

세포성 면역 반응을 이용한 비선형 PID 제어기 설계에 관한 연구

論 文

52D-5-1

A Study on Nonlinear PID Controller Design Using a Cell-Mediated Immune Response

朴 晋 玄* · 崔 榮 奎**
(Jin-Hyun Park · Young-Kiu Choi)

Abstract - In this paper, we propose a nonlinear variable PID controller using a cell-mediated immune response. An immune feedback response is based on the functioning of biological T-cells. An immune feedback response and P-controller of conventional PID controllers resemble each other in role and mechanism. Therefore, we extend immune feedback mechanism to nonlinear PID controller. And in order to choose the optimal nonlinear PID controller gains, we also propose the on-line tuning algorithm of nonlinear functions parameters in immune feedback mechanism. The trained parameters of nonlinear functions are adapted to the variations of the system parameters and any command velocity. And the adapted parameters obtained outputs of nonlinear functions with an optimal control performance. To verify performances of the proposed control systems, the speed control of nonlinear DC motor is performed. The simulation results show that the proposed control systems are effective in tracking a command velocity under system variations.

Key Words : Immune feedback response, nonlinear PID controller

1. 서 론

최근들어 많은 연구가 진행되는 비결정론적 알고리즘의 하나인 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)은 인간의 면역체계가 생체의 방어 및 유지를 수행하는 자율분산시스템으로 구성되어, 시스템의 요소들이 뇌의 명령을 따르는 것이 아니라 각 요소가 자율적으로 환경에 대응하는 것을 모의 구성하였다. 즉, 생체내로 침입하는 박테리아, 기생균, 병원균, 독소, 바이러스 등과 같은 항원에 대항하여 생체를 방어하기 위해, 세포 유전자를 재구성하여 항원(Antigen)에 대응하는 항체(Antibody)를 생산하여 항원을 배제하는 정교하고 복잡한 생체방어수단인 면역시스템을 가지고 있다. 이러한 면역 시스템은 체액성 면역 반응(Humoral immune response)과 세포성 면역 반응(Cell-mediated immune response)으로 나누어진 다[1].

체액성 면역 반응은 B-림프구의 항체 반응으로 항체의 paratope와 항원의 epitope가 서로 일치할 경우, 항체에 의해 항원은 억제된다. 또한 한번 배제된 항원은 기억되어, 동일한 항원에 대한 항체의 2차 반응은 1차 반응에 비하여 훨씬 빠르게 생성할 수 있는 기억세포를 가지고 있다. 따라서 이러한 면역 체액성 면역 반응을 여러 공학 분야에서 이용하고 있으며, 특히 최적화 기법, 로봇의 행동 선택기, 분산 자율

로봇 제어 등과 같은 분야에 연구가 진행되고 있다.

최적화 기법의 적용에서는 지금까지 연구되어진 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)의 연산자에 면역 시스템이 갖는 개체 생산의 촉진과 억제 등의 메카니즘을 결합한 방법이 많이 연구되고 있다[2-5]. 그러므로 면역 알고리즘을 단순히 유전알고리즘에 면역 메카니즘을 확장하여 사용하는 방법으로 인식되어지고 있다. 또한 면역 메카니즘을 이용한 연산자들은 각 항체간의 친화도를 계산하여야 하고, 이를 억제세포와 기억세포로 분화하여, 개체 생산의 촉진과 억제 메카니즘으로 적용되므로 많은 시간과 매우 복잡한 작업을 수행하여야 한다. 또한 최적화 기법이 아닌 체액성 면역 반응으로는 자율 이동 로봇의 궤적 계획, 로봇군 제어 및 분산 자율 로봇 제어에서와 같이 면역 알고리즘을 로봇의 행동 선택기와 같은 사례가 주로 연구되고 있다[6, 7].

세포성 면역 반응은 생물학적 메카니즘이 명확히 밝혀지지 않아 매우 복잡하게 구성되어진다. 그러나, T-림프구의 세포 분자 동역학을 바탕으로 면역 피드백 메카니즘 중 핵심 반응인 개체의 제거(Killer), 촉진(Helper), 억제(Suppress)와 같은 3가지 세포성 면역 반응에 대한 연구가 이루어지고 있다. 즉, T-림프구는 제거, 촉진, 억제의 기능으로 하는 3가지 세포로 구성되어, 외부 침입물질에 대하여 빠르게 반응하고, 내부 면역 체계를 보다 빠르게 안정화시키는 기능을 독립적으로 수행할 수 있다는 특성 면에서 하나의 피드백 메카니즘이라고 할 수 있다.

세포성 면역 피드백 메카니즘에 의한 공학적인 연구로는 빠르게 반응하며 적응적인 특징을 갖는 면역 피드백 메카니즘을 신경회로망의 학습에 필요한 파라미터의 선정 메카니즘으로 적용하는 연구가 진행되었으며[1, 8], T-림프구에 의한

* 正 會 員 : 晋州産業大 메카트로닉스工學科 助教授 · 工博

** 正 會 員 : 釜山大 電子電氣情報컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 7月 3日

最終完了 : 2003年 2月 21日

세포성 면역 피드백 메카니즘에 기초하여 제어기의 설계에 적용하는 연구가 진행되었다[9-12]. 그러나, 이러한 피드백 메카니즘에 의한 PID 제어기는 비선형 함수로 구성되어 있으며, 이렇게 구성된 비선형 함수의 파라미터 선정이 매우 중요한 문제로 다루어지고 있다. 따라서 이러한 비선형 함수의 파라미터의 선정을 위하여 오프 라인 학습을 통한 최적화 알고리즘을 적용하거나, 퍼지 제어기와 같은 부수적인 제어기가 설계되어야 한다. 그리고 비선형 PID 제어기의 최대 이득을 선정할 경우에도, 최적화 알고리즘을 사용하거나, 부족감쇠 (under damped) 시스템이 되도록 최대 이득을 선정하여야 한다. 이는 시스템을 정확히 알 수 없는 경우, 시행 착오 방법을 사용하여야 하는 단점이 있다. 또한 이렇게 선정된 최대 이득은 비례, 미분, 적분 이득의 비가 결정되므로 최적의 이득을 구할 수 없는 문제에 도달할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 세포성 면역 반응의 면역 피드백 메카니즘에 기초한 비선형 가변 PID 제어기를 제안하였다. 또한 제안된 비선형 가변 PID 제어기의 최적화를 위하여, 면역 피드백 메카니즘의 비선형 함수 파라미터 선정을 경사감소법 (gradient descent rule)에 의한 온라인 학습 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제어기의 각 이득에 다른 비선형 함수를 적용하여, 최적의 이득을 구하도록 하였다. 이를 비선형 직류 모터 시스템에 적용하여 다른 속도 명령과 시스템 파라미터 변동에 대하여, 일정한 이득을 갖는 일반적인 PID 제어기에 비하여 우수한 성능을 보이고자 한다.

