

면역 피드백 메카니즘에 기초한 비선형 PID 제어기 설계

論 文

52D-3-2

Design of Nonlinear PID Controller Based on Immune Feedback Mechanism

朴 晋 玄* · 崔 榮 奎**

(Jin-Hyun Park · Young-Kiu Choi)

Abstract - PID controllers with constant gains have been widely used in various control systems due to its powerful performance and easy implementation. But it is difficult to have uniformly good control performance in all operating conditions.

In this paper, we propose a nonlinear variable PID controller with immune feedback mechanism. An immune feedback mechanism is based on the functioning of biological T-cells, they include both an active term, which controls response speed, and an inhibitive term, which controls stabilization effect. Therefore, the proposed nonlinear PID controller is based on immune responses of biological immune feedback mechanism which is the cell mediated immunity. and In order to choose the optimal nonlinear PID controller gains, we also propose the tuning algorithm of nonlinear function parameter in immune feedback mechanism. To verify performance of the proposed algorithm, the speed control of nonlinear DC motor are performed. From the simulation results, we have found that the proposed algorithm is more superior to the conventional constant gain PID controller.

Key Words : Immune feedback mechanism, nonlinear variable PID controller

1. 서 론

PID 제어기의 동조는 1942년 Ziegler-Nichols가 PID 제어기의 최적 설정에서 감도 영향을 고려하면서 완성한 한계 감도법을 시초로 여러가지 방법이 연구되어 연구되어 왔다 [1]. 최근 들어 지능제어이론인 퍼지나 신경회로망, 진화 연산 및 면역 알고리즘 등을 이용하여 PID 제어기 이득을 자동동조하는 방식이 많이 연구되고 있다. 그러나 퍼지를 이용한 동조 방식은 간단한 PID 제어기의 구현을 위하여 복잡한 퍼지추론을 행해야 하며, 신경회로망을 이용한 자동동조 방식 역시 많은 학습 시간이나 복잡한 연산이 요구된다. 그러므로 일반적인 PID 제어기의 장점인 간단한 구조의 제어기 설계가 어렵다는 단점이 있다[2]. 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithms : EAs)은 자연선택의 원리를 모방한 비결정론적 탐색 알고리즘으로, 세대 증가에 따른 학습시간의 증가와 실제 시스템 적용 시 반복학습이 아닌 온라인학습(on-line learning)으로 적용하기 어렵다는 단점이 있다[2~6].

진화 알고리즘과 유사한 비결정론적 알고리즘의 하나인 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)이 최근 들어 연구가 되어지고 있다. 인간의 면역체계는 생체의 방어 및 유지를 수행하는 자율분산시스템으로, 시스템의 요소들은 뇌의 명령

을 따르는 것이 아니라 각 요소가 자율적으로 환경에 대응한다. 즉, 생체내로 침입하는 박테리아, 기생균, 병원균, 독소, 바이러스 등과 같은 항원에 대하여 생체를 방어하기 위해, 세포 유전자를 재구성하여 항원(Antigen)에 대응하는 항체(Antibody)를 생산하고 항원을 배제하는 경우 정교하고 복잡한 생체방어수단인 면역시스템을 가지고 있다. 이러한 면역 시스템을 여러 공학 분야에서 체액성 면역 반응(Humoral Immune Response)과 세포성 면역 반응(Cell-Mediated Immune Response)으로 나누어 연구되고 있다[7~12].

체액성 면역 반응에 대한 연구는 최적화 기법 및 로봇의 행동 선택기 등과 같은 적용 방법으로 연구가 진행되고 있으며, 최적화 기법의 적용에서는 지금까지 연구되어진 진화 알고리즘 특히, 유전 알고리즘의 연산자에 면역 시스템이 갖는 개체 생산의 촉진과 억제 등의 메카니즘을 결합한 방법이 연구의 주를 이루고 있다[7-10]. 따라서 각 항체간의 친화도를 계산하고, 이를 억제세포와 기억세포로 분화하여, 개체 생산의 촉진과 억제 메카니즘에 적용하는 복잡한 일련의 작업을 수행한다. 최적화 기법이 아닌 체액성 면역 반응으로는 자율 이동 로봇의 궤적 계획, 로봇군 제어 및 분산 자율 로봇 제어에서와 같이 면역 알고리즘을 로봇의 행동 선택기로서 적용한 사례가 주로 연구되고 있다[11, 12].

