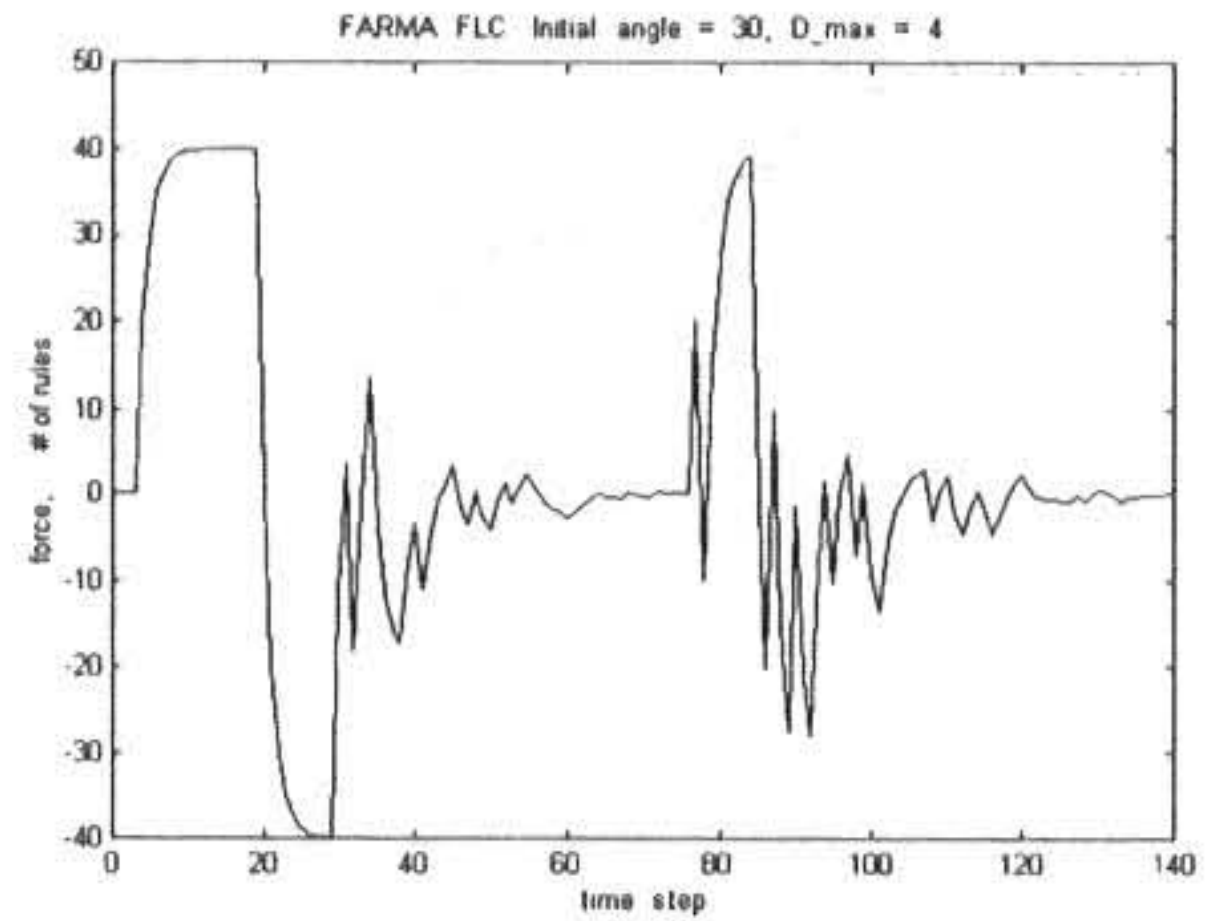
$$\ddot{x} = \frac{1}{(M/m) + \sin^2 \theta} \left(\frac{u}{m} + \dot{\theta}^2 L \sin \theta - g \sin \theta \cos \theta \right)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{L(M/m) + \sin^2 \theta} \left(-\frac{u}{m} \cos \theta - \dot{\theta}^2 L \cos \theta \sin \theta + \frac{m+M}{m} g \sin \theta \right) \quad (10)$$