2. 세포성 면역 피드백 메카니즘

면역 시스템은 생체의 방어 및 유지를 수행하는 자율분산 시스템으로, 시스템의 요소들은 뇌의 명령을 따르는 것이 아니라 각 요소가 자율적으로 환경에 대응한다. 즉 생체에서는 외부로부터 생체 내로 침입하는 박테리아, 기생균, 병원균, 독소 바이러스와 같은 항원에 대항하여 생체를 방어하기 위해, 세포유전자를 재구성하여 항원에 대응하는 항체를 생산하여 항원을 배제하는 매우 정교하고 복잡한 생체방어수단인 면역 시스템을 가지고 있다.

그 중 세포성 면역 반응은 주로 T-림프구 반응으로 대표되며, T-killer 세포 (T_k), T-suppressor 세포 (T_s), T-helper 세포 (T_h)로 구성된다. T_k 는 병원균을 직접 제거하는 역할을 하고, T_s 는 면역 반응을 억제하며, T_h 는 면역 반응을 촉진하는 역할을 담당한다. 이러한 3가지 역할을 담당하는 세포들의 세포성 면역 반응을 면역 피드백 메카니즘이라고 한다. 만약, 항원이 침입하면 항원에 감염된 사실을 알려주는 항원 제시 세포 (Antigen Presenting Cell : APC)가 인터루킨 (Interleukin-1:IL-1)를 분비하여 그 정보를 T_h 와 T_s 그리고 B-림프구에 전달한다[1, 9-12].

B-림프구는 인터루킨의 자극으로 생체 내에 침입한 항원을 인식하고, 그 항원에 대항하는 항체 생성 세포만을 증식한 후, 침입한 항원에 대응하는 항체를 빠르게 만들어 낸다. 그리고 사라지는 항체는 모든 것이 없어지는 것이 아니라, 기억 세포가 되어 면역적 기억세포로 분화한다. 이와 같은 특이적 방어 시스템을 체액성 면역 반응이라 한다

또한 인터루킨의 자극을 받은 T_h 는 T_k , T_s 와 B-림프구에

인터루킨 (Interleukin-2:IL-2)를 분비하여 면역 반응을 촉진시키고, T_s 는 TSF (T-suppressor factor)를 T_h , T_k 와 B-림프구에 분비하여 면역 반응을 억제하는 역할을 한다. 이러한 일련의 과정은 체액성 면역 반응 내부의 면역 반응으로, 보다 빠르게 안정화시키는 기능을 독립적으로 수행할 수 있는 피드백 메카니즘을 나타낸다. 따라서 이러한 특성을 세포성 면역 반응의 피드백 메카니즘이라고 할 수 있다.

그러나, 생물학적 면역 시스템은 아직까지 명확히 밝혀지지 않았으며, 또한 매우 복잡하다. 따라서 T-림프구에 의한 세포성 면역 피드백 메카니즘을 단순하게 고려하여 설계하면 그림 1과 같이 구성할 수 있다.

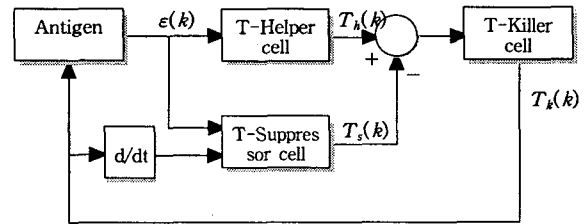


그림 1 T-림프구만을 고려한 면역 피드백 메카니즘
Fig. 1 Immune Feedback Mechanism focusing on the T-Lymphocytes

세포성 면역 메카니즘에서 항원을 제거하는 역할을 하는 것이 T_k 이며, T_h 는 T_k 를 활성화시키고, T_s 는 T_k 를 억제시키는 역할을 한다. 따라서 외부로부터 항원이 발생할 경우, APC에 의하여 IL-1이 분비되고, 이는 T_h 세포와 T_s 세포를 자극하게 된다. 자극을 받은 T_h 세포는 IL-1에 의한 증가하게 된다. 또한, T_s 는 항원이나 외부 물질에 따라 TFS를 분비하여 다른 T-세포들을 억제시키는 역할을 하는 것이 분명하나 이것에 관한 상세한 함수를 구할 수 없다. 그러나, T_k 세포가 갑자기 크게 증가하거나 감소할 경우, T_s 는 항원이 크게 감소하는 방향으로 설정되어야 하므로 비선형 함수를 식 (1)과 같이 정의하여 사용하였다[8-12].

$$f(x) = 1 - \exp(-x^2/a) \tag{1}$$

여기서, a 는 비선형 함수의 모양을 변화시키는 파라미터이다.

따라서, T_k 세포는 이러한 생체 내부의 능동적 조절에 의하여 안정한 상태로 유지시키는 피드백 시스템을 가지는 것이다. 그림 1의 T-림프구만을 고려한 면역 피드백 메카니즘을 수식적으로 정리하면 식 (2)와 같다.

$$T_k(k) = K_1 \epsilon(k) - K_2 f(\Delta T_k(k-1)) \epsilon(k) = K[1 - \eta_0 f(\Delta T_k(k-1))] \epsilon(k) \tag{2}$$

여기서, K 는 K_1 으로 응답 속도를 제어하고, 파라미터 η_0 는 K_2/K_1 으로 안정도에 관련된다. 따라서 면역 피드백 시스

템의 성능은 이러한 파라미터들과 비선형 함수 $f(\cdot)$ 의 선정에 달려있다.

면역 피드백 시스템을 공학적인 제어의 관점에서 해석하여 보면, 그림 1과 식 (2)로부터 $e(k)$ 를 k 샘플링 시간에서의 제어 오차 신호 $e(k)$ 로 가정하고, $T_d(k)$ 는 시스템을 제어하는 제어량 $u(k)$ 로 두고, K 는 제어기의 이득 K_p 로 간주한다면 식(2)는 아래 식(3)과 같이 식 (1)의 비선형 항이 포함된 비례 이득만을 갖는 P-제어기로 둘 수 있다[8-12].

$$u(k) = K_p(1 - \eta_0 f(\Delta u(k)))e(k) \quad (3)$$

3. 면역 피드백 메카니즘에 의한 비선형 PID 제어기 설계 및 함수 파라미터 동조

본 장에서는 면역 피드백 시스템에 의한 비선형 PID 제어기와 본 연구자에 의하여 과거에 제안된 비선형 PID 제어기(I)를 설명하고[12], 이를 개선을 비선형 PID 제어기(II)를 설계하고자 한다.

