

## 퍼지추론을 이용한 비선형성 해석 및 자동동조의 구현

변황우, 이은철, 이동진, 김낙교, 남문현  
건국대학교 전기공학과

### Nonlinearity Analysis with Fuzzy Inference and Its Implementation to Auto-Tuning

Hwang-Woo Byun, Un-Cheol Lee, Dong-Jin Lee, Nak-Kyo Kim, Moon-Hyon Nam  
Department of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

#### ABSTRACT

This paper presents a new identification method which utilizes fuzzy inference in parameter identification. The proposed system has an additional control loop where a real plant is replaced by a plant model. The control system to be designed is to satisfy the following specifications:

- 1) It has zero steady-state error.
- 2) It has adequate damping characteristics.
- 3) 1), 2) satisfied, it has a shortest rise-time.

Fuzzy rules describe the relationship between comparison results of the features and magnitude of modification in the model parameter values. This method is effective in auto-tuning because the response of the closed loop is verified. The proposed method is tested in simulation for several plants with high-order lags and dead-times.

#### I. 서 론

실제 시스템의 모델을 구성하기 위한 접근 방법으로는 물리적인 해석에 따라 수학적인 모델을 구하는 방법과 주어진 입출력 데이터에 근거해서 시스템의 전달함수를 추정하는 방법이 있다.

산업현장에서 동적 시스템을 대상으로 하는 제어를 설계하기 위해서는 제어대상의 동특성을 파악할 필요가 있으며, 그 동특성 표현방법으로 전달함수로 표현된 제어대상 모델을 이용하는 것이 효과적이다. 이 제어대상 모델의 파라미터 동정법으로는 최소자승법(LSM) 등의 시스템 동정이론[1,2]을 근거로한 방법이 일반적으로 이용되고 있다. 그러나 이것은 제어기의 설계방법이 독립적인 동정 알고리즘이며, 최종목표인 폐루프시스템의 응답에 따른 동정결과와 수정이 곤란하다는 점과 정확한 동정값을 얻기 위해서는 동정용신호의 인가가 필요해지는 경우가 많아지는 문제를 갖고 있다. 이러한 성질은 응용분야에 따라서 실용상 문제가 되는 경우가 생기고, 예를들면 제어대상에 적절한 제어기

파라미터를 자동적으로 설정하는 자동동조의 구현에 있어서 동정용 신호의 인가는 바람직하지 않다[2,3].

고차의 플랜트를 제어하기 위한 제어기 설계방법으로는 직접법과 간접법[4]으로 나누어 생각할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 비선형성을 고려한 저차 제어기 설계방법으로서 제어대상을 저차모델로 근사화시켜 제어계를 설계하고, 본래의 제어대상에 적용하는 개념이다[5].

그래서 본 논문에서는 제어대상 모델의 파라미터를 동정하는 새로운 개념으로서 퍼지추론에 의한 동정법을 적용하였다. 이 방법은 폐루프시스템의 응답파형으로부터 추출한 특징량을 근거로 파라미터 동정을 시행하는 방법이며, 특별한 동정용 신호를 필요로하지 않는다는 점, 제어기의 설계와 연결하기 쉬운 형태인 폐루프시스템의 응답을 확인하면서 동정을 해나가는 것 등이 특징이다.

이전에 발표한 논문[6]에서는 플랜트와 모델을 동일한 차수의 시스템으로 가정하고, 제어대상의 동특성 변화에 따른 동정결과를 실험 분석하였다. 본 논문에서는 고차의 비선형성을 갖는 제어대상에 대해 저차모델을 이용하여 동정시키고, PID 제어기의 파라미터를 자동적으로 설정하는 동조방법을 기술하였다. 여기서는 임의의 고차시스템을 제어대상으로 가정하고 모의실험을 통해서 본 방법의 유용성을 검증하였다.