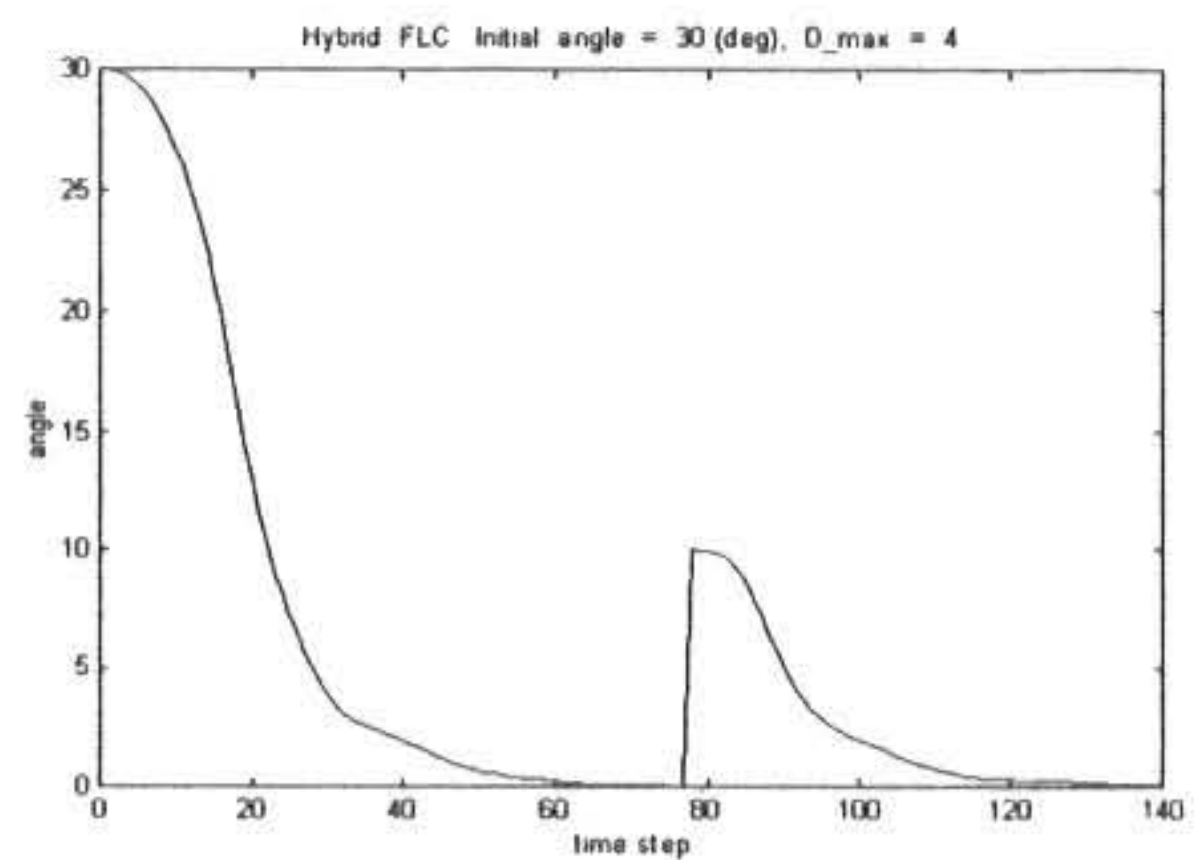
여기서 m, M, L은 각각 진자의 질량, 수레의 질량, 진자의 무게중심까지의 길이를 나타낸다. 먼저 L=1m, M=1kg, m=0.1kg, g=9.8m/s², 수렴후 10도의 외란을 인가하여 컴퓨터 모의실험을 통한 성능을 비교해 보기로 한다. k₁은 16으로 하여 모의실험을 수행하였다. 다음 각각의 그림들은 초기각도가 30도이고 FARMA 제어기에서의 D_{max}가 4일 때의 응답과 제안한 하이브리드 제어기에 의한 응답을 나타낸다.