3.1 면역 피드백 메카니즘에 의한 PID 제어기

이러한 면역 피드백 메카니즘에 의한 제어기는 단순히 제어 오차만을 가지는 제어기이므로, 비선형 시스템에 존재하는 노이즈나, 외란 등에 의한 제어 오차를 보상할 수 없으며, 또한 안정하지 않다. 따라서 일반적인 PID 제어기와 같은 오차의 미분항과 적분항을 고려하여 제어기를 설계하는 것이 바람직하다. 그러므로 새로운 면역 피드백 메카니즘에 의한 비선형 PID 제어기(I)는 식 (4)와 같이 설계할 수 있다[8-12].

$$u(k) = K_p(1 - \eta_0 f(\Delta u(k))) \left(1 + \frac{z}{T_i(z-1)} + T_d \frac{z-1}{z} \right) e(k) \quad (4)$$

여기서, 파라미터 K_p , T_i , T_d 는 제어기의 비례 이득, 적분 시간, 미분 시간을 나타내므로, 면역 억제 요소 비 η_0 와 같이 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$(K_p, T_i, T_d) > 0, \eta_0 \geq 0 \quad (5)$$

만약, $0 \leq \eta_0 f(\Delta u(k)) \leq 1$ 이면 부귀환 제어가 되나, $1 < \eta_0 f(\Delta u(k))$ 면 정귀환 제어 시스템이 된다. 그러므로 제어 시스템의 안정을 위하여 η_0 의 한계값을 설정하여야 한다. 만약, $\eta_0 = 0$ 이면 비선형 PID 제어기(I)은 일반적인 PID 제어기가 된다. 따라서 η_0 는 식(3)에서 $0 \leq f(\Delta u(k)) < 1$ 이므로 $0 \leq \eta_0 < 1$ 로 정의하여야 한다.

식 (4)와 같은 면역 피드백 메카니즘을 갖는 비선형 PID 제어기(I)을 적용할 때, 고려하여야 하는 제어기 이득들이 비선형 함수 $f(\cdot)$ 를 포함하고 있으므로, 비선형 함수 파라미터의 선정이 제어기의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 식 (1)의 비선형 함수 $f(\cdot)$ 는 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$f(x, a) = 1.0 - \exp(-x^2/a) \quad (6)$$

그러므로 비선형 함수 파라미터 a 를 온라인 자동 동조하는 동조 알고리즘이 필요하다. 비선형 함수 파라미터의 자동 동조를 위하여 경사 감소법(gradient descent)을 사용하였다. 목표 입력 값과 플랜트 출력 값의 오차 신호를 사용한 오차 함수를 구성하여, 오차가 최소화되도록 비선형 함수 파라미터를 수정하도록 하였다.

즉, 오차 함수 $E_p(k)$ 를 식 (7)과 같이 구성하였다.

$$E_p(k) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2} e(k)^2 \quad (7)$$

여기서, $e(k)$ 는 샘플링 시간 k 에서의 오차 신호를 나타낸다.

또한, 비선형 함수 파라미터 a 의 업데이트를 위한 $\Delta a(k)$ 는 경사 감소법에 의하여 아래와 같이 정의하고, 이를 연쇄법(chain-rule)을 사용하면 식 (8)과 같다.

$$\Delta a(k) = -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial a(k)} = -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial f(\cdot)(k)} \frac{\partial f(\cdot)(k)}{\partial a(k)} \quad (8)$$

여기서, ζ 는 학습율을 나타낸다.

따라서 비선형 함수 파라미터 a 의 온라인 자동 동조를 위한 업데이트 식은 경사 감소법에 의하여 식 (9)와 같이 구하여진다.

$$a(k+1) = a(k) + \Delta a(k) \quad (9)$$

3.2 비선형 PID 제어기(II) 설계와 함수 파라미터 동조

면역 피드백 메카니즘에 의한 PID 제어기는 비선형 함수로 구성되어, 비선형 함수의 파라미터 선정이 매우 중요한 문제로 다루어진다. 이러한 문제를 비선형 PID 제어기(I)은 경사 감소법에 의한 온라인 학습으로 해결하였다. 그러나 비선형 PID 제어기(I)은 식 (4)과 같이 비선형 함수가 하나만 존재하여, 제어기의 이득 비율이 항상 최대 이득 비율과 같으므로 최적의 이득 선정을 보장할 수 없다. 따라서 이러한 문제를 해결하고자 각 이득이 다른 비선형 함수를 포함하도록 제어기를 수정 제안하고자 한다.

식 (4)의 각 비례, 적분, 미분 이득을 면역 피드백 시스템의 비선형 이득값으로 대체하여 제어기를 다시 설계하면 식 (10)과 같다.

$$u(k) = K_p(1 - \eta_1 f_1(\Delta u(k))) e(k) + \frac{K_p}{T_i} (1 - \eta_2 f_2(\Delta u(k))) \frac{z}{(z-1)} e(k) + K_p T_d (1 - \eta_3 f_3(\Delta u(k))) \frac{z-1}{z} e(k) \quad (10)$$

여기서, 부귀환 제어 시스템이 되기 위한 조건과 제어 시스템의 안정화를 위한 면역 억제 요소 비 η_1, η_2, η_3 의 한계 값은 식 (11)과 같이 정하여 진다.

$$0 \leq \eta_i f_i[\Delta u(k)] < 1, \quad 0 \leq \eta_i < 1 \quad (11)$$

$$(i = 0, 1, 2)$$

또한 비선형 함수 $f_i[\cdot]$ 의 파라메터 a_i 를 온라인 동조하기 위한 $\Delta a_i(k)$ 는 앞의 방법과 같이 경사 감소법에 의하여 아래와 같이 정의하고, 이를 연쇄법을 사용하면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta a_i(k) &= -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial a_i(k)} \\ &= -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial f_i[\cdot](k)} \frac{\partial f_i[\cdot](k)}{\partial a_i(k)} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, ζ 는 학습율을 나타낸다.

