

論文 98-35C-3-9

묘사함수를 이용한 퍼지 제어 시스템의 자기진동 현상의 예측 - 정적 경우

(The Prediction of Self-Excited Oscillation of a Fuzzy Control System Based on the Describing Function - Static Case)

金殷泰*, 盧興植*, 金東淵**, 朴玟用*

(Euntai Kim, Heungsik Noh, Dong Yon Kim, and Mignon Park)

요 약

자기 진동현상은 비선형 시스템의 고유한 성질이다. 이 현상은 비선형 시스템에 있어서 중요한 요소로 비선형 시스템을 설계할 때 안정성과 함께 고려하여야 하는 중요한 성질이다. 본 논문에서는 정적 퍼지 제어기에 의해 제어되는 시스템의 자기 진동 현상에 대해 다룬다. 우선 정적 퍼지 제어기의 묘사함수를 유도하고 이를 이용하여 퍼지 제어 시스템의 자기 진동 현상을 예측하도록 한다. 퍼지 제어기의 묘사함수를 유도하는 일은 대단히 복잡한 일로 이를 간단히 하기 위해 퍼지제어기의 구조를 간단한 형태로 가정한다. 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션에서는 유도한 묘사함수를 이용하여 퍼지 시스템의 자기 진동 현상을 예측한다.

Abstract

The self-excited oscillation is the phenomenon which can be observed in the systems composed of nonlinear elements. The phenomenon is of fundamental importance in nonlinear systems and, as far as the design of a nonlinear system is concerned, it should be considered along with the stability analysis. In this paper, the oscillation of a system controlled by a static nonlinear fuzzy controller is theoretically addressed. First, the describing function of a static fuzzy controller is derived and then, based on the derived describing function, self-excited oscillation of the system controlled by a static fuzzy controller is predicted. To obtain the describing function of the static fuzzy controller, a simple structure is assumed for the fuzzy controller. Finally, computer simulation is included to show an example where the describing function given in the paper is used to predict the self-excited oscillation of a fuzzy-control system.

I. 서 론

1965년 Zadeh에 의해 제안된 퍼지 이론 [1]은

* 正會員, 延世大學校 電子工學科

(Yonsei University)

** 正會員, 安城 産業 大學校 電子工學科

(Ansung National University)

接受日字:1997年1月27日, 수정완료일:1998年2月18日

여러 공학 및 과학의 실제 응용 면에서 성공적으로 적용되어 왔다. 특히 퍼지 이론은 제어 분야에서 뛰어난 효과를 발휘하여^{[2] [3]}, 1974년 Mamdani가 스티븐진 제어에 퍼지 이론을 적용한 이래 [4] 최근 Sugenoga가 퍼지 이론을 이용하여 무인 헬기를 제어하기 까지 많은 성공적인 적용례를 찾아 볼 수 있다^[5].

또 이런 퍼지 이론의 실제적인 응용과 함께 제어기를 이용한 퍼지 시스템에 대한 이론적인 연구도 활발

히 진행되어 왔다. 그러나 이런 연구는 모두 선형 시스템에서와 같이 안정성^[6], 가제어성^[7], 가관측성, 강인성^[8] [9] [10] 등에 집중되어 왔으며, 퍼지 시스템이 비선형 시스템이기 때문에 갖는 다른 특성에 대해서는 별 이론적인 연구가 진행되지 않았다.

그 예로 자기 진동 현상은 비선형 시스템의 설계, 해석에서 안정성과 함께 가장 중요한 요소 중에 하나이지만 퍼지 시스템의 자기 진동 현상에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다. Hara와 Ishibe는 [11]에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 퍼지 제어기에서 자기 진동 현상이 발생할 수 있음을 보였고, Kickert와 Mamdani는 [12]에서 퍼지 제어기를 multi-level 릴레이로 근사하여 퍼지 제어기의 자기 진동 현상의 발생을 예측하려 하였다. 그러나 퍼지 시스템의 자기 진동 현상에 대한 이론적인 접근은 미미한 상태이다.