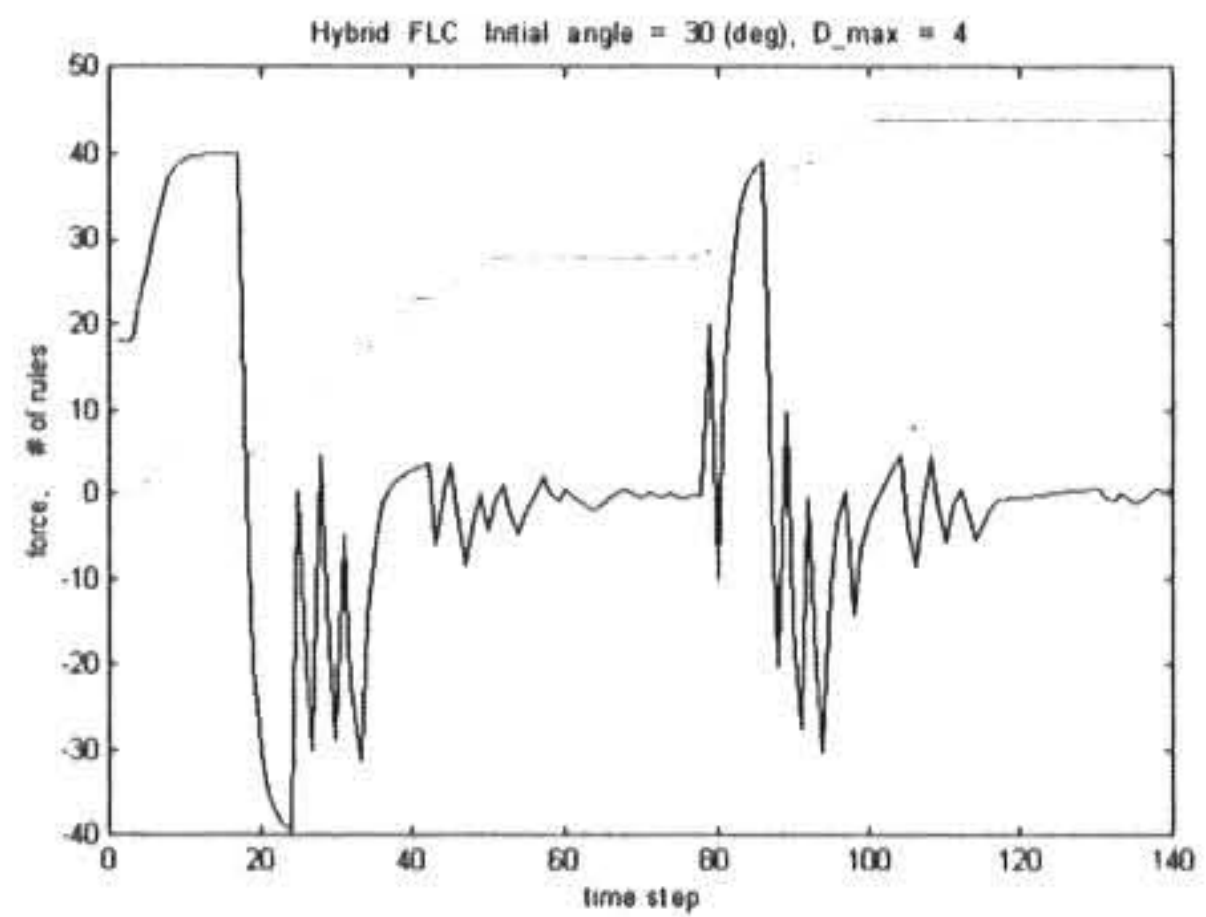
(a) Angle response by the FARMA method



(b) Control input by the FARMA method



(c) Angle response by the proposed method



(d) Control input by the proposed method