세포성 면역 반응은 면역 피드백 메카니즘에 의한 T-림프구의 세포분자 동역학을 바탕으로 연구되어지며, 개체의 제거(Killer), 촉진(Helper), 억제(Suppress)와 같은 3가지 세포성 면역반응이다. 즉, T-림프구는 제거, 촉진, 억제의 기능으로 하는 3가지 세포로 구성되어 외부 침입물질에 대하여 빠르게 반응하고, 내부 면역 체계를 보다 빠르게 안정화시키는 기능

* 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 6月 5日
最終完了 : 2002年 12月 12日

을 독립적으로 함께 수행할 수 있다는 특성 면에서 하나의 피드백 메카니즘이라고 할 수 있다. 따라서 면역 피드백 메카니즘을 이용한 제어기가 체액성 면역 반응에 의해 설계된 제어기에 비하여 매우 간결하게 설계되는 장점을 갖는다. 그러므로 이러한 면역 피드백 메카니즘을 기초하여 제어기의 설계에 적용하는 연구가 진행되고 있으나 많지 않은 실정이다[13~15].

본 연구에서는 이러한 세포성 면역 반응의 면역 피드백 메카니즘에 기초하여, 임의의 다른 주파수 성분을 갖는 속도 명령이나, 시스템 파라미터의 변동에 주어진 계적을 정확히 추적할 수 있는 강인한 비선형 가변 PID 제어기를 제안하고자 한다. 또한 최적의 PID 제어기 이득을 선정하기 위하여 면역 피드백 메카니즘의 비선형 함수를 온라인 조정할 수 있는 학습 알고리즘을 개발하고 이를 적용하고자 한다. 그리고 제안된 제어기의 성능 평가를 위하여 직류 모터의 속도제어에 적용하고, 제안된 면역 피드백 메카니즘에 기초한 비선형 가변 PID 제어기는 비선형 직류 모터 시스템의 파라미터들이 변화하거나 다른 추종 명령에 대하여, 일정이득을 갖는 일반적인 PID 제어기에 비하여 우수한 성능을 보이고자 한다.

2. 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 대하여 생체를 방어하기 위해, 세포유전자를 재구성하여 항원에 대응하는 항체를 생산하고 항원을 배제하는 매우 정교하고 복잡한 생체방어수단인 면역 시스템을 가지고 있다. 면역 시스템은 인간의 피부와 점막 같은 1차 방어 시스템과 특이적 방어(specific defence)와 비특이적 방어(nonspecific defence)인 2차 방어 시스템으로 나뉜다[13, 14].

일반적인 면역 반응의 기본구조는 T-림프구와 B-림프구로 구성되어 있다. 인간의 몸에는 대략 10^7 개의 다른 종류의 B-림프구를 가지고 있다. B-림프구의 항체(antibody)는 'Y' 형상을 가지고 있고, 항체는 고유의 정보를 갖는 paratope와 ideotope를 가지고 있다. 항체의 paratope와 항원(antigen)의 epitope는 열쇠와 자물쇠의 관계처럼 서로 일치할 경우 항체에 의해 항원은 억제된다. 또한 면역 체계는 한번 배제한 항원에 대하여 그 항원을 기억하여 이것을 배제하는 항체를 조속히 생성하는 기억세포를 가지고 있다. 따라서, 면역 체계는 림프구가 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[13].

비특이적 2차 방어 시스템인 T-림프구는 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. 그림 1은 면역 시스템의 T-림프구와 B-림프구에 관한 개괄적 설명이다.

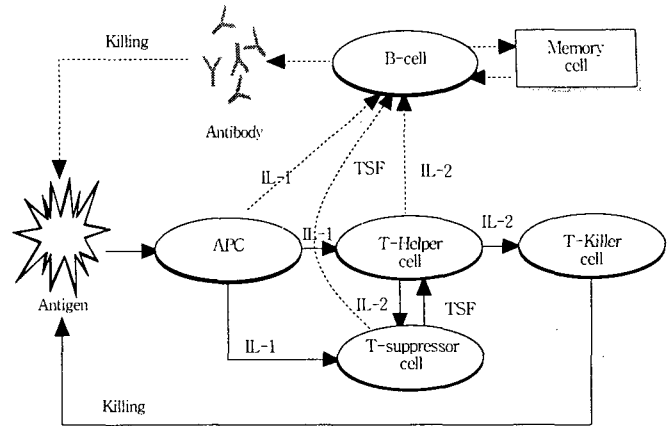


그림 1 면역 피드백 메카니즘

Fig. 1 Immune Feedback Mechanism

그림에서 실선은 세포성 면역 반응에 관한 자극의 흐름이며, 점선은 체액성 면역 반응에 대한 자극의 흐름이다. 그림에서와 같이 항원이 침입하면, 항원에 감염된 사실을 알려주는 항원 제시 세포(Antigen Presenting Cell : APC)가 인터루킨(Interleukin-1:IL-1)를 분비하여 그 정보를 T_h와 T_s 그리고 B-림프구에 전달한다.

B-림프구는 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_h는 T_k, T_s와 B-림프구에 인터루킨(Interleukin-2:IL-2)를 분비하여 면역 반응을 촉진시키고, T_s는 TSF(T-suppressor factor)를 T_h, T_k와 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 특징을 세포성 면역 반응의 피드백 메카니즘이라고 할 수 있다.