#### II. 퍼지추론을 이용한 시스템 구조

그림 1은 퍼지추론을 이용한 시스템 동정 및 자동동조 과정을 나타내는 시스템의 구성도이다. 이 방식은 두개의 폐루프계를 구성하며, 하나는 실제의 제어대상을 다른 하나는 컴퓨터상의 모델을, 각각 같은 특성을 갖는 제어기로서 제어하는 구조로 되어 있다. 두개의 폐루프시스템 출력응답 파형의 특징량 비교값으로부터 퍼지추론을 하여 제어대상 모델의 파라미터를 수정한다. 특징량이라는 것은, 예를들면 시스템응답에서의 오버슈트량 등을 말하며, 퍼지추론은 이 특징량의 비교값과 모델 수정량과의 관계를 표현하기 위해 이용되고 있다. 이 특징량이나 퍼지규칙은 제어대상모델이나

제어기의 구조, 각 파라미터의 특성등에 따라서 적절한 것으로 결정할 필요가 있다[7,8].

이 동정법의 개략적인 순서는 다음과 같다. 먼저 제어대상 모델의 파라미터 초기값을 결정한다. 그리고 어떤 입력(SV)의 변화에 대해서 얻어진 두개의 페루프 시스템의 출력(PV, MV)으로부터 각각의 특징량을 추출하고, 그 값을 비교한다. 두개의 페루프는 제어대상과 제어대상모델만 다르므로 얻어진 특징량의 차이는 제어대상과 그 모델과의 차이에서 기인하는 것이다. 그래서 특징량의 비교값으로부터 제어대상 모델의 파라미터 차이를 추정하는 퍼지추론을 하고, 모델의 파라미터를 수정한다. 이상의 순서를 반복하여 특징량의 차가 없어진 시점에서 동정값을 구했다고 판단한다.

본 방식은 동정방법으로서 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 보통 지령으로서 입력변화에 대한 페루프시스템의 응답에서 특징량을 추출하기 때문에 동정을 위한 특별한 입력변화를 요구하지 않는다.
- (2) 파라미터의 수정결과를 확인하면서 반복 수행하기때문에 일시적인 노이즈에도 강하다.

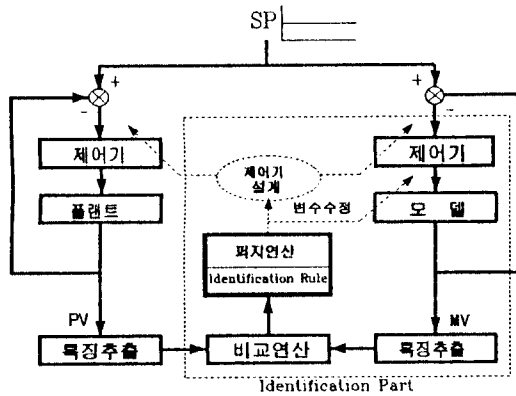


그림 1. 전체 시스템 구성도

### III. 자동-동조(Auto-tuning)의 적용

자동동조라는 것은 제어대상의 특성에 적합한 제어기 파라미터를 자동적으로 설정하는 기능이 있다. 여기서 제안한 동정방법은 일반적인 제어시스템 설계방법과 연결하여 동정용 신호를 인가하지 않고도, 페루프시스템의 응답(특징량)을 확인하면서 파라미터를 설정하는 자동동조가 가능하였다.

지금까지 제안되었던 자동동조방식 중에도 특징량을 이용하여 퍼지추론을 하고, 직접 제어기의 파라미터를 변경해가는 것이 있다.[7,8] 그러나 이러한 방식은 제어대상 모델을 이용하지 않고 특징량과 파라미터 수정량의 관계를 직접 퍼지규칙의 결정이 곤란해서 튜닝결과가 제어대상의 특성에 따라 달라지기 쉽고, 스텝 입력과 같은 특성의 입력변화가 필요하다고 하는 문제가 있다. 이밖에도 릴레이를 도입하여 수학적인 해결방법 대신에 현장 엔지니어의 경험적 지식을 제어계 설계에 반영하는 전문가 제어기법이라고 할 수 있는

인공지능으로 해결하려는 연구도 활발하게 이루어지고 있다 [9].