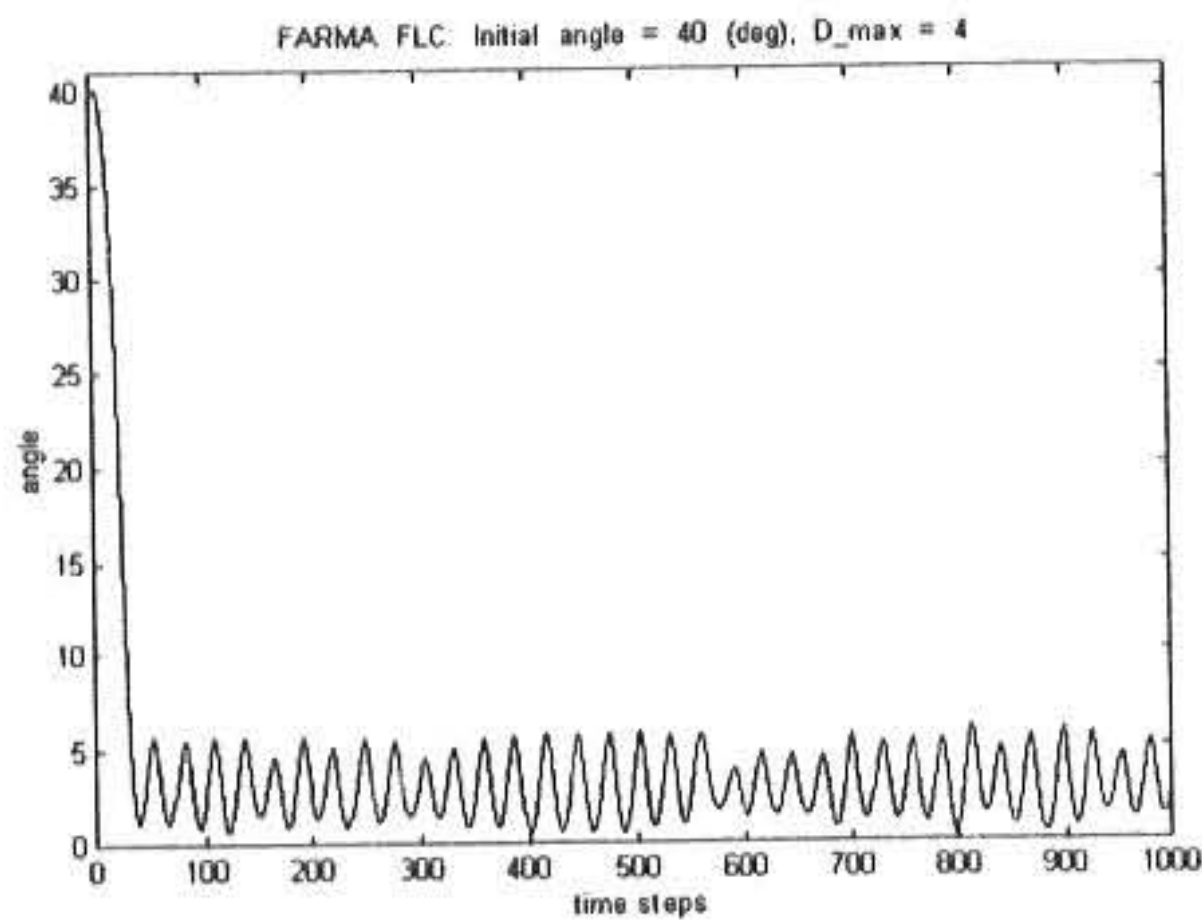
Fig. 9. Comparison of the angle responses

Fig. 5에서 알 수 있듯이 초기각도가 30도인 경우에는 FARMA 제어기나 제안한 하이브리드 제어기의 각도응답이 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