3. 세포성 면역 피드백 메카니즘에 의한 비선형 PID 제어기 설계

3.1 세포성 면역 피드백 메카니즘 설계

생물학적 면역 시스템의 메카니즘은 매우 복잡하며, 또한 명확하게 밝혀지지 않았다. 따라서 T-림프구에 의한 세포성 면역 피드백 메카니즘만을 고려하여 단순하게 설계하면 그림 2와 같이 구성될 수 있다.

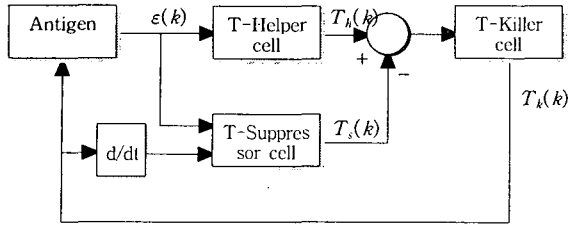


그림 2 T-림프구만을 고려한 면역 피드백 메카니즘
Fig. 2 Immune Feedback Mechanism focusing on the T-Lymphocytes

세포성 면역 메카니즘에서 항원을 제거하는 역할을 하는 것이 \$T_k\$이며, \$T_h\$는 \$T_k\$를 활성화 시키고, \$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. 식 (1)은 IL-1에 의한 \$T_h\$ 세포의 출력을 나타내었다.

$$T_h(k) = K_1 \epsilon(k) \tag{1}$$

여기서, \$K_1\$은 \$T_h\$ 세포 성장 속도에 관한 파라미터이고, \$\epsilon(k)\$는 APC에 의한 IL-1을 나타낸다.

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. 따라서, 면역반응에서 항원의 증감 변화는 면역 시스템의 \$T_k\$와 \$T_h\$의 변화를 가져오므로 \$T_s\$는 \$T_k\$의 변화량에 의존한다고 가정할 수 있다. 그러므로 이러한 관계에 의하여 \$T_s\$에 관한 식을 나타낼 수 있다.

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

$$\Delta T_k(k-1) = T_k(k-1) - T_k(k-2)$$

여기서, \$K_2\$은 \$T_s\$ 세포 성장 속도에 관한 파라미터이고, \$f[\cdot]\$는 비선형 함수로 항원과 \$T_k\$ 사이의 상호 작용에 의해 결정되는 함수이다.

즉, \$T_k\$세포가 갑자기 증가하거나 감소할 경우, \$T_s\$는 항원이 크게 감소하는 방향으로 설정되어야 한다. 따라서 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$f[x] = 1.0 - \exp(-x^2/a) \tag{3}$$

여기서, \$a\$는 비선형 함수의 모양을 변화시키는 파라미터이다.

그리고 \$T_k\$ 세포는 \$T_h\$와 \$T_s\$에 의하여 직접 작용되므로, 아래 식(4)와 같이 정의될 수 있다.

$$T_k(k) = T_h(k) - T_s(k) \tag{4}$$

이상의 식(1)~(4)를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$T_k(k) = K_1 \epsilon(k) - K_2 f[\Delta T_k(k-1)] \epsilon(k) \tag{5}$$

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

여기서, \$K = K_1\$이며, \$\eta_0 = K_2/K_1\$이다.

결론적으로 \$T_k\$세포는 외부 항원에 의한 APC의 양에 의해 결정되어지며, \$T_h\$와 \$T_s\$의 함수에 의하여 조절되어진다고 할 수 있다. 따라서 \$T_k\$세포는 이러한 생체 내부의 능동적 조절에 의하여 안정한 상태로 유지시키는 피드백 메카니즘을 가지는 것이다. 그러므로 \$K\$는 응답 속도를 제어하고, 파라미터 \$\eta_0\$는 안정도에 관련된다. 따라서 면역 피드백 메카니즘의 성능은 이러한 파라미터들과 비선형 함수 \$f[\cdot]\$의 선정에 달려있다.

3.2 면역 피드백 메카니즘에 의한 비선형 PID 제어기 설계

본 절에서는 면역 피드백 메카니즘에 의한 비선형 PID 제어를 설계하고자 한다. 그림 2의 면역 피드백 메카니즘을 공학적인 제어의 관점에서 해석하여 보면, \$\epsilon(k)\$를 \$k\$ 샘플링 시간에서의 제어 오차 신호 \$e(k)\$로 가정하고, \$T_k(k)\$는 시스템을 제어하는 제어량 \$u(k)\$로 두고, \$K\$는 제어기의 이득 \$K_p\$로 간주한다면 식(5)는 아래와 같은 PID 제어기 중 비례 이득만을 갖는 P 제어기로 둘 수 있다[13].