여기서 제안한 동정방법을 이용한 자동동조방식을 그림 1과 같이 점선부분을 포함하는 구성도로 나타냈다. 여기서 점선부분은 제안한 동정방법에 제어기를 수정하기위한 제어기 설계부분을 추가한 것이다. 즉 퍼지추론에 따라 제어대상 모델의 파라미터가 수정된 경우, 제어기 설계부에 의해 그 시점에서의 제어대상 모델에 최적의 제어기가 결정되고, 두개의 페루프 제어기 파라미터가 수정된다. 최종적으로 제어대상의 동정이 끝났을 때는 제어대상에 가장 적합한 제어기를 설계할 수 있다. 본 논문에서의 퍼지추론을 이용한 동정과정은 그림 2에 나타났다.



그림 2. 퍼지추론을 이용한 동정과정

그림 1의 제어대상 모델을 포함하는 페루프시스템에서는 그 제어대상 모델에 가장 적합한 제어기를 항상 이용할 수 있기때문에 그 페루프 시스템의 응답은 원하는 결과를 얻을 수 있고, 이 결과로부터 얻어진 특징량은 실제 제어대상 응답의 특징량의 목표기준으로서 가장 적합할것이다. 따라서 이 자동동조 방식은 제어대상 모델의 파라미터 동정결과와 제어기의 설계결과를 통합해서 평가하고, 페루프시스템의 응답을 목표기준에 추종하도록 하는것이라고 할 수 있다.

여기서 기술한 방식은 종래의 특징량을 근거로 직접제어기를 수정하는 퍼지 동조 방법과 비교할 때, 아래와 같은 특징을 갖는다.

- (1) 제어기 설계부에 있어서 제어이론에 근거한 일반적인 제어시스템 설계법을 사용할 수 있으므로 특성이 크게다른 제어대상에도 적용할 수 있다.
- (2) 제어대상과 제어대상 모델의 응답을 비교하여 동조를 수행하기때문에 동조순서의 반복에 있어서 매번 엄밀하게 같은 입력변화를 요구하지 않는다.

### IV. 플랜트 제어시스템의 자동동조

데드타임요소를 갖는 고차시스템인 제어대상을 PID(비례, 적분, 미분) 제어기로서 제어하는 경우, PID 파라미터의 결정은 앞에서 설명한 자동동조 방식을 적용하고, 시뮬레이션에 의해서 그 유효성을 검증한다. 이 제어대상은 플랜트를 제어하는데 있어서 일반적인 특성으로 이용되고 있는 것이다.

제어기의 전달함수 C(s)는 아래식으로 표현한다.

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{K_{is}} + K_{as} \right) \dots\dots\dots (1)$$

단,  $K_p$ 는 비례이득,  $K_{is}$ 는 적분 시정수,  $K_a$ 는 미분 시정수

를 나타내며, 이 세가지가 자동동조에서 결정하는 PID 파라미터이다. 또, 제어대상의 전달함수 P(s)는 아래식으로서 표현할 수 있다.

$$P(s) = \frac{K \cdot \exp^{-Ls}}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 L은 데드타임의 크기, T는 시정수, K는 플랜트 이득을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 모델의 전달함수 Pm(s)를 아래와 같은 구조를 갖는 시스템이라고 가정하였다.

$$Pm(s) = \frac{K_m \cdot \exp^{-L_m s}}{(T_{m1}s+1)(T_{m2}s+1)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 첨자 m은 제어대상 모델의 파라미터를 나타낸다. 모델번호 Lm, Tm, Km이 퍼지추론 결과에 따라 수정된다.