식 (12)의 각 항들을 정리하면 다음 식들과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial E_p(k)}{\partial y(k)} = -(r(k) - y(k)) = -e(k) \quad (13)$$

$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$ 는 시스템의 자코비안(Jacobian)을 구하는 문제가 되므로, 일반적으로 알 수 없는 값이다. 따라서 수학적으로 근사하여 식 (14)와 같이 사용하였다[12, 13].

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)} \quad (14)$$

여기서, $\Delta y(k) = y(k-1) - y(k-2)$, $\Delta u(k) = u(k-1) - u(k-2)$ 를 사용하였다.

또한, $\frac{\partial u(k)}{\partial f_i[\cdot](k)}$ 를 구하기 위하여, 식 (10)을 이산 시간 시스템으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + K_p(1 - \eta_1 f_1[\cdot])(e(k) - e(k-1)) \\ &\quad + \frac{K_p}{T_i}(1 - \eta_2 f_2[\cdot])e(k) \\ &\quad + K_p T_d(1 - \eta_3 f_3[\cdot])(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)로부터 $\frac{\partial u(k)}{\partial f_i[\cdot](k)}$ 는 식 (16)과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(k)}{\partial f_1[\cdot](k)} &= -\eta_1 K_p (e(k) - e(k-1)) \\ \frac{\partial u(k)}{\partial f_2[\cdot](k)} &= -\eta_2 \frac{K_p}{T_i} e(k) \\ \frac{\partial u(k)}{\partial f_3[\cdot](k)} &= -\eta_3 K_p T_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned} \quad (16)$$

또한, $\frac{\partial f_i[\cdot](k)}{\partial a_i(k)}$ 는 식 (17)과 같다.

$$\frac{\partial f_i[\cdot](k)}{\partial a_i(k)} = \frac{x^2}{a_i(k)^2} \exp\left(-\frac{x^2}{a_i(k)}\right) \quad (17)$$

따라서 비선형 함수 파라메터 a_i 의 온라인 자동 동조를 위한 업데이트 식은 식 (18)과 같다.

$$a_i(k+1) = a_i(k) + \Delta a_i(k) \quad (18)$$

여기서 $i = 0, 1, 2$ 이다.

4. 제어시스템 구성 및 모의 실험

본 장에서는 면역 피드백 메카니즘을 이용한 비선형 PID 제어기(I), (II)를 제어기로 구현하여, 비선형 DC 모터에 적용하고자 한다. 그림 2는 비선형 PID 제어기(I), (II)가 비선형 함수를 자동 동조하는 제어 시스템을 나타내었다.

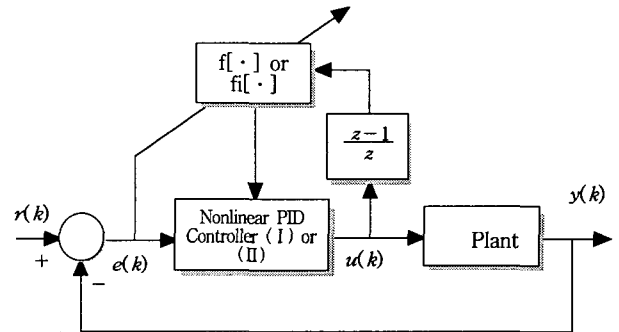


그림 2 비선형 PID 제어기(I) 또는 (II)의 자동 동조 시스템
Fig. 2 Auto-tuning system of nonlinear PID controller (I) or (II)

면역 피드백 시스템에 의한 비선형 PID 제어기(II)의 성능 평가를 위하여 비선형 직류 모터의 속도제어에 적용하였다. 시뮬레이션을 위한 직류 모터 방정식은 다음 식(19), (20)과 같다.

$$K\omega_p(t) = -R_a i_a - L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_t(t) \quad (19)$$

$$Ki_a = J \frac{d\omega_p(t)}{dt} + D\omega_p(t) + T_L(t) \quad (20)$$

단, 부하토크 $T_L(t)$ 은 식 (21)과 같은 비선형 형태로 두고, μ 는 상수이다.

$$T_L = \mu \omega_p^2(t) \text{sign}(\omega_p(t)) \quad (21)$$

또한, 모의 실험을 위한 모터의 사양은 $J = 0.068 \text{ Kg m}^2$, $K = 3.475 \text{ Nm A}^{-1}$, $D = 0.03475 \text{ Nm s}$, $\mu = 0.0039 \text{ Nm s}^2$ 이며, 동작 범위는 $-40.0 < \omega_p(k) < 40.0 [\text{rad/sec}]$ 으로 설정하였다.

- 속도 명령 I : $\omega(k) = 32\sin(0.001\pi \times k)$ [rad/sec],
- 속도 명령 II : $\omega(k) = 32\sin(0.002\pi \times k)$ [rad/sec],
- 속도 명령 III : $\omega(k) = 32\sin(0.004\pi \times k)$ [rad/sec],
- 속도 명령 IV : $\omega(k) = 25\sin(0.002\pi \times k) + 5\sin(0.007\pi \times k) + 12\sin(0.0036\pi \times k)$ [rad/sec]

속도 명령 I, II, III, IV에 대하여 PID 제어기의 이득은 속도 명령 I에 대하여 여러 번 반복 수행하여 가장 성능이 좋은 이득으로 선정하였다. 또한 비선형 PID 제어기(I)에 대한 최대 이득은 앞서 구한 일정이득을 갖는 PID 제어기 이득의 2배를 사용하였으며, 비선형 PID 제어기(II)는 비례이득과 미분이득은 2배를 사용하고, 적분이득은 4배를 사용하였다. 따라서 일정이득의 PID 제어기, 비선형 PID 제어기(I), 제안된 비선형 PID 제어기(II)의 이득은 아래 표와 같이 구성하였다. 또한 비선형 PID 제어기의 학습을 위한 학습율은 0.9로 고정하여 사용하였다.