$$u(k) = K_p \{1 - \eta_0 f[\Delta u(k)]\} e(k) \tag{6}$$

이러한 면역 피드백 메카니즘에 의한 제어기는 단순히 제어 오차만을 가지는 제어기이므로, 비선형 시스템에 존재하는 노이즈나, 외란 등에 의한 제어 오차를 보상할 수 없다. 따라서 일반적인 PID 제어기와 같은 오차의 미분항과 적분항을 고려하여 제어기를 설계하는 것이 바람직하다. 그러므로 새로운 면역 피드백 메카니즘에 의한 비선형 PID 제어기는 다음과 같이 설계할 수 있다[13].

$$u(k) = K_p \{1 - \eta_0 f[\Delta u(k)]\} \left(1 + \frac{z}{T_i(z-1)} + T_d \frac{z-1}{z}\right) e(k) \tag{7}$$

여기서, 파라미터 \$K_p\$, \$T_i\$, \$T_d\$는 제어기의 비례 이득, 적분 시간, 미분 시간을 나타내므로, 면역 억제 요소 비 \$\eta_0\$와 같이 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$(K_p, T_i, T_d) > 0, \eta_0 \geq 0 \tag{8}$$

만약, \$0 \le \eta_0 f[\Delta u(k)] \le 1\$이면 부귀환 제어가 되나, \$1 < \eta_0 f[\Delta u(k)]\$면 정귀환 제어 시스템이 된다. 그러므로 제어 시스템의 안정을 위하여 \$\eta_0\$의 한계값을 설정하여야 한다. 만약, \$\eta_0 = 0\$이면 제안된 비선형 PID 제어기는 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.

3.3 비선형 PID 제어기의 자동 동조

본 절에서는 식 (7)과 같은 면역 피드백 메카니즘을 갖는 비선형 PID 제어기를 적용할 때, 고려하여야 하는 제어기 이득들이 비선형 함수 $f[\cdot]$ 를 포함하고 있으므로, 비선형 함수 파라미터의 선정이 제어기의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 식 (3)의 비선형 함수를 $f[\cdot]$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$f[x, a] = 1.0 - \exp(-x^2/a) \quad (9)$$

그림 3은 비선형 함수인 식(9)의 파라미터 a 의 변동에 대한 입출력 그림이다. 파라미터의 크기에 따라 비선형 함수의 값이 매우 다름을 알 수 있다.

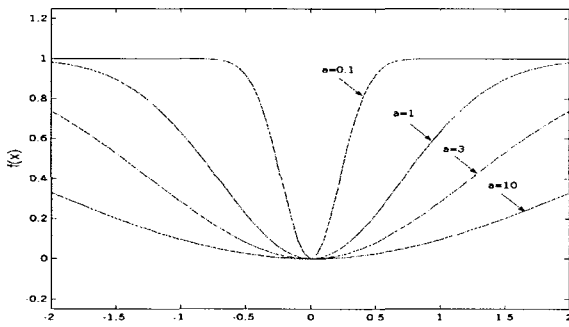


그림 3 비선형 함수 모양
Fig. 3 Nonlinear function shape

그러므로 비선형 함수 파라미터 a 를 온라인 자동 동조하는 동조 알고리즘이 필요하다. 그림 4는 제안된 비선형 PID 제어기의 비선형 함수를 자동 동조하는 제어 시스템을 나타내었다.

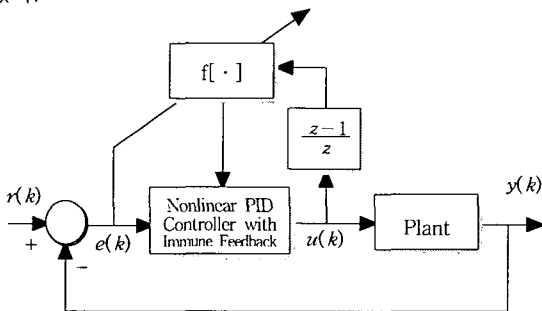


그림 4 면역 피드백 메카니즘을 갖는 비선형 PID 제어기의 자동 동조 시스템
Fig. 4 Auto-tuning system of nonlinear PID controller with immune feedback mechanism

비선형 함수의 자동 동조를 위하여 경사 감소법(gradient descent)을 사용하였다. 목표 입력 값과 플랜트 출력 값의 오

차 신호를 사용한 오차 함수를 구성하여, 오차가 최소화되도록 비선형 함수 파라미터를 수정하도록 하였다.

즉, 오차 함수 $E_p(k)$ 를 다음과 같이 구성하였다.

$$E_p(k) = \frac{1}{2}(r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2}e(k)^2 \quad (9)$$

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 다음과 같다.

$$\Delta a(k) = -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial a(k)} = -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial f[\cdot](k)} \frac{\partial f[\cdot](k)}{\partial a(k)} \quad (10)$$

여기서, ζ 는 학습율을 나타낸다.