여기서는 특징량 및 비교값으로서 그림 3에 나타낸 것을 이용하였다. 그림 3의 각 특징량(MO, OR, TD, TR)은 각각 제어대상 및 모델의 출력응답에 대한 검출값을 나타낸다. 특징량의 비교값(CMO, COR, CTD, CTR)은 퍼지추론의 입력 데이터가 된다. 퍼지추론방식으로는 일반적인 MIN-MAX-중심법[12,13,14]을 사용하였으며, 퍼지연산 과정은 아래와 같다.

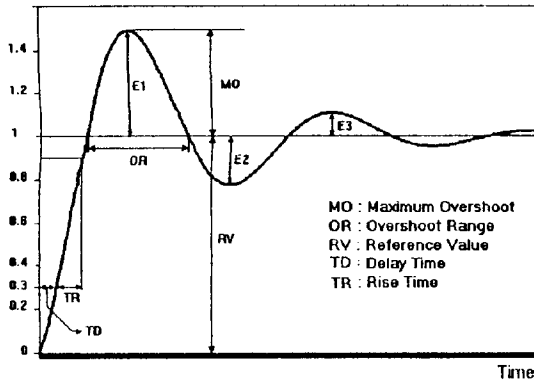


그림 3. 특징량 및 비교값 검출

특징량의 비교 : CMO = PMO-MMO, CTR =  $\frac{PTR}{MTR}$

CTD =  $\frac{PTD}{MTD}$ , COR =  $\frac{POR-MOR}{MTD+MTR}$

(1) 전건부 연산... 먼저 각 제어규칙의 전건부(IF부분)에 포함된 퍼지명제를 평가한다. 과거나 현시점에서 관측한 시스템 상태 x(t)를 인간의 주관을 근거로 정의한 각 퍼지집합 Mij로 나타내면 아래와 같다.

$$M_{ij} = \int_V \mu_{M_{ij}}(x)/x \dots\dots\dots (4)$$

각 퍼지집합 Mij에 어느정도 적합인가를 나타내는명제적 합도 mij를 구하면 다음과 같다.

$$m_{ij} = \mu_{M_{ij}}(x)/x \dots\dots\dots (5)$$

여기서, i : 규칙번호 (규칙 수, N)

j : 규칙 i의 명제번호 (명제 수, Ki)

이 명제적합도의 계산에 있어서는 관측한 시스템 상태 x(t)를 확정값이라고 하고, 멤버십 함수(소속함수) μMij 값은 적합도를 나타내고 있다.

다음으로 규칙의 전건부에 기술된 각 명제의 적합도를 제 1의 퍼지연산 『여기서는 (∩: min 연산)』을 하는 전건부 적합도 ri를 구한다.

$$r_i = m_{i1} \cap \dots \cap m_{ki} \\ = \min_{j=1, \dots, k_i} \{ m_{ij} \} \dots\dots\dots (6)$$

(2) 각 규칙 후건부(THEN)의 연산 ... 전건부의 적합도와 후건부에 기술된 조작명제 ( 퍼지집합 : μui(z))를 제2의 퍼지연산을 하고, 각 규칙 조작입력의 후보값(Wi)를 구한다.

$$W_i = \int_Z \mu_{w_i}(z)/z \\ = \int_Z (\mu_{u_i}(z) * r_i)/z \dots\dots\dots (7)$$

(3) 후건부의 통합화 ... 여러개의 제어규칙에 따라 산출한 제어입력의 후보값을 제3의 퍼지연산(U: max 연산)을 하여 통합화 시키고, 제어입력의 추론결과인 (Z)를 구한다.

$$Z = \int_Z \mu_z(z)/z \\ = \int_Z (\max_{i=1, \dots, N} \mu_{w_i}(z))/z \dots\dots\dots (8)$$

(4) 비퍼지화 연산(Defuzzyfication) ... 보통 제어를 실행하기 위해서는 비퍼지화를 시키고, 하나의 제어 입력값을 구해야 한다. 여기서는 제어입력 산출방식으로 무게 중심법(center of gravity)을 이용한다. 퍼지집합 Z의 무게 중심을 아래식으로 구하고, 최종적인 제어입력으로서의 uo를 결정한다.