본 논문에서는 일반 비선형 제어 이론에서 자기 진동 현상의 예측에 사용되는 묘사 함수(describing function) 이론^[13] [14]을 이용하여 정적 퍼지 제어기를 이용하는 시스템의 자기 진동 현상을 이론적으로 고찰한다. 묘사 함수는 비선형 제어 이론에서 자기 진동의 예측에 널리 사용되는 방법으로 본 논문에서는 퍼지 제어기의 묘사함수를 유도하고 이를 이용하여 퍼지 제어 시스템의 자기 진동 현상을 예측한다. 퍼지 제어기의 묘사함수를 유도하는 일은 대단히 복잡한 일로 이를 간단히 하기 위해 퍼지제어기의 구조를 간단한 형태로 가정하도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 정적 퍼지 제어기의 구성에 대해 간략히 살펴보고 3장에서는 묘사함수를 유도하기 위해 그 구조를 단순한 형태로 가정한다. 4장에서는 자기 진동의 해석에 필수적인 툴(tool)인 묘사함수를 설명한다. 5장에서는 정적 퍼지 시스템의 묘사 함수를 유도하고, 6장에서는 5장에서 유도된 결과를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행한다. 끝으로 7장에서는 본 논문을 정리한다.

II. 정적 퍼지 제어기의 구성 및 퍼지 기저 함수

일반적으로 퍼지 제어기는 다음의 4가지 요소로 구성될 수 있다: 퍼지화기(fuzzifier), 퍼지 규칙 베이스, 퍼지 추론 엔진, 비퍼지화기(defuzzifier)^[2] [3] [14]. 이제 퍼지 규칙 베이스가 식 (1)과 같이 표현되는 일

반적인 정적 제어를 생각한다.

$$R^i : \text{If } x \text{ is } A_i, \text{ then } u \text{ is } u_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

여기서 전진부 소속 함수 A_i 는 퍼지 소속 함수이며 u_i 는 퍼지 수일 수도 있고 싱글톤 (singleton)일 수도 있다. 특히 퍼지화기로 싱글톤 퍼지화기, 퍼지 규칙 및 추론의 T-norm으로는 곱셈 추론, 비퍼지화기로는 중심 평균법(center average)을 쓰면 식 (1)의 퍼지 규칙 베이스 추론식은 다음과 같이 나타난다.

$$u = f(x) = \sum_i \left(\frac{A_i(x)}{\sum_i A_i(x)} \right) u_i = \sum_i p_i(x) u_i, \quad (2)$$

여기서 $p_i(x)$ 는 $p_i(x) = \frac{A_i(x)}{\sum_i A_i(x)}$ 로 표현되는 퍼지 기저 함수 (FBF, Fuzzy Basis Function)이다^[15]. 여기서 쓰인 중심 평균법은 최근 퍼지 추론에 많이 쓰이는 방법으로 퍼지 제어 시스템의 이론적 해석에 적당한 방법이다. 중심 평균법의 자세한 설명은 참고 문헌 [16]에서 찾아 볼 수 있다.

III. 정적 퍼지 제어기 구조의 간략화

일반적인 비선형 퍼지 제어기의 묘사함수를 유도하는 일은 대단히 복잡한 일로 이를 간단히 하기 위해 퍼지 제어기의 구조를 간단한 형태로 가정하여야 한다. 본 장에서는 앞으로 사용하게 될 정적 퍼지 제어기의 구조를 간략한 형태로 가정한다.

정적 퍼지 제어기는 일반적으로 식(3)로 표현되며 구조를 간략히 하기 위하여 본 논문에서 사용되는 퍼지 제어기는 조건 (C1)과 (C2)를 만족하는 것으로 한다.

$$R^{-p} : \text{If } x \text{ is } A_{-p}, \text{ then } u \text{ is } u_{-p}$$

...

$$R^0 : \text{If } x \text{ is } A_0, \text{ then } u \text{ is } u_0$$

...

$$R^i : \text{If } x \text{ is } A_i, \text{ then } u \text{ is } u_i$$

...

$$R^p : \text{If } x \text{ is } A_p, \text{ then } u \text{ is } u_p$$

$$(i = -p, \dots, p)$$

(3)

여기서 u_i 는 싱글톤이다.