그리고 식 (10)로부터 $\frac{\partial f[\cdot](k)}{\partial a(k)}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\partial f[\cdot](k)}{\partial a(k)} = \frac{x^2}{a(k)^2} \exp(-\frac{x^2}{a(k)}) \quad (11)$$

또한, $\frac{\partial E_p(k)}{\partial f[\cdot](k)}$ 는 연쇄법을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E_p(k)}{\partial f[\cdot](k)} = \frac{\partial E_p(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial f[\cdot](k)} \quad (12)$$

식 (12)의 각 항들을 정리하면 다음과 같이 정리된다

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

또한, $\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$ 는 시스템의 자코비안(Jacobian)을 구하는 문제가 되므로, 일반적으로 알 수 없는 값이다. 따라서 수학적으로 근사하여 사용하였다[16].

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

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

또한, $\frac{\partial u(k)}{\partial f[\cdot](k)}$ 를 구하기 위하여 식 (7)을 이산 시간 시스템으로 바꾸면 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + (1 - \eta_0 \alpha) \times \{K_p(e(k) - e(k-1)) + \frac{K_p}{T_i} e(k) + K_p T_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))\} \quad (15)$$

식 (15)으로부터 $\frac{\partial u(k)}{\partial \alpha(k)}$ 는 식 (16)과 같이 구하여진다.

$$\frac{\partial u(k)}{\partial \alpha(k)} = -\eta_0 \left\{ K_p(e(k) - e(k-1)) + \frac{K_p}{T_i} e(k) + K_p T_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \right\} \quad (16)$$

이상의 식 (10)~식 (16)으로부터 비선형 함수 파라미터 a 의 온라인 자동 동조를 위한 업데이트 식은 경사 감소법에 의하여 다음과 같이 구하여진다.

$$a(k+1) = a(k) + \Delta a(k) \quad (17)$$

4. 비선형 직류 모터 제어시스템 구성 및 모의 실험

앞에서 제안한 면역 피드백 메카니즘을 이용한 비선형 PID 제어기의 성능 평가를 위하여 비선형 직류 모터의 속도 제어에 적용하였다. 시뮬레이션을 위한 직류 모터 방정식은 다음 식과 같다.

$$K\omega_p(t) = -R_a i_a - L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_a(t) \quad (18)$$

$$K i_a = J \frac{d\omega_p(t)}{dt} + D\omega_p(t) + T_L(t) \quad (19)$$

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

$$T_L = \mu \omega_p^2(t) \text{sign}(\omega_p(t)) \quad (20)$$

또한 모터의 사양과 운전 범위는 표 1과 같다.

표 1 직류 모터의 사양 및 운전 범위
Table 1 Specification and operating range of DC motor

Parameters of DC motor	J	0.068 Kg m ²
	K	3.475 Nm A ⁻¹
	D	0.03475 Nm s
	μ	0.0039 Nm s ²
Operating range of DC motor	$-40.0 < \omega_p(k) < 40.0(\text{rad/sec})$	

제안된 알고리즘의 성능 비교를 위하여 비교 대상으로 일정이득을 갖는 PID 제어기를 적용하였다. 직류 모터 시스템 제어를 위한 샘플링 시간은 2(msec)로 하였으며, 속도 명령은 아래와 같이 4가지로 설정하였다. 속도 명령 II와 III은

속도 명령 I의 주파수 보다 2배와 4배 빠르게 설정하였으며, 속도 명령 IV는 여러 가지 주파수가 포함되도록 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 제안된 비선형 PID 제어기에 대한 이득은 앞서 구한 일정이득의 PID 제어기 이득의 2배를 사용하였다. 따라서 일정이득의 PID 제어기 이득과 제안된 알고리즘의 이득은 아래 표와 같이 구성하였다. 또한 제안된 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

변수	일정이득의 PID 제어기	제안된 비선형 PID 제어기
이득	K_p	50.0
	K_p/T_i	1.6
	$K_p T_d$	1.5
비선형함수 η_0	.	0.9

그림 5는 속도 명령 I에 대한 PID 제어기와 제안된 비선형 PID 제어기의 성능을 나타내었다. 특히, 그림 5-(b)는 두 제어기에 의한 속도 오차를 도시하였으며, 제안된 제어기가 초기에 일반적인 PID 제어기에 비하여 조금 큰 오차를 발생하나, 이것은 비선형 함수의 파라미터가 초기에 완벽하게 학습이 되지 않은 상태에서 나타나는 결과이다. 따라서, 학습이 진행된 약 35(msec) 이후의 결과는 일반적인 PID 제어기에 비하여 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 그림 5-(c)는 제안된 제어기의 비선형 함수 파라미터 a 와 비선형 함수의 출력을 나타내었다. 비선형 함수의 출력은 그림에서 알 수 있듯이 평균적으로 0.41정도를 나타내고, 변화폭이 최대 ± 0.02 정도 됨을 알 수 있다. 이는 비선형 PID 제어기가 설정된 제어 이득의 61~65% 정도를 제어 이득 값으로 적용함을 알 수 있다.