표 2 PID 제어기 및 제안된 제어기의 사양
Table 2 Specification of PID controller and proposed controller

제어기 종류	이득			면역억제 요소비
	K_p	$\frac{K_p}{T_i}$	$K_p T_d$	
일정이득의 PID 제어기	50.0	1.6	1.5	.
비선형 PID 제어기 (I)	100.0	3.2	3.0	η_0 0.9
비선형 PID 제어기 (II)	100.0	6.4	3.0	η_1, η_2, η_3 0.9 0.9 0.9

그림 3은 속도 명령 I에 대한 PID 제어기와 비선형 PID 제어기(I), (II)의 추적 속도와 오차를 도시하였다. 그림 3-(b)에서는 제어기들의 속도 오차를 도시하였으며, 비선형 PID 제어 방법들이 초기에 일반적인 PID 제어기에 비하여 조금 큰 오차를 발생하나, 이것은 비선형 함수의 파라미터가 초기에 학습이 되지 않은 상태에서 나타나는 결과이다. 따라서, 학습이 진행된 약 25~35(msec) 이후의 결과는 일반적인 PID 제어기에 비하여 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한, 제안된 비선형 PID 제어기(II)가 비선형 PID 제어기(I)에 비하여 조금 더 좋은 성능이 나타냄을 보인다. 이는 비선형 PID 제어기(I)의 제어 이득의 비가 고정적으로 사용되는 것에 비하여, 제안된 비선형 PID 제어기(II)는 이득의 비와 관계없이 오차를 최적화 하는 방향으로 제어 이득을 변화시킴으로 성능이 더 좋음을 확인할 수 있었다.

그림 4-(a)에서는 비선형 PID 제어기(I)의 비선형 함수 파라미터 a 와 비선형 함수의 출력값을 나타내었으며, 그림 4-(b)~(d)에서는 제안된 비선형 PID 제어기(II)의 비선형 함수

수 파라미터 a_1, a_2, a_3 와 비선형 함수의 출력값들을 나타내었다. 비선형 PID 제어기(I)의 비선형 함수의 출력값은 그림에서 알 수 있듯이 평균적으로 0.41정도를 나타내고, 변화폭이 최대 ± 0.02 정도 됨을 알 수 있다. 이는 비선형 PID 제어기가 설정된 각각의 최대 제어 이득의 61.3~64.9% 정도를 제어 이득 값으로 적절하게 적용함을 알 수 있다. 또한 제안된 비선형 PID 제어기(II)의 비선형 함수의 출력값은 평균적으로 $f_1[]$ 은 0.41, $f_2[]$ 은 0.38, $f_3[]$ 은 0.39정도를 나타내고 있으며, 그 크기의 변화폭이 최대 ± 0.02 정도 됨을 알 수 있다. 따라서, 비선형 PID 제어기(II)의 비례이득은 설정된 최대 비례이득의 61.3~64.9%, 적분이득은 설정된 최대 적분이득의 64.0~67.6%, 미분이득은 설정된 최대 미분이득의 63.1~66.7% 정도를 제어 이득 값으로 적용적으로 적용함을 알 수 있다.

그림 5는 속도 명령 II에 대한 추종 오차를 도시하였다. 비선형 PID 제어기들이 속도 명령 I에서와 같이 초기에 일반적인 PID 제어기에 비하여 조금 큰 오차를 발생하나, 이것 역시 학습이 진행된 약 20~30(msec) 이후의 결과에서는 일반적인 PID 제어기에 비하여 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한, 일반적인 PID 제어기는 속도 명령 I에 비하여 큰 오차를 발생하나, 비선형 PID 제어기들은 속도 명령 I과 유사한 오차를 유지함을 알 수 있다.

그림 6은 속도 명령 III에 대한 추종 오차를 나타내었다. 비선형 PID 제어기들이 일정이득의 PID 제어기에 비하여 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다. 일정이득의 PID 제어기는 속도 명령 I에 비하여 속도 명령 주파수가 4배 증가한 속도 명령에 대하여 잘 추종하지 못함을 알 수 있다.

그리고, 그림 7에서는 속도 명령 IV에 대한 성능 비교를 하였다. 일반적인 PID 제어기에 비하여 매우 향상된 성능을 보이며, 이는 선형 PID 제어기에 비하여 비선형 제어기들이 높은 주파수가 포함된 속도 지령에 대하여서도 잘 추종함을 보였다.

이상의 결과로부터 속도 명령 I을 잘 추종하도록 설정한 일정이득의 PID 제어기는 속도 명령의 주파수가 올라가거나, 다른 궤적의 속도 명령에 대하여 적응성이 떨어져 큰 오차가 발생함을 보였다. 그러나 비선형 PID 제어기들이 속도 명령의 주파수가 올라가거나, 다른 궤적의 속도 지령에 대하여서도 비선형 함수값에 따라 적절히 변화시켜 최적의 성능을 나타내었다. 또한 제안된 비선형 PID 제어기(II)가 평균적으로 비선형 PID 제어기(I)에 비하여 더 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 고정된 제어 이득의 비가 최적의 이득을 찾는데 제약조건으로 작용하여, 최적의 이득을 선정할 수 없었다. 따라서, 이득의 비와 관계없이 오차를 최적화 하는 방향으로 제어 이득을 변화시키는 제안된 비선형 PID 제어기(II)가 더 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

표 2는 속도 명령 I, II, III, IV에 대한 속도 오차의 합을 일정이득의 PID 제어기와 비선형 PID 제어기들을 비교하여 나타내었다. 제안된 비선형 제어기들이 속도 명령의 주파수에 관계없이 비슷한 오차 합을 유지하는 것을 알 수 있다. 그러나 일정이득의 PID 제어기는 주파수의 증가나 다른 궤적에 대하여 많은 속도 오차를 발생함을 알 수 있다.

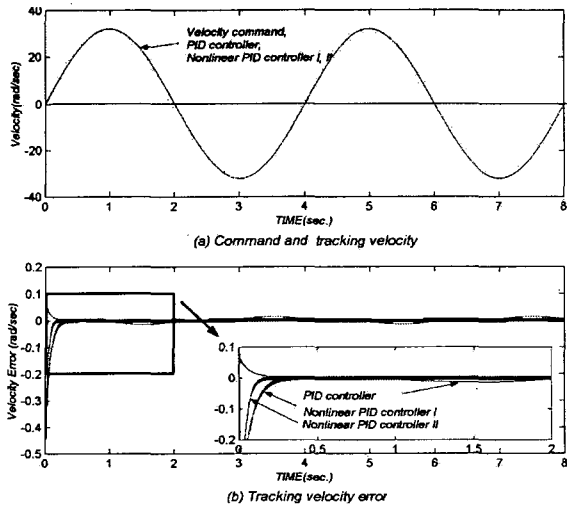


그림 3 속도 명령 I 에 대한 추적 속도 오차
Fig. 3 Tracking velocity errors for velocity command I

