

# 뉴로 퍼지 시스템을 이용한 비선형 시스템의 IMC 제어기 설계

## Design of IMC for Nonlinear Systems by Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

김 성 호, 강 정 규  
(Sung-Ho Kim and Jung-Kyu Kang)

**Abstract :** Control of Industrial processes is very difficult due to nonlinear dynamics, effect of disturbances and modeling errors. M.Morari proposed Internal Model Control(IMC) system that can be effectively applied to the systems with model uncertainties and time delays. The advantage of IMC is their robustness with respect to a model mismatch and disturbances. But it is difficult to apply for nonlinear systems. ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) which contains multiple linear models as consequent part is used to model nonlinear systems. Generally, the linear parameters in ANFIS can be effectively utilized to control a nonlinear systems. In this paper, we propose new ANFIS-based IMC controller for nonlinear systems. Numerical simulation results show that the proposed control scheme has good performances.

**Keywords :** Internal Model Control(IMC), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System(ANFIS)

### I. 서론

복잡한 산업용 공정의 제어를 위해 아직까지도 PID 제어 기법이 널리 사용되고 있다. 이는 PID 제어기의 구조적 단순성뿐만 아니라 외란처리 능력 및 실제 제어대상 프로세스와 제어기 이득 결정시 사용되는 모델링 편차에 대한 강인성에 기인한다. 그러나 실제 산업용 프로세스는 상당한 크기의 비선형성을 포함하고 있으며 따라서 선형 이론에 바탕을 둔 PID 제어기법으로는 고도의 제어성능을 달성하기 힘들다. 특히 강한 비선형성과 프로세스의 시정수보다 큰 지연시간을 갖고 있는 시스템의 경우 원하는 제어 성능을 달성케 하는 PID 제어기 이득의 선정에는 많은 어려움이 따른다[1].

최근 M. Morari 등은 구조 및 파라미터의 불확실성을 갖는 선형 시스템의 효율적 제어를 위해 IMC(Internal Model Control)를 제안한 바 있다[2]. IMC는 전형적인 제어시스템과는 달리 폐환 루프내에 제어 대상 프로세스에 대한 공칭 모델을 포함하고 있으며 프로세스와 이에 대한 공칭모델간의 출력 편차를 제어에 이용하는 구조를 갖는다. 이러한 IMC는 체계적이며 직관적으로 계통 파라미터의 불확실성과 외란 등에 대해 요구되는 제어성능 및 강인성을 동시에 만족시킬 수 있다는 특징을 갖는다. D. Rivera 등은 강인성을 갖는 PID 제어기의 이득을 구하기 위해 IMC 제어기가 구조적으로 PID 제어기와 동일함을 증명하고 IMC의 체계적인 이득 결정방법을 통해 간접적으로 PID 이득을 구한 바 있다[3]. 그러나 IMC도 선형 시스템을 기반으로 설계되며 따라서 비선형 시스템에의 직접적인 적용은 쉽지 않다는 적

용상의 한계를 갖는다.

Jang 등에 의해 제안된 퍼지-신경망(ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)은 학습능력을 갖는 신경망과 추론 기능을 갖는 퍼지이론을 융합한 것으로 비선형 시스템의 모델링 및 추론에 효과적으로 도입되고 있다[4]. 퍼지-신경망은 결론부에 입력 변수들의 선형결합으로 이루어진 구간별 선형화 모델을 갖고며 다양한 학습방법에 의해 입력의 멤버쉽 함수와 결론부의 선형 파라미터들이 조정된다. 또한 학습완료된 퍼지-신경망은 비선형 시스템의 정적 및 동적 동작을 큰 오차없이 표현할 수 있기 때문에 범용 근사기로 널리 사용되고 있다. 특히 퍼지-신경망은 기존의 다층 신경망과는 달리 내부에 비선형 시스템에 대한 구간별 선형화 모델을 갖음으로 해서 이를 비선형 시스템의 제어에 이용하고자 하는 많은 연구들이 진행된 바 있다.

본 연구에서는 불확실성을 갖는 선형 시스템의 강인 제어에 효과적으로 도입되는 IMC 제어기법에 범용 근사기로 사용되는 퍼지-신경망을 도입함으로써 비선형 시스템에도 적용이 가능한 퍼지-신경망 기반 IMC 제어기를 제안하고자 한다.