$$u_o = \frac{\int \mu_z(z) z dz}{\int \mu_z(z) dz} \dots\dots\dots (9)$$

퍼지추론을 위한 제어규칙을 그림 4에 몇가지 예를 들었고, 전체적으로는 13개의 규칙을 사용한다. 그리고 소속함수물 그림 5에 나타냈다. 이것들은 제어에 있어서 일반적인 지식으로부터 얻어지는 정성적인 관계를 근거로 결정했다.

k번째의 제어대상 모델의 파라미터 수정은 퍼지추론 결과인 dω(k), dζ(k), dK(k)를 이용해서 다음식과 같이 결정한다.

$$\omega_m(k+1) = 2^{d\omega(k)} * \omega_m(k) \dots\dots\dots (10)$$

$$\zeta_m(k+1) = 2^{d\zeta(k)} * \zeta_m(k) \dots\dots\dots (11)$$

$$K_m(k+1) = 2^{dK(k)} * K_m(k) \dots\dots\dots (12)$$

또, 제어기 설계방법으로 이용하는 PID 파라미터 결정법으로는 부분적 모델매칭방법[10]을 적용하였다. 이 방법은 제어대상의 동특성을 완전하게 알지 못하는 상황에서도 다양한 형태의 제어시스템을 설계할 수 있는 알고리즘이다.

그러나 불안정한 플랜트인 경우, 만족스런 제어시스템을 설계하기 위해서는 충분한 수의 정보를 알고 있어야 가능하다.

규칙1:	IF CMO is NL AND CTR is L	THEN dK is negative
규칙2:	IF CMO is NL AND CTR is M	THEN dK is zero
규칙3:	IF CMO is NL AND CTR is S	THEN dK is positive
규칙4:	IF CMO is ML THEN dK is positive	d $\omega$ is negative
		d $\zeta$ is negative
규칙5:	IF CTD is L THEN d $\omega$ is negative	
규칙6:	IF CTD is M THEN d $\omega$ is zero	
규칙7:	IF CTD is S THEN d $\omega$ is positive	
		.
		.

그림 4. 퍼지 제어규칙의 예(플랜트제어시스템)

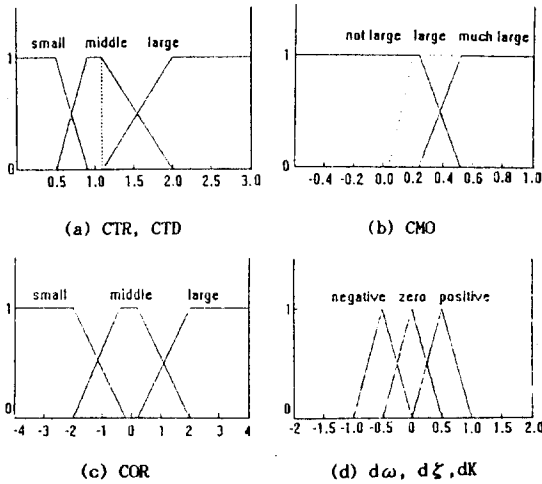


그림 5. 소속함수

### V. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문에서는 퍼지동정 알고리즘을 사용하여 다양한 플랜트 모델에 대해서 파라미터를 변경시킨 후, 시뮬레이션 함으로써 비교분석하였다. 여기서 실선은 제어대상을 포함한 폐루프시스템의 출력 PV, 점선은 모델을 포함한 폐루프 시스템의 출력 모델 MV를 표시하고 가는실선은 플랜트와 모델의 오차신호를 나타낸다. 제어대상의 응답은 동조 전에는 모델의 출력응답과 다르므로 바랍적이지 않았지만, 최종적으로는 일치하여 목표사양을 만족시키는 것을 알 수 있다.