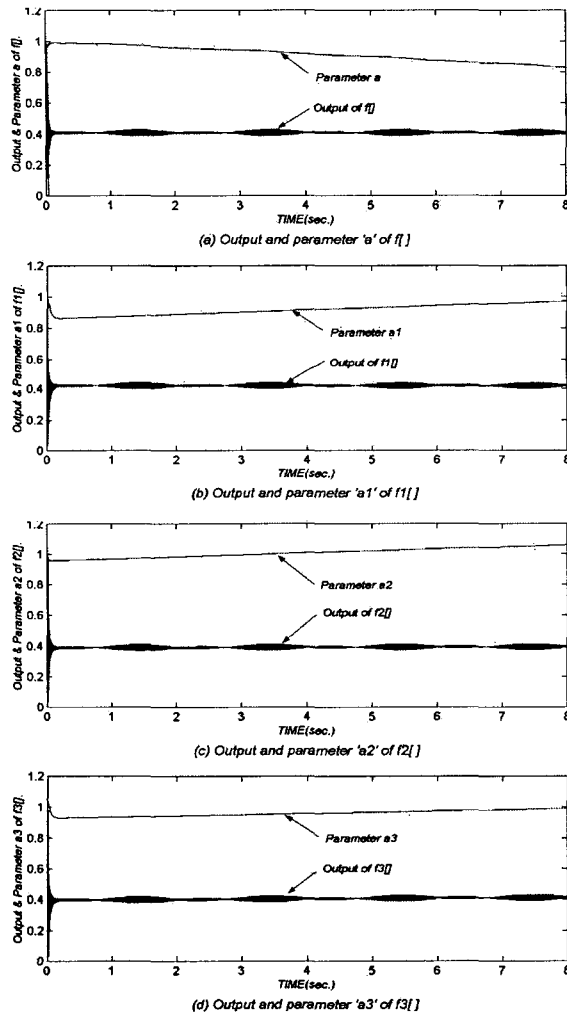


그림 4 속도 명령 I 에 대한 비선형 함수값과 파라미터들
Fig. 4 Nonlinear func. values and parameters for velocity command I

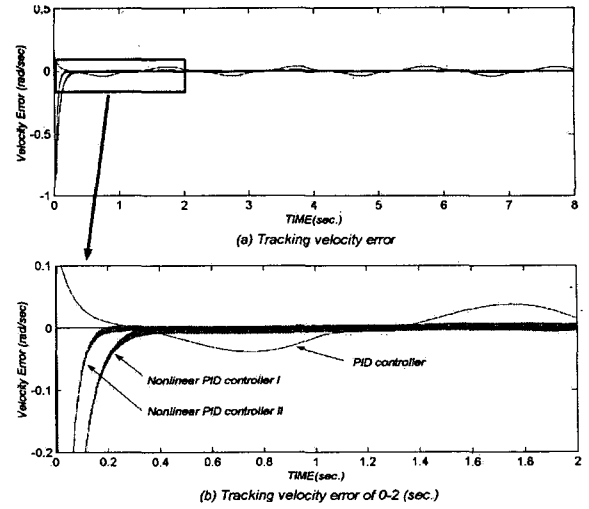


그림 5 속도 명령 II에 대한 추적 속도 오차
Fig. 5 Tracking velocity errors for velocity command II

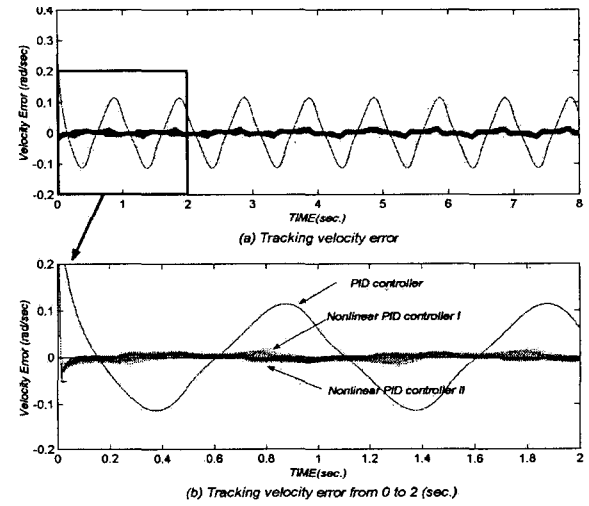


그림 6 속도 명령 III에 대한 추적 속도 오차
Fig. 6 Tracking velocity errors for velocity command III

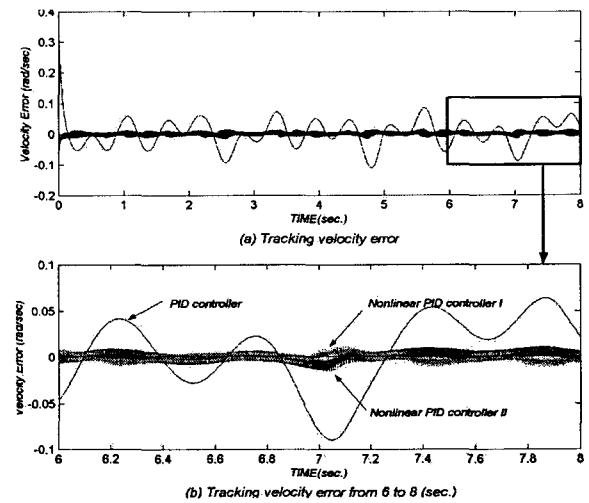


그림 7 속도 명령 IV에 대한 추적 속도 오차
Fig. 7 Tracking velocity errors for velocity command IV

표 2 속도 추적 오차의 합

Table 2 Sum of velocity tracking error

	일정이득 PID 제어기	비선형 PID 제어기(I)	제안된 비선형 PID 제어기(II)
속도명령 I	30.546419	33.687275	28.679241
속도명령 II	79.138443	48.533337	36.452564
속도명령 III	265.190704	28.465136	17.686069
속도명령 IV	144.132507	21.972181	21.817379

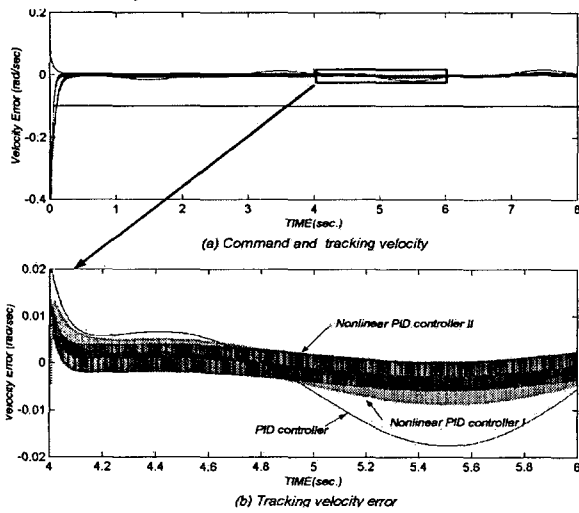


그림 8 속도 명령 I에 대한 추적 속도 오차(시스템 파라미터 변동)