IV. 묘사 함수

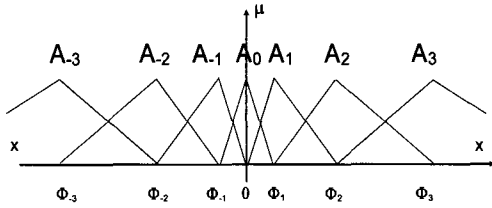


그림 1. 전진부 소속 함수
Fig. 1. Premise membership functions.

(C1) 전진부 소속 함수 A_i 는 그림 1과 같이 원점을 중심으로 대칭적으로 분포되어 있으며 비모순적(consistent)인 삼각형(triangular) 함수로 식 (4)로 표현된다.

$$A_i(x) = \begin{cases} \frac{x - \phi_{i-1}}{\phi_i - \phi_{i-1}} & \text{if } \phi_{i-1} \leq x < \phi_i \\ \frac{x - \phi_{i+1}}{\phi_i - \phi_{i+1}} & \text{if } \phi_i \leq x < \phi_{i+1} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $\phi_{-i} = -\phi_i$

(C2) 후진부는 다음의 기함수 성질(oddness)을 만족한다.

$$u_{-i} = -u_i$$

이 가정에 의해 전진부는 우함수의 성질을 갖고 후진부는 기함수의 성질을 갖으므로 식(2)로 표현되는 전체 시스템은 기함수의 성질을 갖는다.

Remark 1. 위의 (C1)(C2)의 조건을 만족하는 정적 퍼지 제어기는 다음의 성질을 갖는다.

$$(R1) \quad p_i(x) = \frac{A_i(x)}{\sum_{i=-p}^p A_i(x)} = A_i(x)$$

(C1)에서 전진부가 비모순적(consistent)인 삼각형(triangular)함수이므로 그림 1과 같이 모든 x 에 대해 두 개의 규칙만 여기(fire)되며 그 두 함수값의 합은 1이 된다. 즉 $\phi_n \leq x < \phi_{n+1}$ 일 때

$$\sum_{i=-p}^p A_i(x) = A_n(x) + A_{n+1}(x) = \frac{x - \phi_{n+1}}{\phi_n - \phi_{n+1}} + \frac{x - \phi_n}{\phi_{n+1} - \phi_n} = 1$$

$$(R2) \quad p_{-i}(-x) = p_i(x) \quad (\text{by C2})$$

본 장에서는 퍼지 제어기의 묘사함수를 설명하기에 앞서 일반적인 묘사함수에 대하여 설명한다. 묘사 함수는 선형 시스템의 연구에서 사용했던 주파수 응답법을 비선형 시스템에서 응용하기 위해 만든 방법으로 근사적으로 비선형 시스템을 주파수 영역에서 해석하기 위해 사용한다. $u = f(x)$ 과 같은 정적 시스템의 경우, 입력 $x(t) = A \sin \omega t$ 에 대한 출력의 Fourier 전개는 다음과 같다.

$$u(t) \equiv u(x = A \sin \omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

여기서

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(t) dt \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(t) \cos \omega t dt \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(t) \sin \omega t dt \quad (7)$$

묘사함수는 제어 대상이 LPF의 특성이 있다는 가정 하에 입력 정현파에 대한 출력의 첫번째 하모닉(harmonic)만을 고려한다. 즉 $u(t) \approx a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t$ 으로 복소수로는 $u(t) \approx (b_1 + ja_1)e^{j\omega t}$ 이고 묘사함수는 다음과 같이 정의된다.

$$N(A, \omega) = \frac{(b_1 + ja_1)e^{j\omega t}}{Ae^{j\omega t}} = \frac{1}{A}(b_1 + ja_1) \quad (8)$$

V. 퍼지 시스템의 묘사 함수

우선 퍼지 제어기를 사용하는 그림 2의 시스템을 생각한다. 정적 퍼지 제어기를 포함한 전체 시스템의 자기 진동 현상을 조사하기 위해서는 퍼지 정적제어기의 묘사함수가 필요하게 된다. 이를 구하기 위해 다음의 보조정리를 참조한다.