그림 6에서 적용한 제어대상에 대해 다양한 초기값으로부터 동조를 시행한 경우의 동정결과를 표 1.에 나타냈다. 이 때 플랜트의 파라미터( $\omega=1.2$ ,  $\zeta=1.5$ ,  $K=5$ )에 대해서 시뮬레이션한 결과, 초기값에 관계없이 10% 이내의 오차로

서 동정이 완료됨을 알 수 있었다.

표 1. 플랜트의 동정결과

초기값			동정결과		
$\omega_m$	$\zeta_m$	$K_m$	$\omega_m/\omega$	$\zeta_m/\zeta$	$K_m/K$
1.44	1.06	1.5	0.99	1.03	1.02
1.44	1.06	3.0	0.97	1.04	1.02
2.00	1.06	3.0	0.98	1.05	1.03
2.00	1.06	5.0	1.06	0.92	0.94
1.44	1.20	5.0	1.00	1.01	1.05
2.00	1.20	5.0	0.94	0.91	0.98

다음으로 제어대상의 동특성에 따라서 동정결과에 오차가 발생한다. 이것은 폐루프 시스템의 응답에 오차의 영향이 나타나지 않는 경우에 일어나지만, 이 동정오차는 폐루프 시스템의 응답에서는 거의 영향을 미치지 못하므로 자동동조를 실행하는데 있어서 전혀 문제가 되지 않는다.

아래 그림 6,7,8은 다음과 같은 플랜트 및 모델에 대한 시뮬레이션 결과이다.

$$P(s) = \frac{5 \cdot e^{-0.5s}}{0.302s^4 + 1.7442s^3 + 8.77s^2 + 12.3s + 2.69}$$

$$P_m(s) = \frac{1.5 \cdot e^{-0.2s}}{0.5s^2 + 1.5s + 1}$$

그림 6은 비선형성을 포함하지 않은 플랜트와 모델의 초기출력응답과 퍼지를 이용한 동조결과를 보여주고 있으며, 그림 7, 8은 부하외란을 비선형성으로 보고 플랜트에 인가한 경우의 출력응답이다. 그림 6,7은 PID제어기를 적용한 경우의 동조결과로서 출력응답 파형으로부터 알 수 있는 바와 같이 동정성능이 우수하게 나타났다. 그림 8은 PI제어기에 대한 동조결과이다. 아래의 출력응답은 모두 동일한 퍼지동정 알고리즘에 적용한 경우로서 PI제어기 보다는 PID제어기를 이용한 동조결과가 양호한 동조결과를 보여주고 있다. 그러므로 제어대상의 동특성에 따라 제어시스템 및 퍼지관계를 적절하게 조정할 필요가 있다.

### VI. 결론

퍼지제어기론은 비선형성이 강하고 모델링이 어려운 제어시스템에 적용하는 경우에 우수한 성능을 인정받고 있으며, 다양한 제어분야에서 그 필요성이 가속화되고 있다.

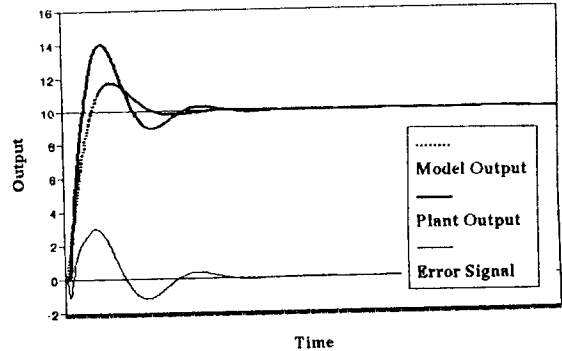
본 논문에서는 퍼지추론 알고리즘을 도입하여 폐루프 시스템 응답의 특징량으로부터 플랜트의 동정을 실행하는 방법을 제안하였고, 또 이 동정방법에 근거한 자동동조 방식을 구현하였다. 이 자동동조 방식은 특정한 동정용 신호가 없어도 광범위한 플랜트에 탄력성 있게 대응하는 것이 특징이다. 플랜트 제어의 모델로서 일반적으로 사용하고 있는 2차지연 + 데드타임 구조를 갖는 시스템을 고려하였고, 플랜트와 모델은 과도응답을 갖는 시스템으로 표현함으로써 시스템 동특성 해석의 효율을 증가시켰다.