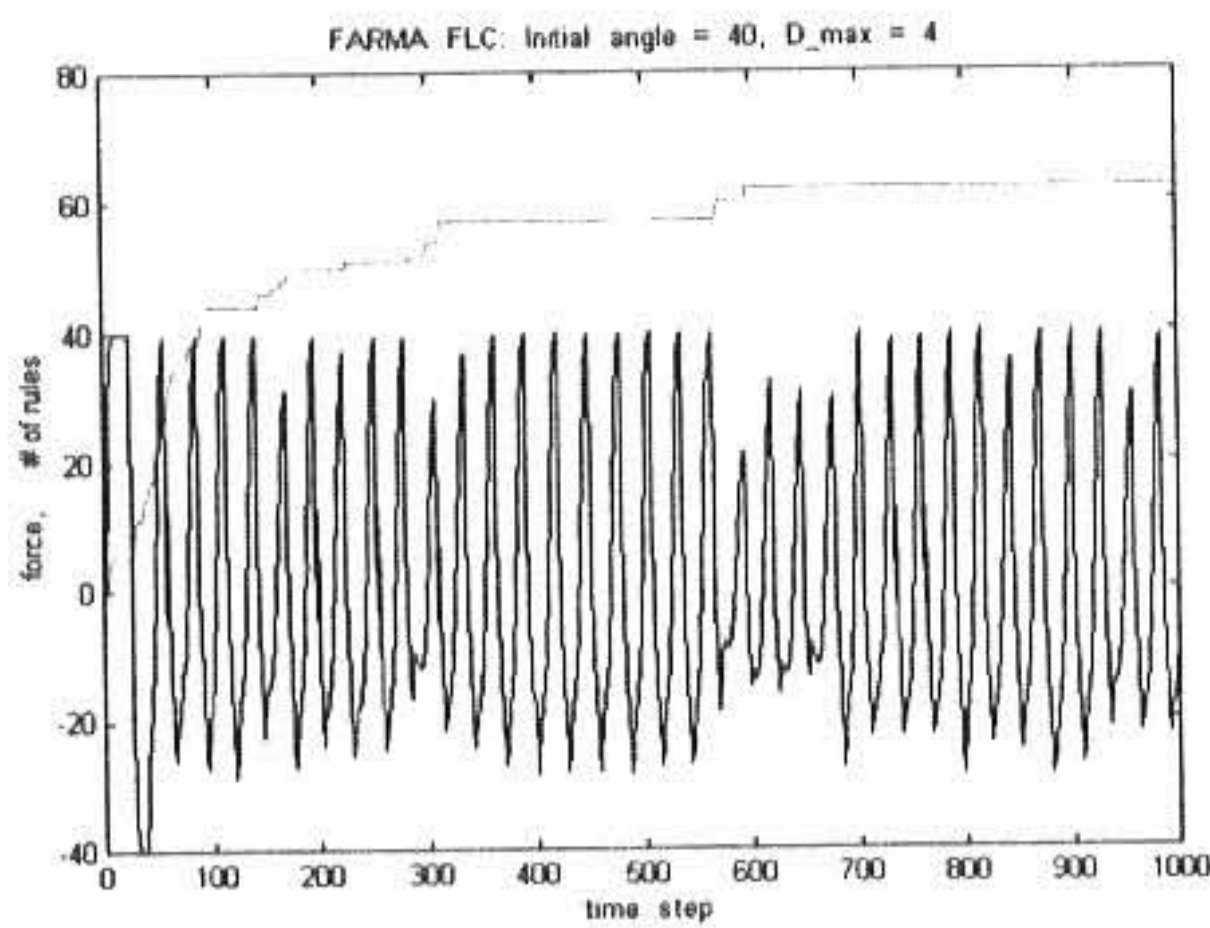
Table 2 Comparison of the output responses

	초기각에 대한 수렴성			외란이 가해진 후의 수렴성	
	규칙 수	수렴 시점	오차 합	규칙수	수렴 시점
FARMA FLC	30	75 steps	639.14	49	139 steps
Hybrid FLC	28	77 steps	604.66	44	140 steps