그림 6은 속도 명령 II에 대한 제어기의 성능을 비교하여 나타내었다. 그림 6-(a)는 두 제어기에 의한 속도 오차를 나타내었으며, 제안된 제어기가 속도 명령 I에서와 같이 초기에 일반적인 PID 제어기에 비하여 조금 큰 오차를 발생하나, 이것 역시 학습이 진행된 약 35(msec) 이후의 결과에서는 일반적인 PID 제어기에 비하여 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

또한, 그림 7은 속도 명령 III에 대한 제어기의 오차와 비선형 함수의 값 그리고 학습된 비선형 함수 파라미터 a 를

나타내었다. 일반적인 PID 제어기에 비하여 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다.

그리고, 그림 8에서는 속도 명령 IV에 대한 성능 비교를 하였다. 일반적인 PID 제어기에 비하여 매우 향상된 성능을 보이며, 이는 선형 PID 제어기에 비하여 제안된 제어기가 높은 주파수가 포함된 속도 지령에 대하여서도 잘 추종함을 보였다.

앞의 결과로부터 속도 명령 I을 잘 추종하도록 설정한 일정이득의 PID 제어기는 속도 명령의 주파수가 올라갈수록 속도 지령에 대하여 속응성이 떨어지며, 오차가 크게 발생함을 보였다. 그러나 제안된 비선형 PID 제어기는 속도 명령의 주파수가 올라가더라도 비선형 함수값을 변화시켜 최적의 성능을 나타내었다. 표 3은 속도 명령 I, II, III, IV에 대한 속도 오차의 합을 정리하여 나타내었다.

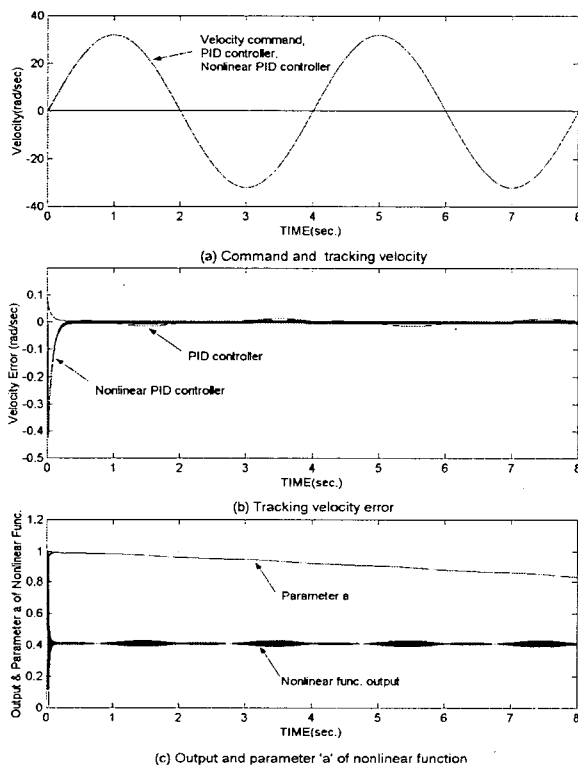


그림 5 속도 명령 I에 대한 성능 비교
Fig. 5 Comparison of performances for velocity command I

표 3 속도 추적 오차의 합
Table 3 Sum of velocity tracking error

오차합	일정이득 PID 제어기	제안된 비선형 제어기
속도 명령 I	30.546419	33.687275
속도 명령 II	79.138443	48.533337
속도 명령 III	265.190704	28.465136
속도 명령 IV	144.132507	21.972181

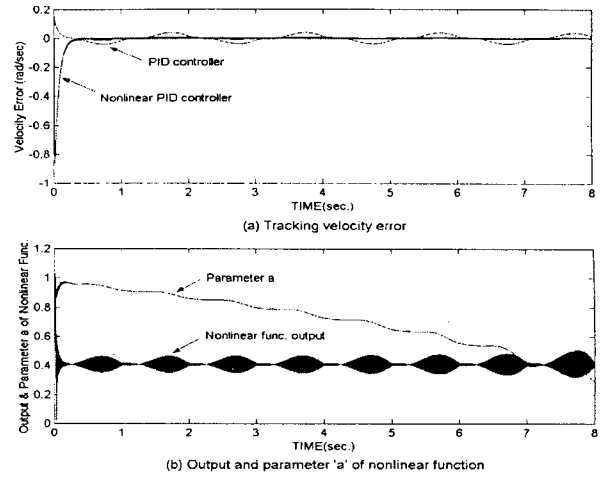


그림 6 속도 명령 II에 대한 성능 비교
Fig. 6 Comparison of performances for velocity command II