### II. 이산치 IMC 제어기

IMC 제어기는 페루프 제어시스템의 성능과 강인성 규정을 동시에 만족시키기 위해 제안되었으며 이의 구조를 나타내면 그림 1(a)과 같다.

그림 1(b)는 IMC 제어기를 전형적인 단위 폐환 제어기로 변경한 경우이며 단위 폐환 제어기  $c(z)$ 는 IMC 제어기  $q(z)$ 와 다음의 관계에 있다.

$$C(z) = \frac{q(z)}{1 - q(z) \cdot \hat{p}(z)} \quad (1)$$

그림 1(a)에서  $\hat{p}$ 는 제어 대상 프로세스의 전달함수이고,  $\hat{p}$

접수일자 : 2000. 12. 23., 수정완료 : 2001. 8. 2.

김성호 : 군산대학교 전자정보공학부(shkim@kunsan.ac.kr)

강정규 : (주)맥켈렉코리아(ggangsang@hanmail.net)

\* 본 논문은 2000년도 군산대학교 두뇌한국21사업에 의하여 일부 지원되었습니다.

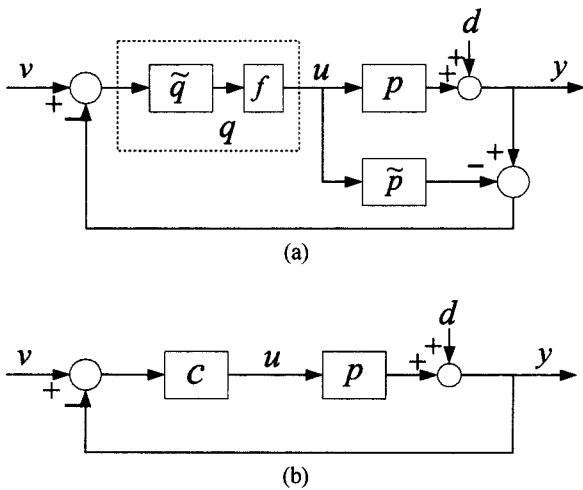


그림 1. IMC 제어기(a) 및 단위 궤환제어기 (b)의 구조.  
Fig. 1. Structure of IMC control system (a) and unit feedback control system (b).

는 이에 대한 수학적 모델을 의미한다. 만일 계통에 투입되는 외란이 없고 프로세스와 모델간의 편차가 없다면 외곽의 궤환루프는 사라지게 되며 이때 전체 제어기는 기준입력을 추종하는 개루프 제어 시스템으로 동작된다. 그러나 실제의 경우, 모델이 제어 대상 시스템을 정확히 표현하는 것은 불가능하며 따라서 전체 폐루프 시스템의 안정성 및 강인성을 동시에 보장하도록 제어기  $q = \tilde{q} \cdot f$ 를 설계해야 한다.  $\tilde{q}$ 는 모델이 제어 대상 프로세스를 정확히 표현한다는 가정하에서 공칭 제어성능을 만족하도록 설계되는 공칭 제어기이며  $f(z)$ 는 모델링 편차가 발생하였을 경우 성능과 안정성을 동시에 만족하도록 추가되는 필터이다.

1. 이산치 IMC 제어시스템에 대한 강인성 고찰

일반적으로 그림 1(b)의  $C(z)$ 는 제어 대상 시스템에 대한 공칭모델을 기반으로 하여 설계된다. 그러나 제어기 설계시 사용되는 공칭모델은 실제 대상 프로세스를 정확히 표현할 수 없으며 필연적으로 모델링 편차를 갖게 된다. 모델링 편차는 구조적 또는 비 구조적인 형태로 구분될 수 있으나 본 연구에서는 실용적 측면에서 사용하기 용이한 비구조적 불확실성을 가정한다. 모델링 편차를 정량적으로 다루기 위해 대상 프로세스의 동특성을 하나의 선형 시불변 모델로 표현하는 것이 아니라 다수의 선형 시불변 모델들의 군( $\Pi$ )으로 (2)와 같이 표현한다.

$$\Pi = \{x \mid \left| \frac{\hat{p}(e^{j\omega}) - \tilde{p}(e^{j\omega})}{\tilde{p}(e^{j\omega})} \right| \leq \bar{l}_m(\omega) \}$$
 (2)