보조정리 1

퍼지 제어기가 (C1)(C2)의 성질을 만족하는 퍼지 제어기 $u = \sum_{i=-p}^p p_i(x) u_i$ 는 $x = A \sin \omega t$ 일 때 시간 t 에 대해 기함수이다.

(증명) $\forall t_1 \in R$ 에 대하여 $x_1 = A \sin \omega t_1$ 이고 $\phi_k \leq x_1 < \phi_{k+1}$ 이면

$$u(t_1) = p_k(x_1)u_k + p_{k+1}(x_1)u_{k+1}.$$

따라서 $u(-t_1) = \sum_{i=-p}^q p_i(-x)u_i = p_{-k-1}(-x_1)u_{-k-1}$
 $+ p_{-k}(-x_1)u_{-k} = -p_{k+1}(x_1)u_{k+1} - p_k(x_1)u_k$ ((C1)

과 (R1)에 의해) $= -u(t_1)$

$\therefore x(t) = A \sin \omega t$ 에 대하여 $u(t) = \sum_{i=-p}^q p_i(x(t))u_i$ 는
 기함수이다.

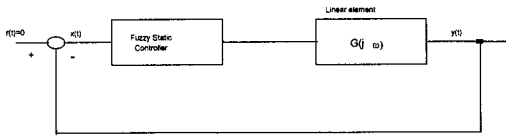


그림 2. 정적 퍼지 제어를 사용하는 제어 시스템
 Fig. 2. A plant controlled by a fuzzy static controller.

보조정리 2

(C1)(C2)의 성질을 갖는 퍼지 제어기 $u = \sum_{i=-p}^q p_i(x)u_i$
 에 대하여 입력 $x = A \sin \omega t$ 이면 $u(t) = u(\frac{\pi}{\omega} - t)$ 이다.

(증명)

$\forall t_1 \in R$ 에 대하여 $x_1 = A \sin \omega t_1$ 일 때 $t_2 = \frac{\pi}{\omega} - t_1$ 에
 대해 $x_2 \equiv x(t_2) = A \sin \omega t_2 = A \sin \omega (\frac{\pi}{\omega} - t_1) = A \sin \omega t_1$
 $= x_1 \therefore u(t_1) = u(t_2) = u(\frac{\pi}{\omega} - t_1)$

보조정리 3

(C1)(C2)의 성질을 갖는 퍼지 제어기에 대하여 입력
 $\Phi_k \leq x_1 < \Phi_{k+1}$ 일 때

제어기 $u = \sum_{i=-p}^q p_i(x)u_i = \frac{\Delta u_k}{\Delta \Phi_k} x + \frac{1}{\Delta \Phi_k} (\Phi_{k+1}u_k - \Phi_k u_{k+1})$
 로 표현된다.

(여기서 $\Delta u_k \equiv u_{k+1} - u_k$, $\Delta \Phi_k \equiv \Phi_{k+1} - \Phi_k$ 이다.)

(증명)

$$\begin{aligned} u &= \sum_{i=-p}^q p_i(x)u_i = p_k(x)u_k + p_{k+1}(x)u_{k+1} \\ &= (-\frac{x}{\Delta \Phi_k} + \frac{\Phi_{k+1}}{\Delta \Phi_k})u_k + (\frac{x}{\Delta \Phi_k} - \frac{\Phi_k}{\Delta \Phi_k})u_{k+1} \\ &= \frac{\Delta u_k}{\Delta \Phi_k} x + \frac{1}{\Delta \Phi_k} (\Phi_{k+1}u_k - \Phi_k u_{k+1}) \end{aligned}$$

정리 1.