Fig. 8 Tracking velocity errors for velocity command I (system parameters variation)

그림 8은 속도 명령 I를 인가하고, 4초부터 비선형 모터 시스템 파라미터 J, D, μ 를 25%씩 증가하였을 경우, 추적 오차를 비교하였다. 일정이득의 PID 제어기에 비하여 비선형 PID 제어기(I), (II)가 잘 추종함을 알 수 있다. 이는 비선형 PID 제어기(I), (II)가 시스템 파라미터의 변동이 생길 경우, 온라인 학습에 의하여 최적의 비선형 함수 파라미터들을 구하고, 선정된 파라미터에 의해 비선형 함수 출력을 적절히 변화시켜, 제어 이득이 시스템에 적응적으로 동작함을 나타낸다. 그림 9는 이러한 파라미터의 변동과 비선형 함수들의 출력값들을 도시하였다. 그림 9-(a)는 비선형 PID 제어기(I)의 비선형 함수값과 파라미터를 나타내었으며, 그림 9-(b)~(d)는 제안된 비선형 PID 제어기(II)의 비선형 함수값과 파라미터를 도시하였다. 시스템 파라미터의 변동이 일어나는 4초 후부터, 비선형 함수의 파라미터와 출력이 적응적으로 변화됨을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 속도 명령 II, III를 인가하고, 4초부터 비선형 모터 시스템 파라미터 J, D, μ 를 25%씩 증가하였을 경우, 추적 오차를 비교하였다. 앞의 비교와 같이 일정이득의 PID 제어기에 비하여 제안된 방법들이 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 제안된 비선형 PID 제어기(II)가 비

선형 PID 제어기(I)에 비하여 더 뛰어난 성능이 나타남을 보였다.

표 3은 시스템 변화에 대한 속도 명령 I, II, III의 추적 속도 오차의 합을 정리하여 나타내었다.

이상의 결과로부터 비선형 PID 제어기들이 일정이득의 PID 제어기에 비하여 임의의 다른 주파수 성분을 갖는 속도 명령에 대하여 잘 추적함을 보였으며, 또한 시스템 파라미터의 변동에 대해서도 제안된 제어기의 비선형 함수에 의하여 적응적으로 제어 이득을 변화시켜, 강인한 성능을 보였다. 또한 고정된 제어 이득의 비를 갖는 비선형 PID 제어기(I)에 비하여, 이득의 비와 관계없이 오차를 최소화 하는 방향으로 제어 이득을 변화시키는 제안된 비선형 PID 제어기(II)가 더 좋은 성능을 나타냄을 보였다.

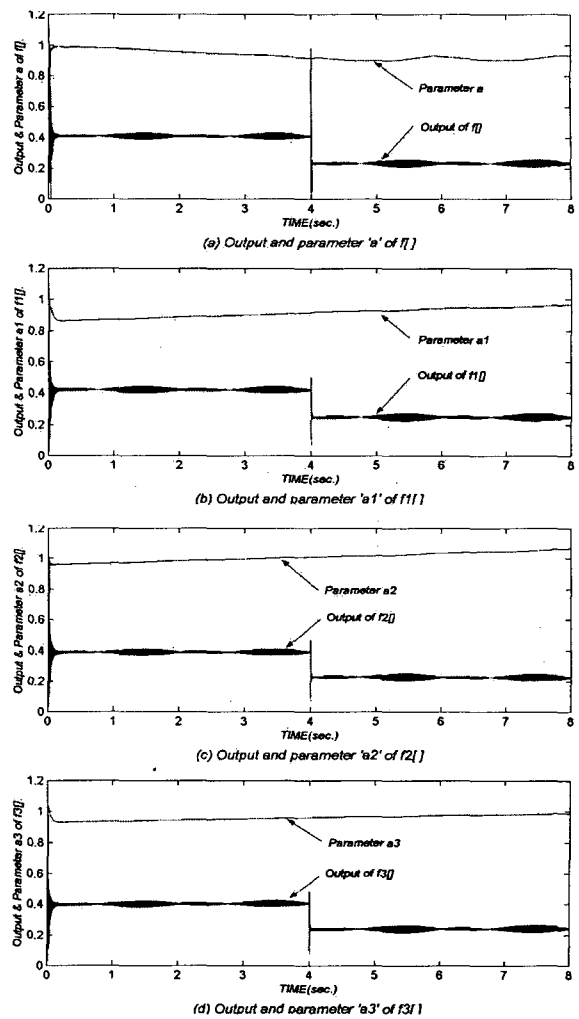


그림 9 속도 명령 I에 대한 비선형 함수값과 파라미터들 (시스템 파라미터 변동)

Fig. 9 Nonlinear function values and parameters for velocity command I (system parameters variation)

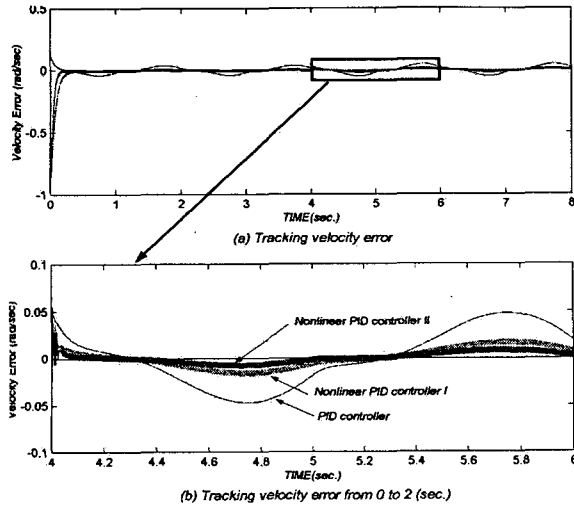


그림 10 속도 명령 II에 대한 추적 속도 오차(시스템 파라미터 변동)
 Fig. 10 Tracking velocity errors for velocity command II (system parameters variation)

표 3 시스템 파라미터 변동에 대한 속도 추적 오차의 합
 Table 3 Sum of velocity tracking error under system parameters variation