여기서  $\hat{p}$ 는 제어 대상의 공칭모델이며,  $\bar{l}_m$ 는 주파수의 변화에 따라 크기가 변하는 곱셈 형식으로 표현된 모델링 편차들의 최대값을 의미한다. 그림 1(b)와 같은 전형적인 궤환 제어계에 있어서 제어기  $C(z)$ 가 대상 프로세스  $p(z)$ 에 대한 공칭모델  $\tilde{p}(z)$ 를 기반으로 설계될 경우, (2)로 표현되는 모델링 편차에 대해 전체 제어계가 안정하며 요구되는 제어성능을 보장받기 위해서는 다음 조건이 만족되어야 한다[2].

$$\left| \frac{\tilde{p}(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})}{1 + \tilde{p}(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})} \right| \bar{l}_m(\omega) + \left| \frac{1}{1 + \tilde{p}(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})} \right| |W(\omega)| \leq 1, \quad 0 < \omega < \frac{\pi}{T}$$
 (3)

여기서,  $W(\omega)$ 는 주파수에 따른 제어계의 성능규정을 의미한다. 따라서 그림 1(a)의 IMC 제어계에 대한 강인조건은 다음과 같다.

$$|\tilde{p}(e^{j\omega})q(e^{j\omega})| \bar{l}_m(\omega) + |1 - \tilde{p}(e^{j\omega})q(e^{j\omega})| |W(\omega)| \leq 1, \quad 0 < \omega < \frac{\pi}{T}$$
 (4)

(4)의 첫 번째 항은 모델링 편차에 대한 제어계의 안정성을 나타내며 두 번째 항은 제어계의 성능을 규정한다.

2. 공칭 제어기 설계

IMC의 공칭제어기  $\tilde{q}$ 는 제어 대상 프로세스와 모델간의 편차가 없다는 가정하에서 내부안정도 및 인과성 등의 제약 조건을 만족하면서 기준입력  $v$ 에 대해 ISE를 최소화하도록 선정되며 이는 Zafiriou 등이 제안한 정리를 이용하여 구할 수 있다[2]. 정리에 따르면 ISE를 최소화하는 IMC 공칭 제어기는 기준입력  $v$ 가 단위계단일 경우, 다음과 같이 프로세스 모델의 최소위상의 역으로 간단히 구해진다.

$$\hat{q}(z) = \frac{1}{\hat{p}_M(z)}$$
 (5)

3. IMC 제어기의 강인 안정 및 강인 성능

IMC의 공칭제어기  $\hat{q}(z)$ 는 기본적으로 모델링 편차가 없다는 가정하에 설계되기 때문에 필연적으로 발생하는 모델링 편차에 대한 고려가 요구되며 이를 위해서는 (4)의 조건이 만족되어야 한다. 일반적으로 모델링 불확실성을 나타내는  $\bar{l}_m$ 는 고주파 영역에서 1보다 큰 값을 갖게 되며 (4)의 조건을 만족시키기 위해 다음과 같이 표현되는 저역 통과필터  $f(z)$ 를 도입한다.

$$f(z) = \frac{(1-a)z}{z-a}$$
 (6)

III. 퍼지-신경망의 구조 및 특성

Jang 등에 의해 제안된 퍼지-신경망은 퍼지 시스템의 추론 능력과 신경망의 학습 능력을 결합한 것으로 다음과 같은 언어적 규칙을 신경망으로 표현한 것이다.

Rule 1: If  $x$  is  $A_1$  and  $y$  is  $B_1$ , then  $h_1 = a_1x + b_1y + c_1$

Rule 2: If  $x$  is  $A_2$  and  $y$  is  $B_2$ , then  $h_2 = a_2x + b_2y + c_2$

여기서  $x, y$ 는 입력,  $A_i, B_i$ 는 각 입력에 대한 소속 함수,  $h_i$ 는 각 규칙에서의 출력이며,  $a_i, b_i, c_i$ 는 각 규칙에서의 입력에 대한 선형 파라미터를 의미한다.