(C1)(C2)의 성질을 갖는 정적 퍼지 제어기
 $u = \sum_{i=-p}^q p_i(x)u_i$ 의 묘사함수는 ω 에 무관하고 A 에만

의존하는 실수로 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} N(A, \omega) &= N(A) = \frac{b_1}{A} = \\ &= \frac{4}{\pi A} \sum_{i=0}^n \left\{ \frac{\Delta u_i A}{2 \Delta \Phi_i} ((\gamma_{i+1} - \sin \gamma_{i+1} \cos \gamma_{i+1}) - (\gamma_i - \sin \gamma_i \cos \gamma_i)) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2 \Delta \Phi_i} (\Phi_i u_{i+1} - \Phi_{i+1} u_i) (\cos \gamma_{i+1} - \cos \gamma_i) \right\} \end{aligned}$$

여기서 n 은 $\Phi_n \leq A < \Phi_{n+1}$, ($n > 0$)을 만족시키는
 A 에 따라 변하는 값이며 새로운 변수 γ_i 의 정의는
 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_0 &\equiv 0 \\ \gamma_i &\equiv \sin^{-1}(\frac{\Phi_i}{A}) \quad (i=1, \dots, n, 0 < \gamma_i < \frac{\pi}{2}) \\ \leftarrow A \sin \gamma_i &= \Phi_i \\ \gamma_{n+1} &\equiv \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

(증명) A 가 $\Phi_n \leq A < \Phi_{n+1}$, ($n > 0$)이고 퍼지 제어기
 $u(x) = \sum_{i=-p}^q p_i(x)u_i$ 에 입력 $x = A \sin \omega t$ 을 가할 때,
 $u(t) \equiv \sum_{i=-p}^q p_i(x)u_i = A \sin \omega t u_i$ 의 식 (5)(6)(7)(8)로 표현
 되는 묘사함수는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(t) d\omega t = 0 \text{ (보조정리 1에 의해)} \\ a_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(t) \cos \omega t d\omega t = 0 \text{ (보조정리 1에 의해)} \\ b_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(t) \sin \omega t d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \sin \omega t d\omega t \\ &\quad \text{(보조정리 1에 의해)} \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \sin \omega t d\omega t = \frac{2}{\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} u(t) \sin \omega t d\omega t \right. \\ &\quad \left. + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} u(t) \sin \omega t d\omega t \right) \\ &= \frac{2}{\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} u(t) \sin \omega t d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}}^0 u(\frac{\pi}{\omega} - k) \sin(\pi - \omega k) \right. \\ &\quad \left. d(-\omega k) \right) \text{ (}\pi - \omega t \text{를 } \omega k \text{로 치환)} \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(t) \sin \omega t d\omega t \text{ (보조정리 2에 의해)} \end{aligned}$$

여기서 새로운 변수를 정의한다.

$$\gamma_0 \equiv 0, \gamma_i \equiv \sin^{-1}(\frac{\Phi_i}{A}) \quad (i=1, \dots, n, 0 < \gamma_i < \frac{\pi}{2}), \gamma_{n+1} \equiv \frac{\pi}{2}$$

이제 b_1 은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{4}{\pi} \left(\int_{\gamma_0}^{\gamma_1} u(t) \sin \omega t d\omega t + \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} u(t) \sin \omega t d\omega t \right. \\ &\quad \left. + \dots + \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} u(t) \sin \omega t d\omega t \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4}{\pi} \sum_{i=0}^{\gamma_i+1} \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} u(t) \sin \omega t \, d\omega t \\
 &= \frac{4}{\pi} \sum_{i=0}^{\gamma_i+1} \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} \left\{ \frac{\Delta u_i}{\Delta \phi_i} A \sin \omega t + \frac{1}{\Delta \phi_i} (\phi_{i+1} u_i - \phi_i u_{i+1}) \right\} \sin \omega t \, d\omega t \\
 &\text{(보조정리 3에 의해)} \\
 &= \frac{4}{\pi} \sum_{i=0}^{\gamma_i+1} \left\{ \frac{\Delta u_i A}{2\Delta \phi_i} ((\gamma_{i+1} - \sin \gamma_{i+1} \cos \gamma_{i+1}) - (\gamma_i - \sin \gamma_i \cos \gamma_i)) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\Delta \phi_i} (\phi_i u_{i+1} - \phi_{i+1} u_i) (\cos \gamma_{i+1} - \cos \gamma_i) \right\}
 \end{aligned}$$