동특성 파라미터가 변동하는 경우와 부하외란이 인가된 비선형 시스템에 대해서 본 논문이 제안한 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한 결과, 그 유효성을 확인할 수 있었다.

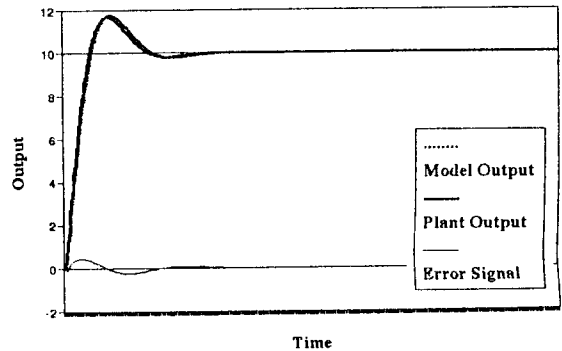
본 논문의 방법에는 위에서 기술한 바와 같이 동정 파라미터가 많아지면 퍼지추론 규칙이 복잡해진다고 하는 문제점이 남아 있다. 이러한 문제점은 적용하는 플랜트에 대응해서 해결해 가야할 것이다. 또한 퍼지동정 알고리즘과 제어시스템의 특성을 고려하여 제어기를 선정하면 고기능 제어기법으로서의 적용가능성을 높일 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] T.Soderstrom and P.Stoica., System Identification, Prentice Hall, 1988
- [2] K. J. Astrom and B.Wittenmark., Adaptive Control, Addison-Weseley, 1989
- [3]特集: 시스템 동정 - 最近의理論と應用, 計測と制御, 28-4, 289/368, 1989
- [4] Brian D.O.Anderson, YI Liu., "Controller Reduction : Concepts and Approaches" IEEE Trans. AC 34-8, pp 802/812, 1989
- [5] D. Enns., "Model Reduction for Control System Design", Dept. Aeronautics and Astronautics, Stanford Uni.CA, USA, 1984
- [6] 이동진, 이은철, 변황우, 남문현., "퍼지추론을 이용한 시스템 동정 및 자동동조", 전기학회 (하계학술대회), A, pp 214-217, 1993
- [7] K. Nomoto, M.Kondo., "The Recursive Fuzzy Reasoning and Its Application to an Auto-Tuning Controller", IWFS, 81-92, Iizuka
- [8] Iwasaki, T. and Morita, A., "Fuzzy Auto-Tuning for PID Controller with Model Classification", Proc. of NAFIPS'90, pp 90-93, 1990
- [9] Astrom, K.J., Arzen, K.E., "Expert Control", Automatica, Vol.22-3, pp 277-286, 1986
- [10] 北 森., "制御對象の 部分的 知識に 基づく 制御系の 設計法", 計測自動制御學會 論文集, 15-4, pp 549-555, 1979
- [11] Takagi, T. Sugeno, M., "Fuzzy Identification of System and Its Application to Modelling and Control", IEEE Tr.on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-15, No.1, pp 116-132, Jan/Feb, 1985.
- [12] Procyk, T. M., Mamdani, E. H., "A linguistic SOC", Automatica, Vol.15, pp15-30, 1979.
- [13] Mamdani, E. H., "Application of Fuzzy algorithms for control of simple Dynamic Plant", IEE proc. Control and Science, vol.121, No.12, pp 1585-1588, Dec.1974.
- [14] Zadeh, Lotfi A., "Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision process", IEEE Tr. on System, Man and Cybernetics,