학습완료된 퍼지-신경망의 입력  $x, y$ 에 대한 최종 출력은 다음과 같이 퍼지-신경망 후건부 선형 파라미터의 하중화로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} h_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} h_2 \\
 &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} (a_1 x + b_1 y + c_1) + \frac{w_2}{w_1 + w_2} (a_2 x + b_2 y + c_2) \\
 &= (\frac{w_1 a_1}{w_1 + w_2} + \frac{w_2 a_2}{w_1 + w_2}) x + (\frac{w_1 b_1}{w_1 + w_2} + \frac{w_2 b_2}{w_1 + w_2}) y + (\frac{w_1 c_1}{w_1 + w_2} + \frac{w_2 c_2}{w_1 + w_2})
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

여기서,  $w_i$ 는 입력 변수  $x, y$ 에 대한  $i$ -번째 선형모델의 적합도를 의미하며  $\bar{w}_i$ 는 하중화된  $i$ -번째 선형모델의 적합도를 의미한다.

**IV. ANFIS 기반 IMC 제어기의 구조**

본 연구에서는 다음과 같이 표현되는 단일 입력력 이산치 비선형 시스템에 대한 IMC 제어기를 설계하고자 한다.

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-n); u(k-1), \dots, u(k-m)) \tag{8}$$

여기서  $y(k), u(k)$ 는 비선형 시스템의 출력 및 입력을 그리고  $f(\cdot)$ 는 미지의 비선형 함수를 나타낸다. 또한 양의  $n, m$ 은 각각 출력 및 입력의 차수를 의미한다. 상기 시스템을 위한 IMC 제어기를 나타내면 그림 2와 같다.

그림에서  $D$ 는 단위 시간지연을 나타내며  $NM$ 은 제어대상 비선형 시스템의 입/출력 데이터 및 이의 지연된 신호들에 의해 학습 완료된 퍼지-신경망을 나타낸다.  $NM$ 은 제어대상 프로세스로부터의 입력 및 자신의 지연된 출력을 입력받아 병렬모드로 구동되며 비선형 시스템에 대한 공칭모델의 역할을 수행한다.

**1. 퍼지-신경망 기반 공칭모델**

(8)로 표현되는 비선형 시스템은 전건부 입력변수의 수와 각 입력변수에 할당된 소속함수 수의 곱만큼의 선형화 모델을 갖는 퍼지-신경망에 의해 모델링될 수 있다.  $l$ 개의 선형화모델 중  $i$ 번째 시스템 표현 규칙을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M^i: & \text{If } y(k-1) \text{ is } F_{11}^i, \dots, u(k-1) \text{ is } F_{21}^i, \dots, u(k-m) \text{ is } F_{2m}^i \\
 & \text{Then } y(k)^i = a_0^i + a_1^i y(k-1) + \dots + a_n^i y(k-n) \\
 & \quad + b_1^i u(k-1) + \dots + b_m^i u(k-m) \quad (i=1, 2, \dots, l)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

(9)의 후건부를 z-변환하면 다음과 같으며

$$\begin{aligned}
 M^i: & \text{If } y(k-1) \text{ is } F_{11}^i, \dots, u(k-1) \text{ is } F_{21}^i, \dots, u(k-m) \text{ is } F_{2m}^i \\
 & \text{Then } \frac{Y(z)^i}{U(z)^i} = \frac{b_1^i z^{-1} + \dots + b_m^i z^{-m}}{1 - a_1^i z^{-1} - \dots - a_n^i z^{-n}} + D(z)^i \quad (i=1, 2, \dots, l)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

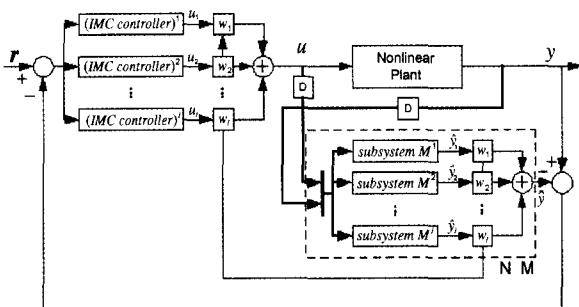


그림 2. 제안된 IMC 제어 시스템의 구조.  
Fig. 2. Structure of the proposed IMC system.

여기서  $D(z)^i$ 은 비선형 시스템을  $i$ 번째의 모델로 표현하였을 경우 발생하게 되는 모델링 편차를 의미하며 전달함수 표현시 고려하지 못한 선형화 모델 파라미터 중 직류 바이어스항( $a_0^i$ ) 등이 포함된다.