VI. 시뮬레이션

본 장에서는 앞에서 유도한 퍼지 제어기의 묘사함수를 이용하여 실제 퍼지 제어기를 포함한 시스템의 자기진동 현상을 예측하고 이를 설계에 응용하도록 한다. 본 시뮬레이션에서 사용하는 예는 참고문헌 [17]에서 사용된 것과 일치한다. 우선 산부인과 병원에서 사용하는 인큐베이터의 온도를 퍼지 제어기를 이용하여 제어한다고 할 때 인큐베이터는 다음의 3차 식으로 주어진다 가정한다.

$$H(s) = \frac{1}{s^3 + 5s^2 + 6s + 1} \tag{9}$$

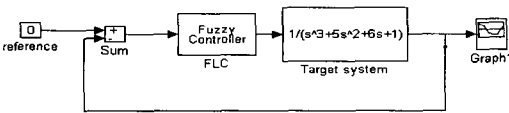


그림 3. 예제 시스템
Fig. 3. Example system.

그림 3은 본 시스템을 퍼지 제어기를 이용하여 제어하는 블록도이다. 이제 x_d 를 원하는 적정 온도(desired temperature), x 를 실제 온도 (actual temperature), 또 오차를 $e = x_d - x$ 라 할 때, 퍼지 제어기의 규칙은 보통 인간의 경험에 따라 추우면 온도를 높이고 (e 가 양수이면 제어 입력 u 를 양으로 하고), 더우면 온도를 낮추는 (e 가 음수이면 제어 입력 u 를 음으로 하는) 규칙으로 구성한다. 이제 다음과 같은 5개의 규칙으로 구성된 퍼지 제어기를 설계한다.

- R^1 : If e is NB, then u is Unb
- R^2 : If e is NS, then u is Uns
- R^3 : If e is ZR, then u is Uzr
- R^4 : If e is PS, then u is Ups
- R^5 : If e is PB, then u is Upb

여기서 퍼지 제어기의 각 파라미터는 그림 4와 같이 구성되어 있다. 우선 퍼지 제어기의 파라미터는 2장에서 언급한 (C1)과 (C2)의 조건을 만족시키도록 설계된다. 또 참고 문헌 [8]에 언급된 바와 같이 퍼지 제어기의 설계 시, 원점 부근에서는 소속 함수를 밀하게 (densely) 배치하고 원점 밖에서는 소속 함수를 소하게 (sparsely) 배치하며 원점 부근의 출력을 급격히 크게 한다. 이제 퍼지 제어기의 파라미터를 다음과 같이 설계한다.

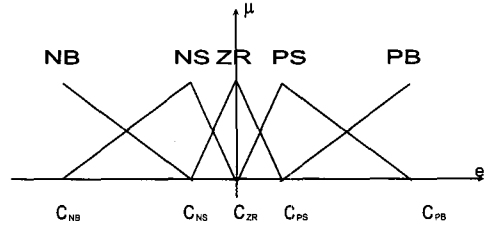


그림 4. 퍼지 제어기의 파라미터
Fig. 4. Parameters of a fuzzy controller.

표 1. 자기진동이 발생하는 퍼지 제어기
Table 1.

C_{nb}	C_{ns}	C_{zr}	C_{ps}	C_{pb}	U_{nb}	U_{ns}	U_{zr}	U_{ps}	U_{pb}
-1.0	-0.02	0.0	0.02	1.0	-1.0	-0.7	0	0.7	1.0

표 1에서 보인 퍼지 제어기의 변수를 2장에서 사용한 변수 표기법으로 바꾸면,

$$\begin{aligned}
 A_{-2} &= NB, \quad A_{-1} = NS, \quad A_0 = ZR, \quad A_1 = PS, \quad A_2 = PB \\
 \phi_{-2} &= C_{nb}, \quad \phi_{-1} = C_{ns}, \quad \phi_0 = C_{zr}, \quad \phi_1 = C_{ps}, \quad \phi_2 = C_{pb} \\
 u_{-2} &= U_{nb}, \quad u_{-1} = U_{ns}, \quad u_0 = U_{zr}, \quad u_1 = U_{ps}, \quad u_2 = U_{pb}
 \end{aligned}$$