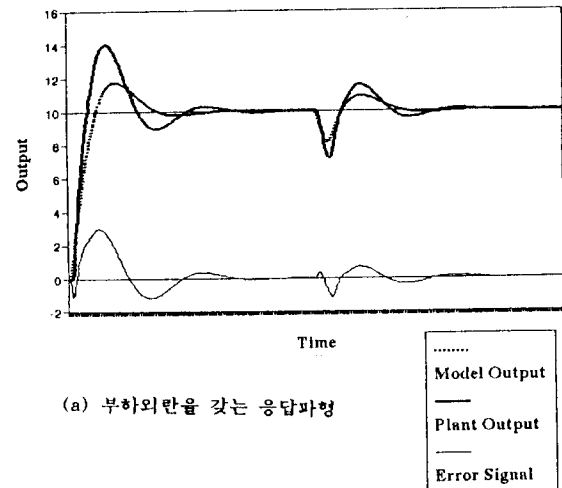


(a) 플랜트 및 모델의 응답파형  
( $\omega=1.2, \zeta=1.5, K=5$ )

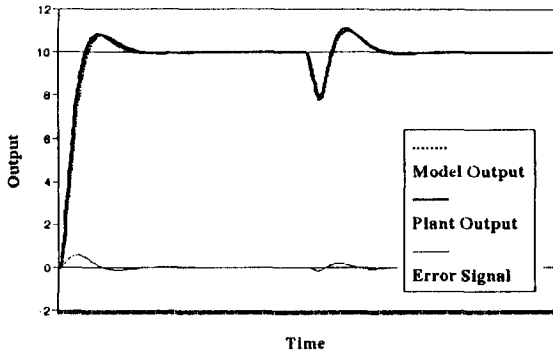


(b) 동조결과와 출력응답(5회)

그림 6. 퍼지추론을 이용한 동정 및 자동동조 결과(PID)



(a) 부하외란을 갖는 응답파형



(b) 부하외란을 인가한 경우의 동조결과

그림 7. 부하외란을 포함한 동정 및 자동동조 결과(PID)

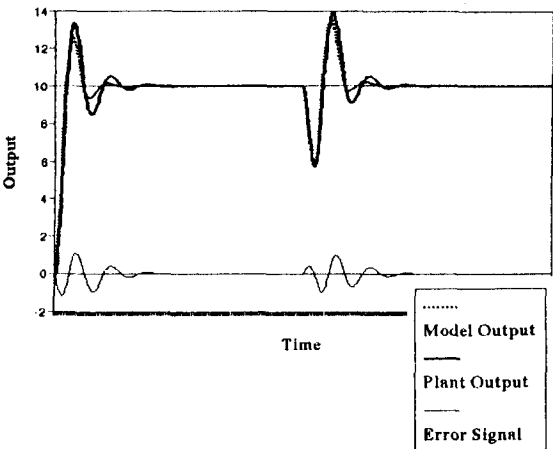
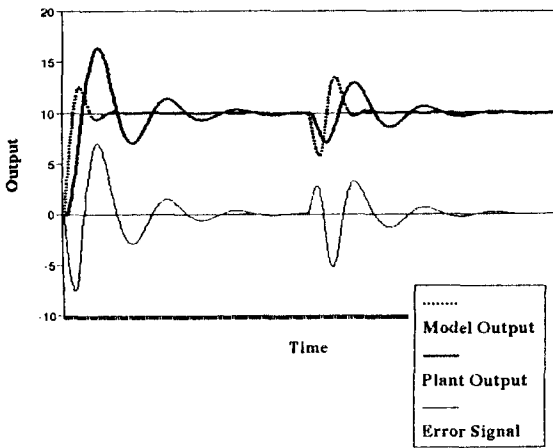


그림 8. 부하외란을 포함한 동정 및 자동동조 결과(PI)