**2. 퍼지-신경망기반 IMC 제어기 설계**

전절에서 구한 퍼지-신경망 후건부의 구간별 선형화 모델에 대해 전체 폐루프 제어시스템의 안정도 및 강인성을 보장할 수 있는 각각의 IMC 제어기는 (9)의 전건부와 동일한 구조를 갖으며 후건부에는 IMC 제어기를 갖는다. 따라서  $l$ 개의 퍼지-신경망 기반 IMC 제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \text{IMC}^i: & \text{If } y(k-1) \text{ is } F_{11}^i, \dots, u(k-1) \text{ is } F_{21}^i, \dots, u(k-m) \text{ is } F_{2m}^i \\
 & \text{Then } U^i(z) = q^i(z) \cdot E(z) \quad (i=1, 2, \dots, l)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

따라서 IMC 제어기의 최종 출력은 다음과 같다.

$$u(k) = \sum_{i=1}^l w_i \cdot X \text{ output from IMC}^i \tag{12}$$

여기서,  $\text{IMC}^i$ 는 퍼지-신경망의 구간별 선형 모델을 기반으로 (4)를 만족하도록 설계되는  $i$ -번째의 IMC 제어기이다.  $i$ -번째 제어기는 비선형 시스템을 국부적으로 안정하게 할 수는 있으나 전 영역에 대한 강인성을 보장할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 퍼지-신경망과 실제 비선형 시스템간의 모델링 편차를 정량화한 후,  $l$ 개의 IMC 제어기가 고정된 최대 모델링 편차에 대해 안정하면서도 요구되는 제어 성능을 갖도록 제어기를 설계하고자 한다. 가정된 최대 모델링 편차  $\bar{w}_m(w)$ 에 대해  $i$ 번째 IMC 제어기가 안정함과 동시에 요구되는 제어 성능을 갖도록 하기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned}
 & |\hat{p}_i(e^{j\omega}) \hat{q}_i(e^{j\omega}) \hat{f}_i(e^{j\omega})| \bar{w}_m(w) + |1 - \hat{p}_i(e^{j\omega}) \hat{q}_i(e^{j\omega}) \hat{f}_i(e^{j\omega})| W(w) \leq 1, \\
 & 0 < \omega < \frac{\pi}{T}, \quad (i=1, 2, \dots, l)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

(13)에서  $\hat{p}_i(z)$ 는 퍼지-신경망의  $i$ -번째 선형모델을 의미하며  $\hat{q}_i(z)$ 는  $\hat{p}_i(z)$ 로부터 구해지는  $i$ -번째 공칭제어기를 의미한다. 또한  $\hat{f}_i(z)$ 는  $i$ -번째 공칭제어기에 첨가되어 조건을 만족하도록 도입되는 디지털 필터이다.

**V. 적용 시뮬레이션**

본 연구에서 제안한 제어기의 유용성 확인을 위해 다음과 같은 비선형 수치시스템에 적용하고자 한다.

$$y(k+1) = \frac{y(k)y(k-1)[y(k)+25]}{1+y^2(k)+y^2(k-1)} + u(k) \tag{14}$$

**1. IMC 제어기 및 필터의 설계**

사용된 퍼지-신경망은 3개의 입력( $u(k-1), y(k-1), y(k-2)$ )과 각 입력당 2개의 소속함수를 할당하였기 때문에 선형화 모델은 모두 8개가 된다. 각 모델에 대한 공칭 제어기는 이들의 역으로 구할 수 있다. 또한 (14)로 표현되는 비선형 시

시스템은 동작점에 따라 앞서 구한 8개의 구간별 선형모델로 근사화될 수 있기 때문에 이는 한정된 범위내에서 섭동하는 파라미터를 갖는 하나의 선형모델로 간주될 수 있다. 한정된 범위내의 섭동 파라미터를 갖는 시스템에 대한 모델링 편차의 주파수 특성을 나타내면 그림 3과 같다.

그림에서 실선은 최대 모델링 편차,  $\bar{l}_m(\omega)$ 를 나타낸다. 따라서  $\bar{l}_m(\omega)$ 로 표현되는 모델링 편차에 대해 강인한 특성을 갖는 IMC 제어기를 설계하기 위해서는 각각의 IMC 제어기가 (13)을 만족하도록 선정되어야 한다. 8개의 모델 중  $\hat{p}_1(z)$ 에 대한 필터계수  $\alpha$ 에 따른 주파수 특성을 나타내면 그림 4와 같다.