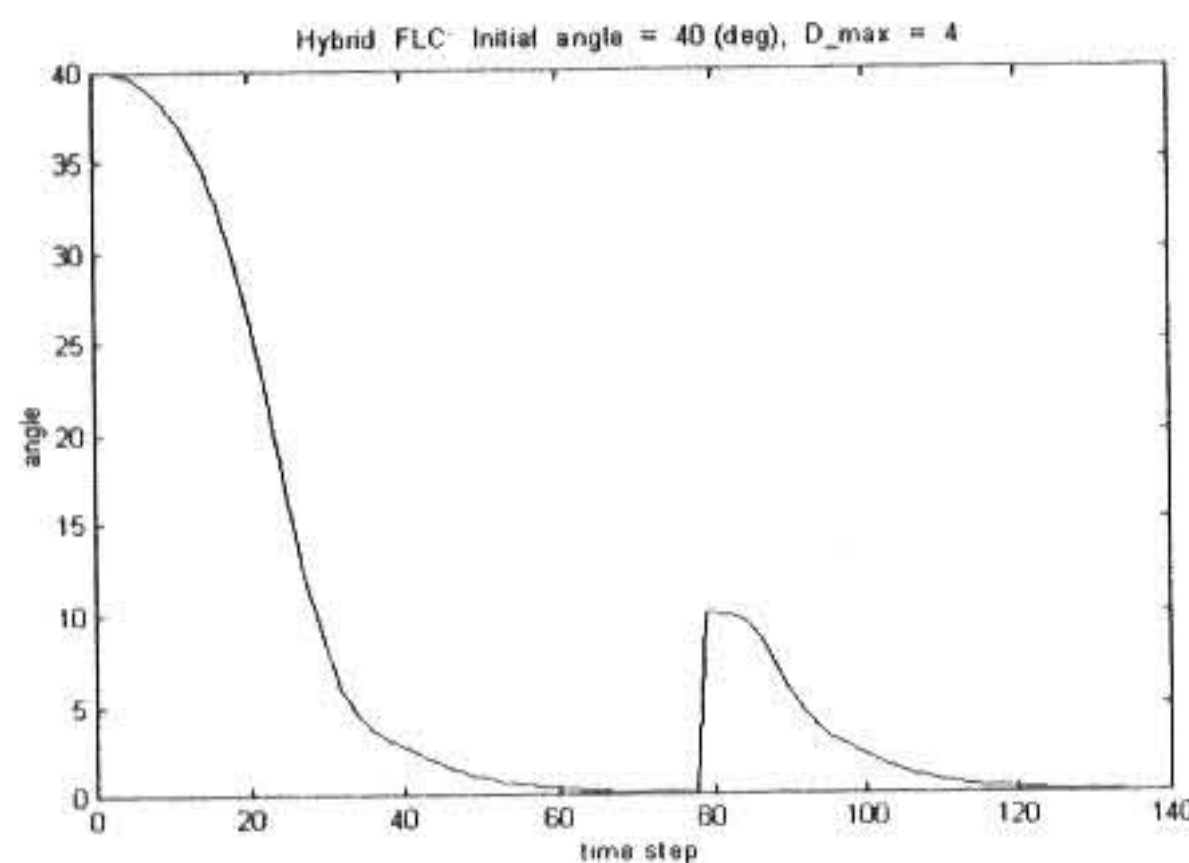
다음은 초기각도가 40도 이고 D_{max} 가 4인 경우 응답을 비교하면 각각 다음과 같다.