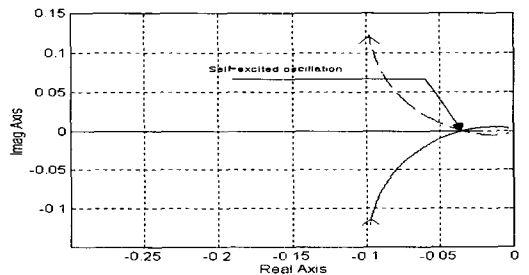


그림 5. 확장 나이퀴스트도 (자기진동이 있는 경우)
Fig. 5. Extended 나이퀴스트도 plot. (with self-excited oscillation)

위의 파라미터를 갖는 퍼지제어기에 대해서 4장에서 유도한 묘사함수를 이용하여 확장 나이퀴스트도를 그린다. 그림 5에서 보는 바와 같이 모든 초기 값에 대

해서 자기 진동 현상이 발생할 것을 예측할 수 있다. 그림 6은 초기값 1, 0.5, -0.5 과 -1에 대하여 표 1의 퍼지 제어를 이용한 결과이다. 실제로 각 초기값에 대하여 자기진동이 발생함을 알 수 있다. 이제 확장 나이퀴스트도를 관측하면서 자기 진동 현상이 발생하지 않도록 퍼지 제어기의 파라미터를 조정하였다. 표 2는 새롭게 설계한 퍼지 제어기이며 그림 7은 주어진 시스템의 확장 나이퀴스트도이다.

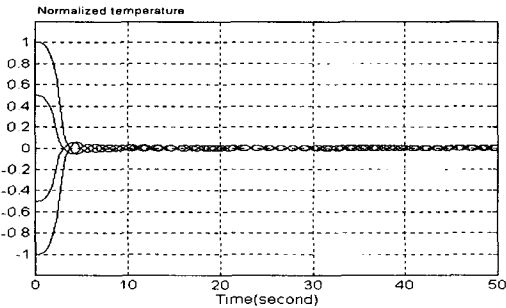


그림 6. 자기 진동 현상이 발생한 퍼지 시스템
Fig. 6. Fuzzy System with Self-excited oscillation.

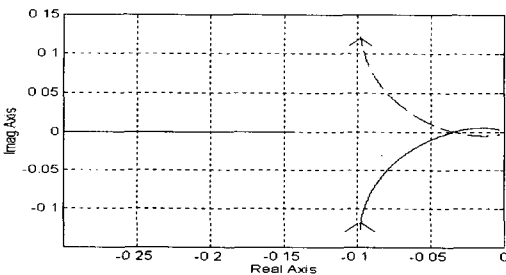


그림 7. 확장 나이퀴스트도 (자기 진동이 없는 경우)
Fig. 7. Extended 나이퀴스트 plot. (without self-excited oscillation)

표 2. 자기진동이 발생하지 않는 퍼지 제어기
Table 2.

$C_{zr} = \phi_0$	$C_{ps} = \phi_1$	$C_{pb} = \phi_2$	$U_{zr} = u_0$	$U_{ps} = u_1$	$U_{pb} = u_2$
0.0	0.1	1.0	0	0.7	1.0

$$\phi_{-2} = C_{nb} = -C_{pb} = -\phi_2$$

$$\phi_{-1} = C_{ns} = -C_{ps} = -\phi_1$$

$$u_{-2} = U_{nb} = -U_{pb} = -u_2$$

$$u_{-1} = U_{ns} = -U_{ps} = -u_1$$

그림 7의 확장 나이퀴스트도에서 보는 것처럼 표 2의 퍼지 제어의 경우 초기값에 관계없이 자기 진동 현상이 발생하지 않을 것을 예측할 수 있다. 그림 8은 초기값이 1, 0.5, -0.5, -1인 경우 실제의 출력 결과이다. 자기 진동 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

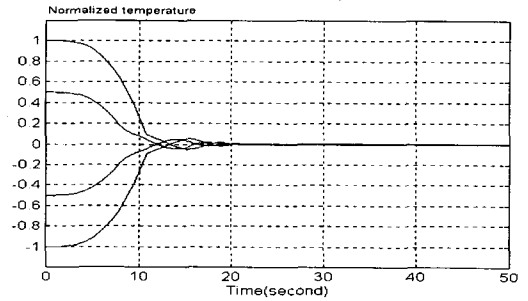


그림 8. 자기 진동 현상이 발생하지 않은 퍼지 시스템
Fig. 8. Fuzzy System without Self-excited oscillation.