오차합 속도명령	일정이득 PID 제어기	비선형 PID 제어기 (I)	제안된 비선형 PID 제어기 (II)
속도명령 I	34.615955	31.425076	24.301647
속도명령 II	89.504425	57.616634	36.201492
속도명령 III	298.846985	69.461838	40.435890

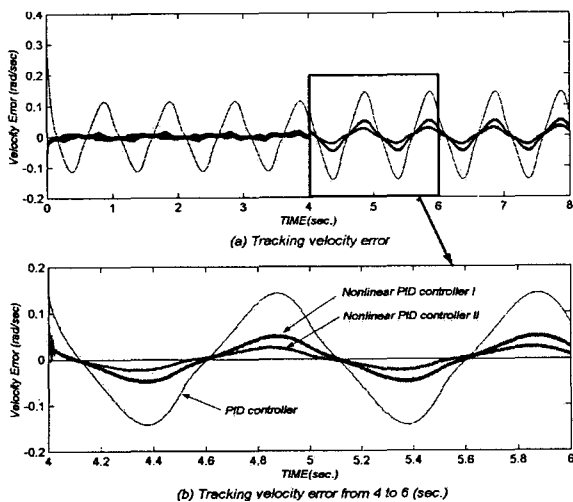


그림 11 속도 명령 III에 대한 추적 속도 오차(시스템 파라미터 변동)
 Fig. 11 Tracking velocity errors for velocity command III (system parameters variation)

3. 결 론

세포성 면역 반응의 면역 피드백 메카니즘에 기초하여 비선형 PID 제어기를 설계하였다. 면역 피드백 메카니즘에 의해 설계된 제어기가 일반적인 P-제어기와 유사하여 이를 근거로 면역 피드백 메카니즘을 비선형 PID 제어기로 확장하여 설계하였다. 확장된 비선형 PID 제어기는 임의의 속도 명령이나, 시스템 파라미터의 변동에 대해서도 일정이득의 PID 제어기에 비하여 주어진 궤적을 정확히 추적하는 강인성을 보였다. 이러한 강인성을 위한 최적의 비선형 PID 제어기 이득들을 선정하기 위하여, 면역 피드백 시스템의 비선형 함수를 온라인 조정할 수 있는 학습 알고리즘을 개발하고 이를 적용하였다. 이는 학습된 제어기의 비선형 함수 파라미터들이 시스템 변동이나 다른 제어 명령에 대하여 적응적으로 변화하여 최적의 제어 출력을 얻을 수 있었다.

또한, 제안된 비선형 PID 제어기(II)가 과거에 제안된 비선형 PID 제어기(I)에 비하여 추적 성능이 뛰어나며, 시스템 변화에 대해서도 더 강한 성능을 보임을 나타내었다. 이는 고정된 제어 이득의 비를 갖는 비선형 PID 제어기(I)에 비하여, 이득의 비와 관계없이 오차를 최적화 하는 방향으로 제어 이득을 변화시키는 제안된 비선형 PID 제어기(II)가 더 좋은 성능을 나타냄을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Motohiro Kawafuku, Minoru Sasaki, and Kasuhiko Takahashi, "Adaptive Learning Method of Neural Network Controller using an Immune Feedback Law," *Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.641-646, 1999.
- [2] Jang-Sung Chun, Jeong-Pil Lim, Hyun-Kyo Jung and Joong-Suk Yoon, "Optimization Design of Synchronous Motor with Parameter Correction Using Immune Algorithm," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 610-615, September, 1999.
- [3] Kazuyuki Mori, Makoto Tsukiyama and Toyoo Fukuda, "Adaptive Scheduling System Inspired by Immune Algorithm," *Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 3833-3837, 1998.
- [4] Manabu Kawana, Kunio Saito, Tomoyasu Hiramatsu, Michio Miyazaki, Noriyuki Nanba, "A Solving Method of Simultaneous Non-linear Equations by Using Dynamic Parametric IA with Meta GA," *T. IEE Japan*, Vol. 119-C, No. 4, pp. 488-495, 1999.
- [5] Satoshi Endoh, Naruaki Toma, Koji Yamada, "Immune algorithm for n-TSP," *proceeding of the 1998 IEEE International Conference on System Man and Cybernetics* Vol. 4, pp. 3844-3849, 1998.

- [6] A. Ishiguro, Y. Watanabe, and Y. Uchikawa, "An Immunological Approach to Dynamic Behavior Control for Autonomous Mobile Robot," *Proceeding of IROS'95*, Vol. 1, pp.495-500, 1995.
- [7] A. Ishiguro, T. Kondo, Y. Watanabe, and Y. Uchikawa, "Dynamic Behavior Arbitration of Autonomous Mobile Robot using Immune Networks," *Proceeding of ICEC'95*, Vol. 2, pp.722-727, 1995.
- [8] Yongshing Ding and Lihong Ren, "Fuzzy Self-Tuning Immune Feedback Controller for Tissue Hyperthermia," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 1, pp.534-538, 2000.
- [9] Kazuhiko Takahashi and Takayuki Yamada, "Application of an Immune Feedback Mechanism to Control System," *JSME International Journal, Series C*, Vol. 41, No. 2, 1998.
- [10] 이영진, 이진우, 이권순, "세포성 면역 알고리즘을 이용한 AGV의 조향 제어기 설계에 관한 연구," *제어 자동화 시스템 공학회 논문지*, 제7권, 제10호, pp.827-836, 2001.
- [11] Kazuhiko Takahashi and Takayuki Yamada, "A Self-Tuning Immune Feedback Controller for Controlling Mechanical Systems," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics '97*, pp.101, 1997.
- [12] 박진현, 최영규, "면역 피드백 메카니즘에 기초한 비선형 PID 제어기 설계," *전기학회 논문지*, 제52권, 제3호, pp. 134-141, 2003.
- [13] Sigeru Omatu, Marzuki Khalid and Rubiyah Yusof, *Neuro-Control and Its Application*, Springer, 1996

저 자 소 개



박진현(朴 眞 玄)

1967년 3월 2일생. 1992년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~1999년 부산정보대학 전기전자 계열 전임강사. 1999년~현재 진주산업대학교 메카트로닉스공학과 조교수.

Tel : (055) 751-3386, Fax : (055) 751-3389

E-mail : jh-park@jinju.ac.kr



최영규(崔 榮 奎)

1957년 6월 18일생. 1980년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1990~1991년 CALTECH Visiting Scholar. 1998~1999년 Univ. of Southwestern Louisiana Visiting Scholar.

현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.

Tel : 051-510-2371, Fax :051-513-0212

E-mail :ykichoi@pusan.ac.kr