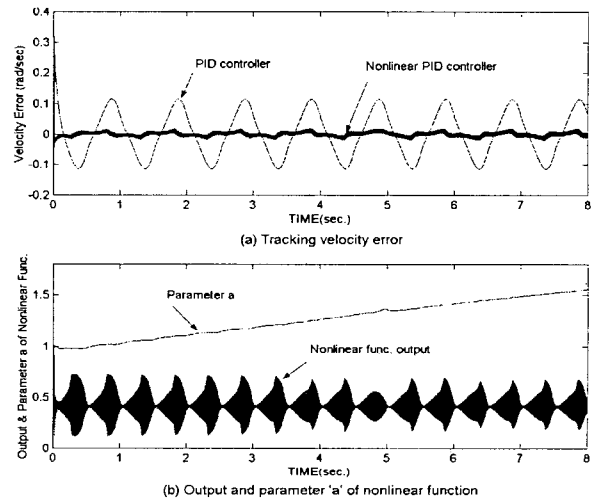


그림 7 속도 명령 III에 대한 성능 비교
Fig. 7 Comparison of performances for velocity command III

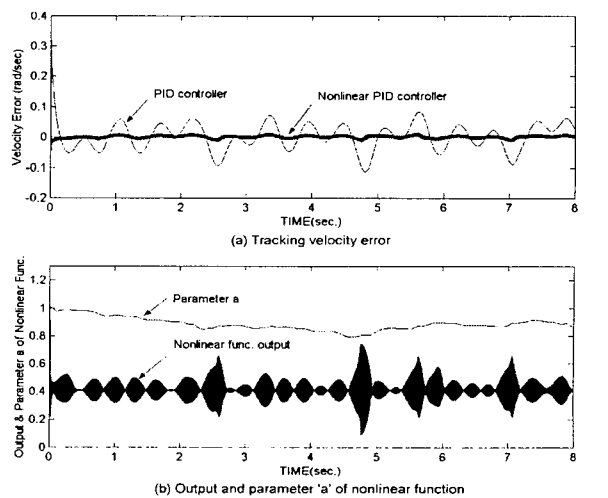


그림 8 속도 명령 IV에 대한 성능 비교
Fig. 8 Comparison of performances for velocity command IV

그림 9~11은 위의 속도 명령 I, II, III를 인가하고, 4초부터 비선형 모터 시스템 파라미터 J, D, μ 를 25%씩 증가하였을 경우, 제어 성능을 나타내었다. 일정이득의 PID 제어기에 비하여 제안된 비선형 PID 제어기가 더 잘 추종함을 알 수 있다. 이는 학습된 비선형 함수에 의하여, 제어 이득을 적절히 변화시켜 변화된 시스템에 적응적으로 동작함을 보인다. 표 4는 시스템 변화에 대한 속도 명령 I, II, III의 추적 속도 오차의 합을 정리하여 나타내었다.

이상의 결과로부터 제안된 비선형 PID 제어기가 일정이득의 PID 제어기에 비하여 임의의 다른 주파수 성분을 갖는 속도 명령에 대하여 잘 추종함을 보였으며, 또한 시스템 파라미터의 변동에 대해서도 제안된 제어기의 비선형 함수에 의하여 적응적으로 제어 이득을 변화시켜, 강한 성능을 보였다.

표 4 시스템 파라미터 변동에 대한 속도 추적 오차의 합
Table 4 Sum of velocity tracking error under system parameters variation

	일정이득 PID 제어기의 오차합	제안된 비선형 제어기의 오차합
속도 명령 I	34.615955	31.425076
속도 명령 II	89.504425	57.616634
속도 명령 III	298.846985	69.461838

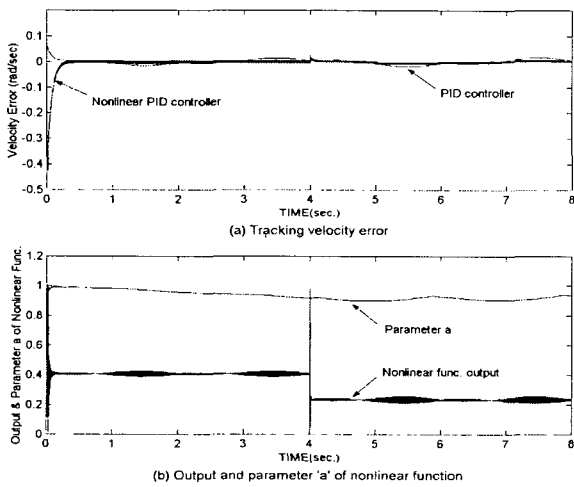


그림 9 속도 명령 I에 대한 성능 비교(시스템 파라미터 변동)
Fig. 9 Comparison of performances for velocity command I (system parameters variation)

3. 결론

본 연구에서는 세포성 면역 반응의 면역 피드백 메카니즘에 기초하여, 임의의 다른 주파수 성분을 갖는 속도 명령이나, 시스템 파라미터의 변동에 주어진 계책을 정확히 추적할 수 있는 강한 비선형 가변 PID 제어기를 제안하고자 한다.