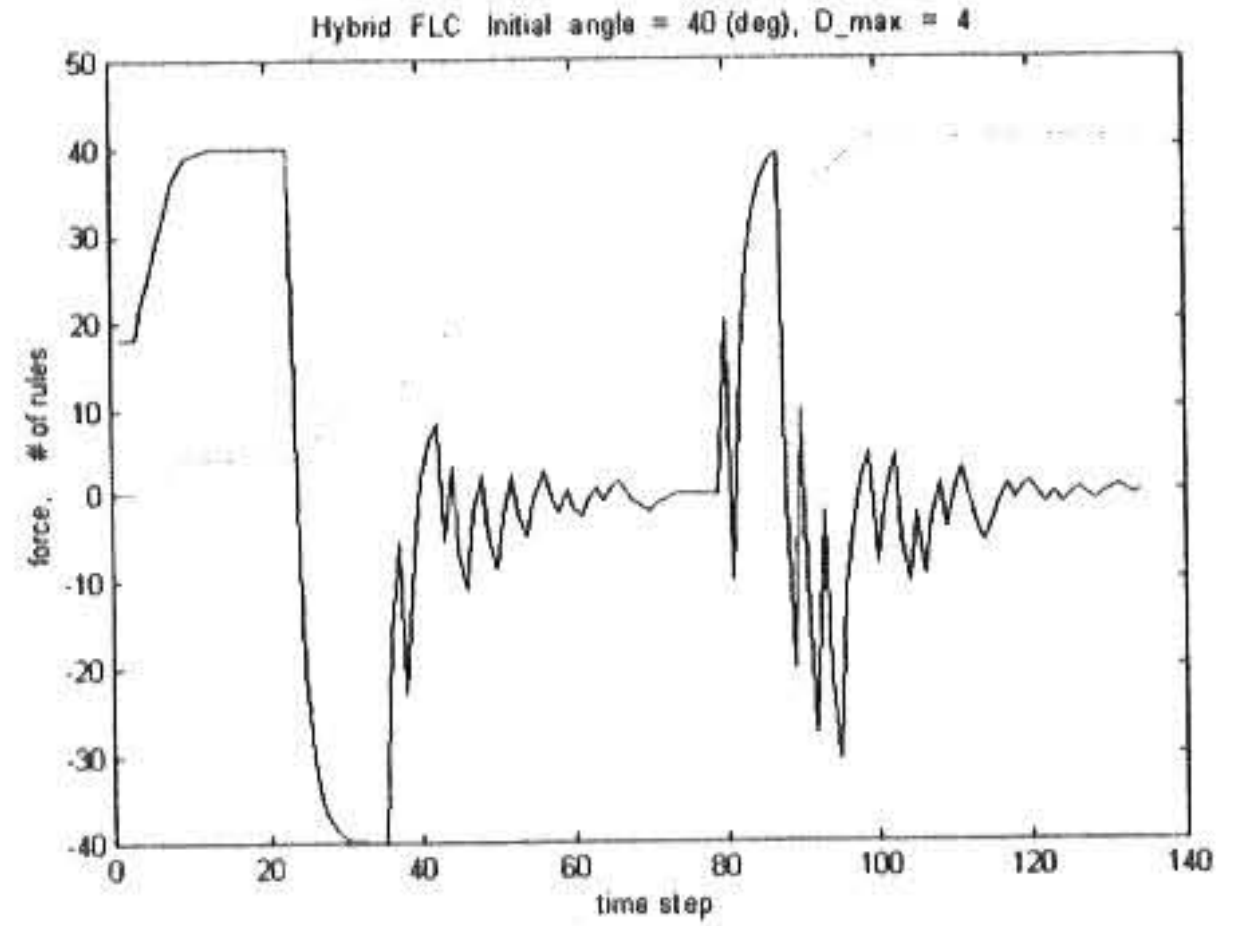
(a) Angle response by the FARMA method



(b) Control input by the FARMA method



(c) Angle response by the proposed method



(d) Control input by the proposed method

Fig. 10. Comparison of the angle responses

위 결과에서 FARMA제어기는 도립진자의 초기각에 대해 수렴하지 못함을 알 수 있고 반면에 제안한 방법인 하이브리드제어기는 초기각에 대한 오차가 고려되어 목표값에 수렴함을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of the output responses

	초기각에 대한 수렴성			외란이 가해진 후의 수렴성	
	규칙 수	수렴 시점	에러의 합	규칙수	수렴 시점
FARMA FLC	62	수렴 못함	3899.7	-	-
Hybrid FLC	24	78 steps	942.49	41	134 steps

6. 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 예측출력값을 구하기 어려운 초기단계에서는 기본적인 P형태의 퍼지제어기로서 시스템을 구동시키고 신뢰할만한 제어규칙이 구성될 때 까지 기본 퍼지제어기와 FARMA 퍼지제어기 사이의 적용강도를 조정하는 변조함수를 이용하여 시스템의 응답특성을 개선시키는 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기를 제안한다.

참고문헌

- 1) Procyk T. J. and Mamdani E. H. : A linguistic Self-Organizing Process Controller. *Automatica*, vol. 15, pp. 15-30, (1979)
- 2) 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)
- 3) Shao S. : Fuzzy Self-Organizing Controller and Its Application for Dynamic Processes, *Fuzzy Sets and System*, vol.26, pp.151-164, (1988)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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)

(2002년 12월20일 접수, 2003년 11월20일 채택)