VII. 결 론

자기 진동 현상은 안정성과 함께 비선형 제어에 있어 가장 중요한 문제 중에 하나이다. 본 논문에서는 정적 퍼지 제어를 사용하는 시스템에서 그 비선형 특성에 의해 발생할 수 있는 자기 진동 현상에 대한 이론적 해석의 기반을 제시한다. 해석을 간단히 하기 위해 퍼지 제어기의 구조를 퍼지 기저 함수를 이용하여 가장 보편적인 단순한 형태로 가정하였다. 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 해석의 타당성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, 338-353, 1965.
- [2] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic control - Part I," *IEEE Trans. SMC*, vol. 20, pp. 404-418, 1990.
- [3] _____, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic control - Part II," *IEEE Trans. SMC*, vol. 20, pp. 419-435, 1990.
- [4] E. H. Mamdani, "Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," *Proc. IEE*, vol. 121, no. 2, pp

1585-1588, 1974.

[5] M. Sugeno and G. K. Park, "An approach to linguistic instruction based learning and its application to helicopter flight control," *Fifth IFSA World Congress*, pp 1082-1085, 1993

[6] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control systems," *Fuzzy sets and Systems*, vol. 45, no. 2, pp. 135-156, 1992.

[7] M. Gupta, G. Trojan and J. Kiszka, "Controllability of fuzzy control systems," *IEEE Trans. SMC.*, vol. 16, no. 4, 1986.

[8] S. Y. Yi and M. J. Chung, "Systematic design and stability analysis of a fuzzy logic controller," *Fuzzy sets and Systems*, vol. 72, pp. 271-298, 1995.

[9] K. Tanaka and M. Sano, "A robust stabilization problem of fuzzy control systems and its application to backing up control of a truck-trailer," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 119-134, May 1994.

[10] S. W. Kim, E. T. Kim and M. Park, "A new fuzzy adaptive controller using the parallel structure of fuzzy controllers and its application," *Fuzzy sets and Systems*, vol. 81, pp. 205-226, 1996.

[11] Fumio Hara and Maki Ishibe, "Simulation study on the existence of limit cycle oscillation in a fuzzy control system," *Proc. of the Korea-Japan Joint Conf. on fuzzy systems and engineering*, pp. 25-28, 1992.

[12] W. J. M. Kickert and E. H. Mamdani, "Analysis of a Fuzzy Logic Controller," *Fuzzy sets and Systems*, vol. 1, pp. 29-44, 1978.

[13] J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, 1991.

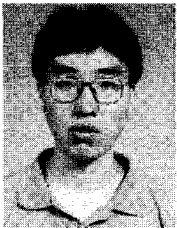
[14] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice-Hall, 1996.

[15] X. Zeng and M. G. Singh, "Approximation theory of fuzzy systems-SISO case," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 162-176, May 1994.

[16] L. X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall PTR

[17] Bernard Friedland, *Advanced Control System Design*, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, N. J., 1996

저 자 소 개



金 殷 泰(正會員)

1970년 3월 17일 생. 1992년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사,전체수석). 1994년 연세대학교 대학원 전자공학과 석사과정 졸업(공학석사). 1994년 ~ 현재 연세대학교 대학원 박사과정. 주관심분야는 지능

제어 및 모델링, 적응제어 및 자동화등임



盧 興 植(正會員)

1968년 5월 15일 생. 1991년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1993년 연세대학교 대학원 전자공학과 석사과정 졸업. 1993년 ~ 동대학원 박사과정. 주관심분야는 퍼지 및 지능 제어, 비선형 제어등임



金 東 淵(正會員)

1961년 5월 8일생. 1986년 연세대학교 전자공학과(공학사). 1988년 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1995년 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1988년 ~ 1996년 9월 (주)데이콤 근무. 1996년 9월

~ 현재 국립안성산업대학교 전자공학과 전임강사. 주관심분야는 무선통신 및 통신망 성능분석

朴 玟 用(正會員) 第 32卷, B編, 第 2號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수