또한, 최적의 비선형 가변 PID 제어기 이득을 선정하기 위하여 면역 피드백 메카니즘의 비선형 함수를 온라인 조정할

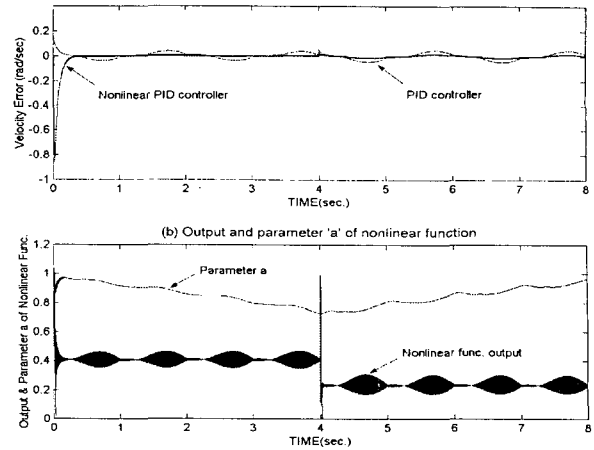


그림 10 속도 명령 II에 대한 성능 비교(시스템 파라미터 변동)
Fig. 10 Comparison of performances for velocity command II (system parameters variation)

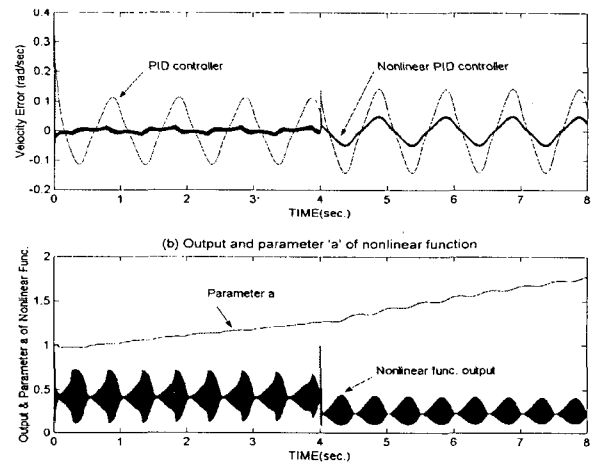


그림 11 속도 명령 III에 대한 성능 비교(시스템 파라미터 변동)
Fig. 11 Comparison of performances for velocity command III (system parameters variation)

수 있는 학습 알고리즘을 개발하고 이를 적용하였다.

제안된 비선형 PID 제어기의 성능 평가를 위하여 직류 모터의 속도제어에 적용하였으며, 제안된 면역 피드백 메카니즘에 기초한 제어기는 비선형 직류 모터 시스템의 파라미터들이 변화하거나 주파수가 다른 추종 명령에 대하여, 일정이득을 갖는 PID 제어기에 비하여 우수한 성능 결과를 보였다. 이는 학습된 제어기의 비선형 함수가 시스템 변동이나 제어 명령에 대하여 적응적으로 변화하여 최적의 제어 출력을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

[1] J. G. Zeigler and N. B. Nichols, "Optimum Setting for Automatic Controller," *IEEE Trans. ASEM*, Vol. 64, pp. 759~768, 1942.
[2] J. H. Park and Y. K. Choi, "On-line Control Scheme

for Dynamic System using Evolutionary Algorithm," *Proceeding of the 1st Korea-Australia Joint Workshop on Evolutionary Computation*, pp. 114~118, September, 1994.

[3] S. Matsumura, S. Omata and H. Higasa, "Tuning of PID Gains for Speed Control of Electric Vehicle Testing System," *Proceeding of International Conference on Neural Information Processing*, pp 1657~1662, 1994.

[4] Koji Shimojima, Toshio Fukuda and Yasuhisa Hasegawa, "Self-tuning Fuzzy Modeling with Adaptive Membership Function, rules, and Hierarchical Structure based on genetic Algorithm," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 71, 1995.

[5] Jyh-Shing R. Jang, "Self-Learning Fuzzy Controllers Based on Temporal Back Propagation," *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 5, No. 5, September, 1992.

[6] N. Saravanan and D. B. Fogel, "Evolving Neurocontrollers using Evolutionary Programming," *Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation*, pp. 217~222, 1994.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Kazuhiko Takahashi and Takayuki Yamada, "Application of an Immune Feedback Mechanism to Control System," *JSME International Journal, Series C*, Vol. 41, No. 2, 1998.

[14] 이영진, 이진우, 이권순, "세포성 면역 알고리즘을 이용한 AGV의 조향 제어기 설계에 관한 연구," *제어 자동화 시스템 공학회 논문지*, 제7권, 제10호, pp.827-836, 2001.

[15] 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.

[16] Sigeru Omatu, Marzuki Khalid and Rubiyah Yusof, *Neuro-Control and Its Application*, Springer, 1996

저 자 소 개



박진현 (朴 晋 玄)

1967년 3월 2일생. 1992년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~1999년 부산정보대학 전기전자계열 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 전자전기정보 컴퓨터공학부 교수.

Tel : 051-510-2371

Fax : 051-513-0212

E-mail : ykichoi@pusan.ac.kr