그림으로부터 필터  $\hat{f}_1(z)$ 의  $\alpha$ 는 0.63보다 커야 함을 알 수 있다. 본 연구서 제안된 기법과 단일 선형모델을 갖는 IMC 제어기와의 응답특성을 비교하였으며 이를 나타내면 그림 5와 같다.

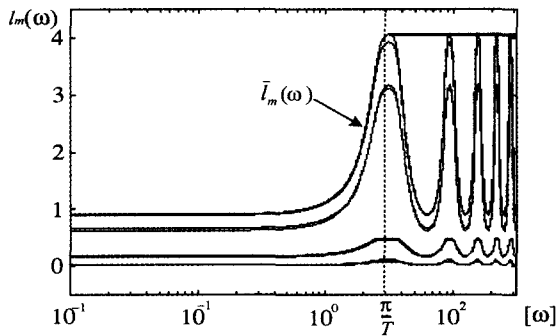


그림 3. 주파수에 따른 모델링 편차.  
Fig. 3. Modelling error.

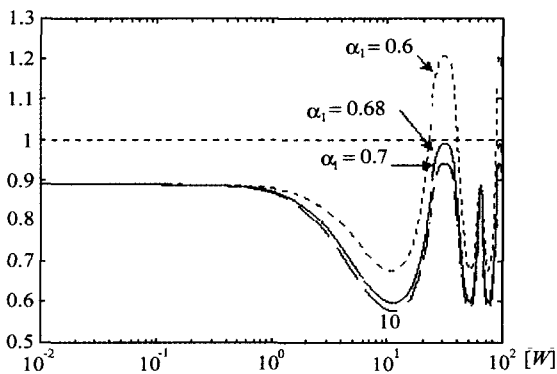


그림 4. 공칭모델 1의 안정조건에 대한 Bode 선도.  
Fig. 4. Bode diagram for stability condition  $\hat{p}_1(z)$ .

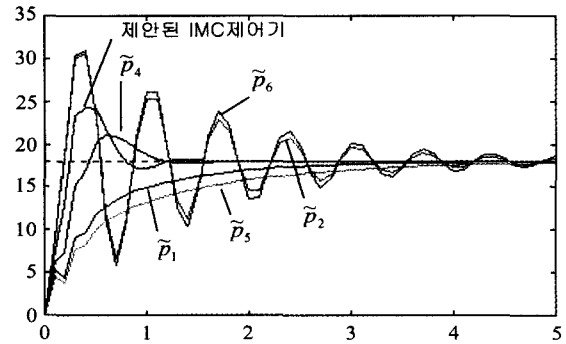


그림 5. 제안된 제어기의 응답특성.  
Fig. 5. Response characteristic of the proposed scheme.

그림으로부터 같은 크기의 모델링 편차에 대해 제안된 제어기법이 단일 모델에 근거한 IMC보다 성능 및 안정성 면에서 바람직함을 알 수 있다.

VI. 결과

본 연구에서는 불확실성을 갖는 선형 시스템의 강인 제어에 사용되고 있는 IMC 제어기법과 범용 근사기로 사용되는 퍼지-신경망을 융합한 퍼지-신경망 기반 IMC 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는 IMC 설계시 요구되는 공칭모델을 비선형 시스템의 모델링에 효과적으로 도입되고 있는 퍼지-신경망으로 대체한 구조로 전향경로상의 제어기들은 퍼지-신경망의 후건부 선형화 모델들을 기반으로 가정된 모델링 편차에 대해 강인성을 보장하도록 설계된다. 제안된 제어기법의 유용성 확인을 위해 비선형 수치 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 이로부터 선형 시스템에만 한정적으로 적용되어온 IMC 제어기를 비선형 시스템의 제어에도 확장 적용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Astrom, K. and Hagglund, T., "PID controllers: Theory, design and tuning," 2nd Ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1996.
- [2] Morari M., Zafiriou E., "Robust process control," Prentice-Hall International Editions, 1989.
- [3] Rivera, D. E., M. Morari, and Skogestad, "Internal model control 4. PID controller design," Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., vol. 25, p. 252, 1986.
- [4] J.-S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, pp. 665-685, May, 1993.



**김 성 호**  
1984년 고려대학교 졸업. 동대학원 석사(1986). 동대학원 박사(1991). 현재 군산대학교 전자정보 공학부 부교수.



**강 정 호**  
1999년 군산대학교 제어계측공학과 졸업(학사). 동대학원 전자공학 석사(2001). 현재 (주)메켈렉 코리아 근무.